

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Stavba výrobních strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Konstrukční řešení válcovací stolice kvarto

Autor: **Vladimír Dvořák**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Jiří STANĚK, CSc.**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vladimír DVOŘÁK**
Osobní číslo: **S13B0127P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Stavba výrobních strojů a zařízení**
Název tématu: **Konstrukční řešení válcovací stolice kvarto**
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní požadavky:

Představte historický vývoj v oblasti válcovacích stolic. Proveďte rešerši současného stavu (konstrukce, výroba, technické parametry, konstrukční uzly) a stručný pohled do budoucna. Na konkrétní válcovací stolici kvarto proveďte základní výpočty.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova bakalářské práce:

1. Historie válcovacích stolic, rešerše současného stavu a výhled do budoucna
2. Specifikace požadavků na válcovací stolice a jejich základní rozdělení
3. Technologické použití válcovací stolice kvarto a základní výpočty
4. Návrh rámu stroje
5. Závěr a zhodnocení výsledků práce

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **30-40 stran A4**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

RUDOLF, B., KOPECKÝ, M. Tvářecí stroje - Základy stavby a využití. Praha: SNTL, 1985

SEMIATIN, S. L. Forming and Forging, Volume 14. USA: ASM International, 1988

STANĚK, J. Základy stavby výrobních strojů - tvářecí stroje. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004


Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.**
Katedra konstruování strojů
Konzultant bakalářské práce: **Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.**
Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce: **21. září 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2016**


Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 21. září 2015

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Dvořák	Jméno Vladimír	
STUDIJNÍ OBOR	2301R016/19 „Stavba výrobních strojů a zařízení“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Staněk, CSc.	Jméno Jiří	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Konstrukční řešení válcovací stolice kvarto		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2016
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	82	TEXTOVÁ ČÁST	50	GRAFICKÁ ČÁST	32
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS	Bakalářská práce se zaměřuje na technologii válcování a válcovací stolice, zejména pak na válcovací stolicí kvarto. Obsahuje pohled do historie válcovacích stolic i rešerši současného stavu, rozdělení nebo využití válcovacích stolic. Obsah práce zahrnuje základní pojmy z oblasti válcování a částečnou inovaci válcovací stolice kvarto, a s tím spojené základní výpočty rámu i válce válcovací stolice.
KLÍČOVÁ SLOVA	Válcování, válcovací stolice kvarto, opěrný válec, pracovní válec, rám

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Dvořák	Name Vladimír	
FIELD OF STUDY	2301R016/19 “ Design of Manufacturing Machines and Equipment“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Staněk, CSc.	Name Jiří	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design solution of the rolling mill Quarto		

FACULTY	Mechaical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2016
----------------	-----------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	82	TEXT PART	50	GRAPHICAL PART	32
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION	This bachelor's thesis is focused on rolling mills and the technology of rolling at all, especially on the four-high rolling mill (Quarto). It contains insight into the history of rolling mills and research of the current status, then sorting or utilization of the rolling mills. Contents of the thesis includes basic terms of rolling and partial innovation four-high mill and the associated calculations of the frame and mill rolls.
KEY WORDS	Rolling of steel, four-high rolling mill, quarto, backup roll, work roll, frame

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Jiří Staňkovi, CSc. za cenné rady, odborné vedení a vstřícnost při konzultacích a vypracování této bakalářské práce.

Obsah

1	Úvod	9
2	Historický vývoj	10
2.1	Závody spojené s válcovacími stolicemi	12
2.2	Současnost	13
2.2.1	Ruční válcovací stolice	13
2.2.2	Hutní válcovací stolice	13
2.3	Budoucnost tvářecích strojů	15
3	Rozdělení válcovacích stolic	16
3.1	Obecné rozdělení	16
3.2	Rozdělení válcovacích stolic	16
4	Požadavky na válcovací stolice	20
5	Technologie válcování	21
5.1	Základní pojmy	21
5.1.1	Válcovaný materiál	21
5.1.2	Zákony tváření	21
5.2	Základní konstrukční uzly válcovací stolice kvarto	22
5.3	Využití válcovacích stolic	23
5.4	Základní vztahy	24
5.4.1	Podmínka pro vtažení provalku mezi válce	24
5.4.2	Rychlost provalku	25
5.4.3	Úběr a styčná plocha	25
5.4.4	Válcovací síla	26
6	Výpočet válcovací stolice kvarto	27
6.1	Výpočet rámu	27
6.1.1	Průřezové charakteristiky a střední čára profilu	28
6.1.2	Výpočtový model	28
6.1.3	Výpočet momentu, napětí a deformace	29
6.1.4	Kontrola místa s otvorem pro šroub	30
6.1.5	Kontrola stavěcího šroubu	30
6.1.6	Maximální deformace rámu ve svislém směru	32
6.1.7	Zhodnocení	33
6.2	Výpočet opěrného válce	33

6.2.1	Výpočtový model	34
6.2.2	Výpočet průhybu válce.....	34
6.2.3	Výpočet pomocí MKP	36
6.2.4	Ložiska	37
6.2.5	Zhodnocení.....	40
7	Závěr.....	41
8	Použitá literatura.....	43

1 Úvod

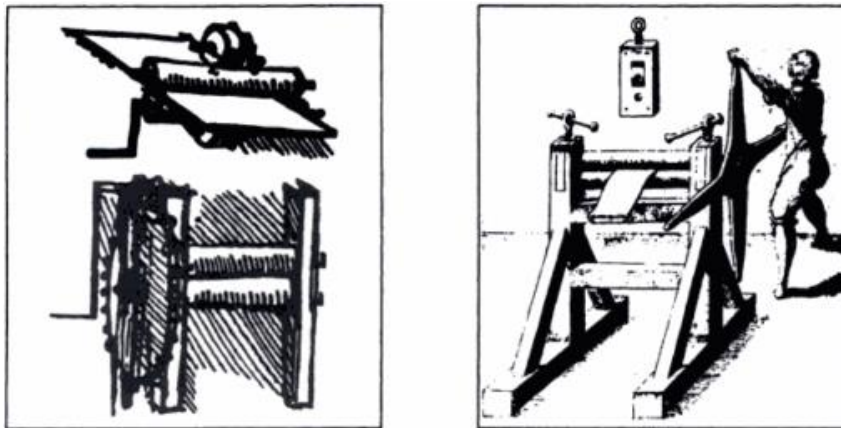
Tato práce pojednává o technologii válcování, zejména pak o válcovací stolici kvarto. V teoretické části je nastíněn vývoj válcovacích stolic i popis současného stavu, včetně rozdělení a využití válcovacích stolic. Dále jsou zde uvedeny základní pojmy a vztahy spojené s válcovacím procesem. Praktická část se zaměřuje na částečnou inovaci válcovací stolice kvarto a základní výpočty rámu i válce. Rám byl následně upraven takovým způsobem, aby se snížila jeho hmotnost, ale vlastnosti zůstaly zachovány. Válec je kontrolován na průhyb a v poslední části se řeší jeho uložení. Výpočty jsou prováděny analytickými metodami, u válce i v dnešní době hojně využívanou výpočtovou metodou MKP.

Dnes je válcování jednou z nejvíce využívaných technologií při výrobě hutních výrobků a polotovárů. A to hlavně z toho důvodu, že patří mezi vysoce efektivní a ekonomické technologie v oblasti objemového tváření a nabízí tak relativně jednoduchou a levnou cestu zpracování nejen kovových materiálů. Z historického pohledu se jedná o technologii s dlouhou minulostí, už Leonardo da Vinci popsal první stroj na válcování. Největší rozvoj válcovacích strojů byl však v období 18. století, kdy docházelo k industrializaci. V současnosti disponují válcovací stolice přídatným příslušenstvím, jako např. zařízení pro výměnu válců nebo tryskácká zařízení k odstranění okují.

V praktické části je popsán základní výpočet rámu válcovací stolice kvarto. Plný průřez rámu byl následně pozmeněn za dutý. Rozměry byly zvoleny tak, aby se dospělo k úspoře materiálu s minimální změnou tuhosti. Tuhost je velice důležitá i pro válce, a proto byl opěrný válec počítán na deformaci. Pro oba válce, jak opěrné tak pracovní, bylo zvoleno uložení. Ložiska byla počítána a kontrolována na trvanlivost.

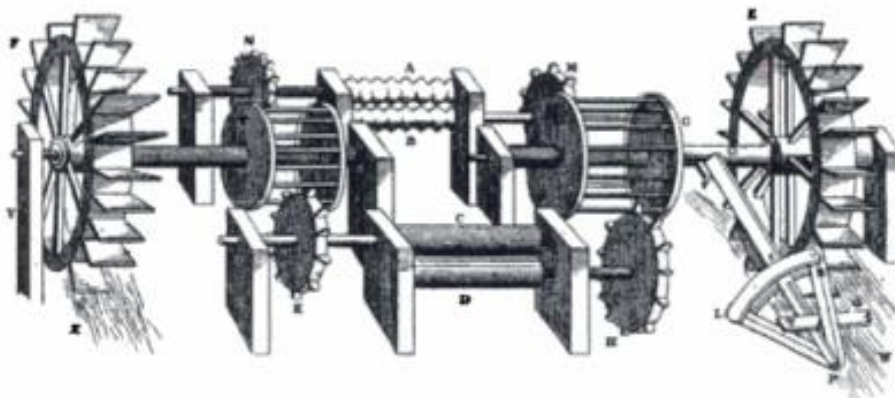
2 Historický vývoj^{[6][16][38]}

Tváření je první způsob, jakým byl materiál v historii přetvářen. K tomuto procesu se nejdříve využívala lidská síla – ručním kladivem byl materiál tvářen na kovadlině. Později člověk začal využívat různé mechanismy a sílu zvířat. Během čtrnáctého století se používaly malá ruční zařízení s válci o průměru přibližně půl palce, které se používaly ke zpracování zlata a stříbra. Nicméně, zmínka o první skutečné válcovací stolici byla ve studiích Leonarda da Vinciho až v roce 1480. Je zde zachycena válcovací stolice (obr. 2.1 vlevo) s ručním ovládním, která měla sloužit pro válcování olova nebo pro válcování materiálu k ražení mincí. Neexistuje však žádný důkaz, že byla tato válcovací stolice postavena.



Obr. 2.1 – První náčrt válcovací stolice (vlevo) a válcovací stolice Salomona de Causeho (vpravo) [6]

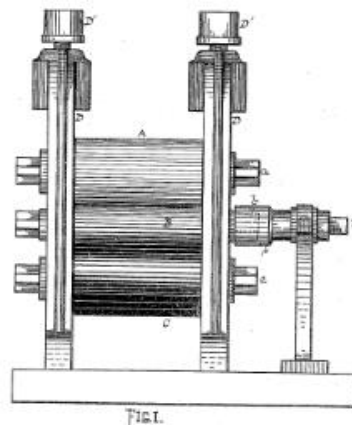
Krátce po roce 1500 se na území Belgie a Německa začaly používat dělicí stolice, které sloužily k dělení železa. V roce 1578 získal Bevis Bulmer patent na dělicí stolici, která se skládala z kotoučů, připevněných na vřetenech nad sebou tak, že plochá tyč, která procházela mezi těmito vřeteny, byla rozřezána na pásy. Salomon de Caus sestrojil v roce 1615 ručně ovládanou válcovací stolici (obr. 2.1), která sloužila k výrobě olověných plátů. V druhé polovině 17. století se objevily větší válcovací stolice pro válcování železných tyčí (za tepla) na pláty, které se řezaly na dělicích stolicích. První náčr dělicí stolice (obr. 2.2), která pracovala ve spojení s válcovací stolicí s hladkými válci, byl zveřejněn Williamem Emersonem. Na začátku 18. století navrhl Major Hanbury válcovací stolici k válcování tenkých pásů a v roce 1728 navrhl John Payne válce k výrobě kruhových tyčí. O 58 let později získal John Purnell patent na profilové válce.



Obr. 2.2 – Válcovací a dělicí stolice [16]

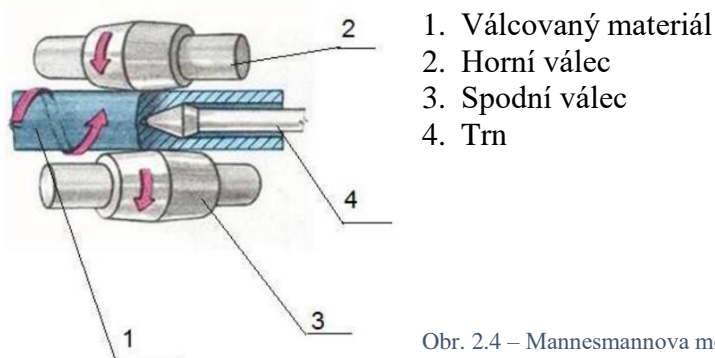
V této době se také vyvíjely různé mechanismy pohonu, a válcovací stolice tak pomalu nabývaly současné podoby, zároveň se již objevovaly první válcovací linky. V roce 1790 postavili J. Cockshutt a R. Crawshay válcovací stolici kvarto, která se však v podobě, jak známa dnes, objevila až v roce 1862. John Wilkinson, anglický technik, zrealizoval svůj nápad, a v roce 1792 sestrojil reverzní válcovací stolici, která byla poháněna parním pohonem.

Na začátku 19. století se značně vyvíjel zbrojařský a lodní průmysl. Při stavbě mohutných lodí bylo potřeba vyrábět velké hutnické výrobky, které mimo jiné zahrnovaly tlusté plechy velkých rozměrů nebo velké výkovky. Dále se začala používat válcovací stolice se třemi válci, tzv. trio. Bernard Lauth byl dalším významnou osobností, která přispěla svými nápady v oblasti válcování. V roce 1859 si nechal patentovat proces válcování za studena, následně v roce 1862 zkonstruoval tzv. Lauthovo trio (obr. 2.3). Jednalo se o válcovací stolici, kde byly použity tři válce. Do té doby se používaly pouze válcovací stolice se dvěma válci (tzv. dua).



Obr. 2.3 – Lauthovo trio [19]

V dalších letech dochází k vývoji řídicích systémů, pohonných mechanismů i samotných pohonů. Koncem 19. století zdokonalili bratři Max a Reinhard Mannesmannové válcování bezešvých trubek, zavedli použití šikmo uložených válců (obr. 2.4). Později v roce 1889 sestrojili poutnickou stolici, sloužící k výrobě tenkostěnných bezešvých trubek.^[12]



Obr. 2.4 – Mannesmannova metoda výroby bezešvých trubek [2]

První válcovna byla v českých zemích v Ondřejovicích. V roce 1821 zde firma Tlach a Keil založila válcovnu plechu. V roce 1870 byl v Chomutově postaven závod, který na tehdejší dobu představoval moderní železárnou se širokým výrobním programem. V roce 1887 byl závod zakoupen firmou Mannesmann, která provedla rekonstrukci a začala vyrábět bezešvé ocelové trubky. V roce 1890 poprvé začala výroba bezešvých trubek poutnickou metodou.^[24]

2.1 Závody spojené s válcovacími stolicemi

Mezi nejznámější hutní závody v ČR patří např. Vítkovické železárny, které svou výrobu začaly v Rudolfově huti v roce 1830. V průběhu 20. století byly ve Vítkovicích budovány válcovací tratě. V roce 1971 byla zahájena výroba na trati 3,5 Kvarto a během následujících let docházelo k modernizaci válcovny.^[15]

Známé jsou i Královodvorské železárny. Původní huť byla založena již v roce 1346 Karlem IV. V roce 1905 byla dokončena válcovna na tenké plechy a později v roce 1969 byla spuštěna výroba antikorozních ocelových pásů válcováním za studena. Dnes vystupuje jako společnost KWW, a.s., a je členem skupiny BILSTEIN GRUPPE.^[20]

Mezi podniky, které vyrábí válcovací stolice, patří:

- TS Plzeň a. s.: Společnost (dříve ŠKODA TS) byla založena v roce 1859 a dnes se řadí mezi významné strojírenské výrobce ve střední Evropě.^[13]
- ŽĎAS a.s.: Má tradici ve výrobě tvářecích strojů dlouhou více než půl století. V současné době společnost nabízí mimo jiné i zařízení, která jsou součástí válcoven nebo technologických linek.^[14]
- Mezi nejvýznamnější zahraniční výrobce válcovacích stolic patří SMS Group GmbH nebo společnost Sendzimir.^{[10][25]}



Obr. 2.5 – Válcovací stolice společnosti SMS SIEMAG [18]

2.2 Současnost

Na základě rešerše lze rozdělit válcovací stolice do dvou následujících skupin:

2.2.1 Ruční válcovací stolice

Malé válcovací stroje (obr. 2.6), obvykle s ručním pohonem nebo elektromotorem. Přes ozubená kola se pohybem kliky otáčí pracovní válce. Polohování válců je také ovládáno ručně. Rám je vyroben jako odlitek z jednoho nebo více kusů. Tyto válcovací stolice se používají zejména ve šperkařství.



Obr. 2.6 – Durston DRM C130 RE (vlevo) a Durston DRM C130 SSP (vpravo) [8][9]

PARAMETRY	DRM C130 RE	DRM C130 SSP
Průměr válců [mm]	60	65
Válcovací oblast [mm]	130	130
Max. tloušťka mat. [mm]	6	6
Váha [kg]	45,3	130
Rozměry [mm]	410 x 220 x 365	500 x 390 x 540
Motor	Není	1,1 kW

Tab. 2.1 – Technické parametry válcovacích stolic [8][9]

2.2.2 Hutní válcovací stolice

Velké válcovací stroje určené k válcování velkých polotovarů. Rám se skládá z několika částí, které mohou být jako jeden odlitek nebo se svařují a spojují šrouby. Rám může vážit až několik desítek tun. Používají se v hutních závodech, kde slouží k výrobě plechů, trubek, kolejnic, apod.

Technické parametry reverzní válcovací stolice kvarto firmy SMS Schloemann-Siemag:

Pracovní válce	Průměr [mm]	1220 / 1100
	Délka [mm]	2060
Opěrné válce	Průměr [mm]	1600 / 1440
	Délka [mm]	2060
Válcovací síla [MN]		42
Výkon pohonu [kW]		2 x 5500
Otáčky [min^{-1}]		0 – 40/90
Rychlost válcování [m/s]		max. 5,75
Válcovací program		
Materiál na vstupu (bramy)	tloušťka až 250 mm	
	šířka od 620 až 1860 mm	
	délka 11 000 mm	
	hmotnost 28 000 kg	
Materiál na výstupu	tloušťka od 25 do 55 mm	
	šířka od 600 do 1860 mm	
Produkce		do 2,4 mil. tun za rok

Tab. 2.2 – Technické parametry [23]

Úběr materiálu na požadovaný rozměr nelze ve většině případů docílit pouze jedním párem válců, proto jsou stolice součástí válcovacích tratí a požadovaného rozměru se dosahuje postupně, za použití několika válcovacích stolic.

Tratě (pro válcování za tepla) se mimo jiné skládají z pece, tryskacích zařízení, kalibrovací stolic, kontrolního stanoviště, dělicího zařízení, válcovacích stolic, chladicího zařízení a navíječky.



Válcovací trať

Obr. 2.7 – Válcovací trať [1]

2.3 Budoucnost tvářecích strojů

Požadavky jsou příčinou kontinuálního vývoje strojů, což zasahuje i do konstrukce v oblasti tvářecích, resp. válcovacích strojů. Nejprve bylo nutno řešit technologický proces samotný, až poté se mohli konstruktéři zaměřit i na jiné stránky, jako jsou bezpečnost, ergonomie, design, atd. I pro samotné firmy je důležitý další vývoj a inovace, aby se mezi konkurencí prosadily.

Každý stroj vyžaduje nastavení a údržbu. Do budoucna je tedy možné předpokládat snadnější nastavování stroje a výměnu nástrojů (např. programem), bezdrátovou nebo automatizovanou údržbu stroje. Protože jsou válcovací stolice součástí válcovacích linek, dá se očekávat i větší automatizace celé linky a snahu o snížení vlivu lidského faktoru ve výrobě.

Technologie válcování tvoří významnou část na poli tvářecích procesů, důkazem toho může být produkce válcovaných výrobků (tab. 2.3) a její předpokládaná produkce v blízkých letech (tab. 2.4). Lze tedy očekávat, že vývoj půjde v této oblasti stále dopředu a válcovací stolice si mezi tvářecími stroji udrží své postavení.

VÝROBEK	2007	2008	2014
Surové železo	5287,2	4737,2	4152,4
Surová ocel	7058,9	6387,0	5360,0
Válcovaný materiál	6301,1	5800,7	4829,2
Ocelové trubky	777,2	718,8	606,9

Tab. 2.3 – Vývoj produkce ocelářských výrobků v tisících tun [32]

VÝROBEK	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Surové železo	4080	3920	3970	4020	4100	4150
Surová ocel	5300	5080	5140	5210	5300	5360
Válcovaný materiál	4910	5030	5130	5230	5360	5420
Ocelové trubky	620	640	660	675	695	710

Tab. 2.4 – Předpokládaná produkce ocelářských výrobků v tisících tun [32]

3 Rozdělení válcovacích stolic^{[26][38]}

3.1 Obecné rozdělení

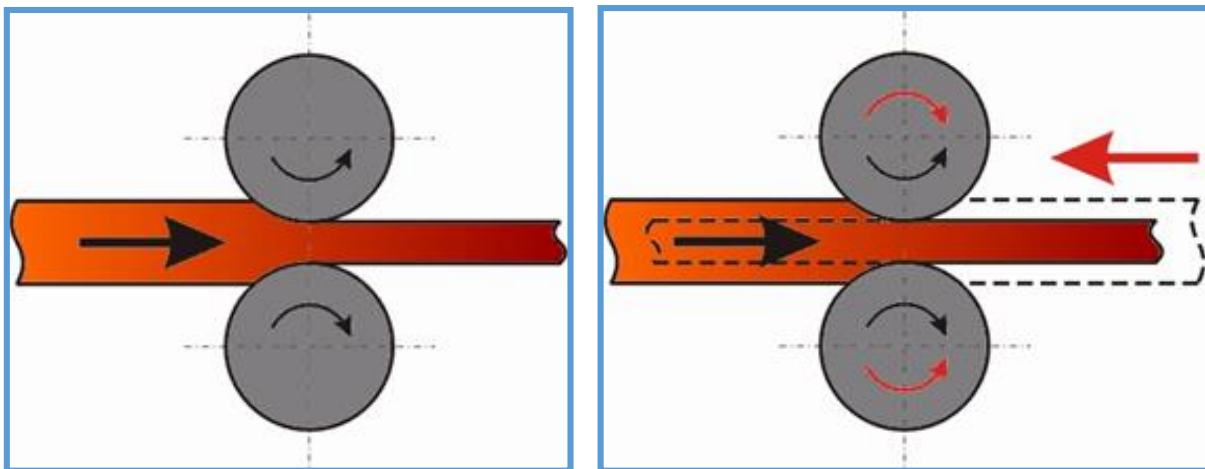
1. Buchary (šabotové, protiúderové)
2. Lisy (mechanické, hydraulické)
3. **Válcovací stolice**
4. Dělicí stroje, drtičky

Válcování lze podle technologického určení rozdělit do dvou velkých skupin, a to na hutní předvalkové a hotovostní válcování. Hutním válcováním se vyrábějí předvalky – bloky (bloom), sochory (billet) nebo bramy (slab), přičemž polotovarem jsou velké ingoty. Na předvalkových tratích se používá menší počet válcovacích stolic, než na tratích hotovostních. Důvodem jsou větší deformace (úběry) a také možnost provádět válcování na jedné stolici vícekrát.

Hotovostním válcováním se vyrábějí hotové výrobky (tyče, plechy, trubky) a polotovarem jsou právě produkty předvalkového válcování. Na této trati je několik stolic, které vykonávají menší úběry, aby se zajistila požadovaná jakost povrchu výrobku.

3.2 Rozdělení válcovacích stolic

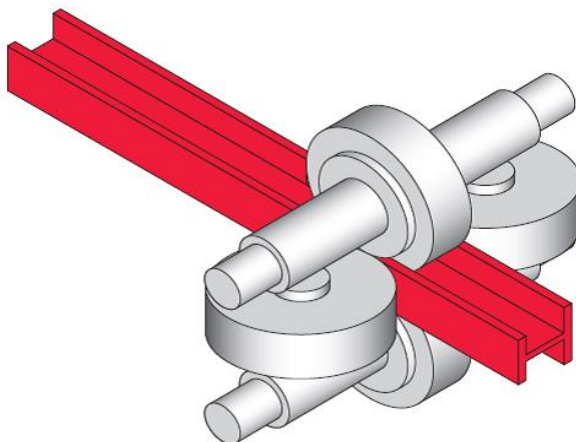
- **Dle smyslu otáčení**
 - I. Průběžné (jednosměrné) – válce se otáčejí pouze jedním směrem
 - II. Vratné (reverzní) – válce mohou měnit směr otáčení



Obr. 3.1 – Průběžné (vlevo) a vratné (vpravo) válcovací stolice [26]

- **Dle konstrukčního uspořádání**
 - I. Vertikální – osy válců jsou vertikální (svislé)
 - II. Horizontální – osy válců jsou horizontální (vodorovné)

- III. Univerzální – kombinace dvou předchozích způsobů. Všechny válce je možné nastavovat.



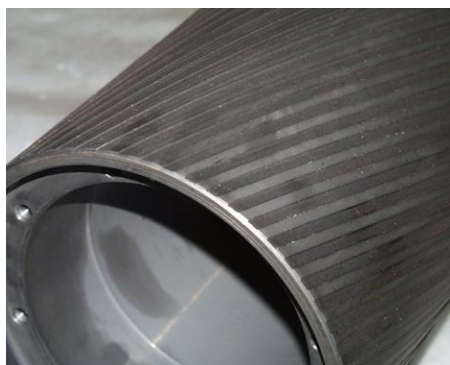
Obr. 3.2 – Univerzální duo [30]

- **Dle druhu rámu**
 - I. Uzavřený – rám se skládá z jednoho kusu materiálu
 - II. Otevřený – rám je složen z několika částí, které jsou spojeny
- **Dle druhu válců**
 - I. Hladké – slouží pro válcování plechů



Obr. 3.3 – Hladké válce [17]

- II. Rýhované – slouží zpravidla pro výrobu předvalků



Obr. 3.4 – Rýhovaný válec [34]

III. Kalibrované – požívají se při válcování profilového materiálu

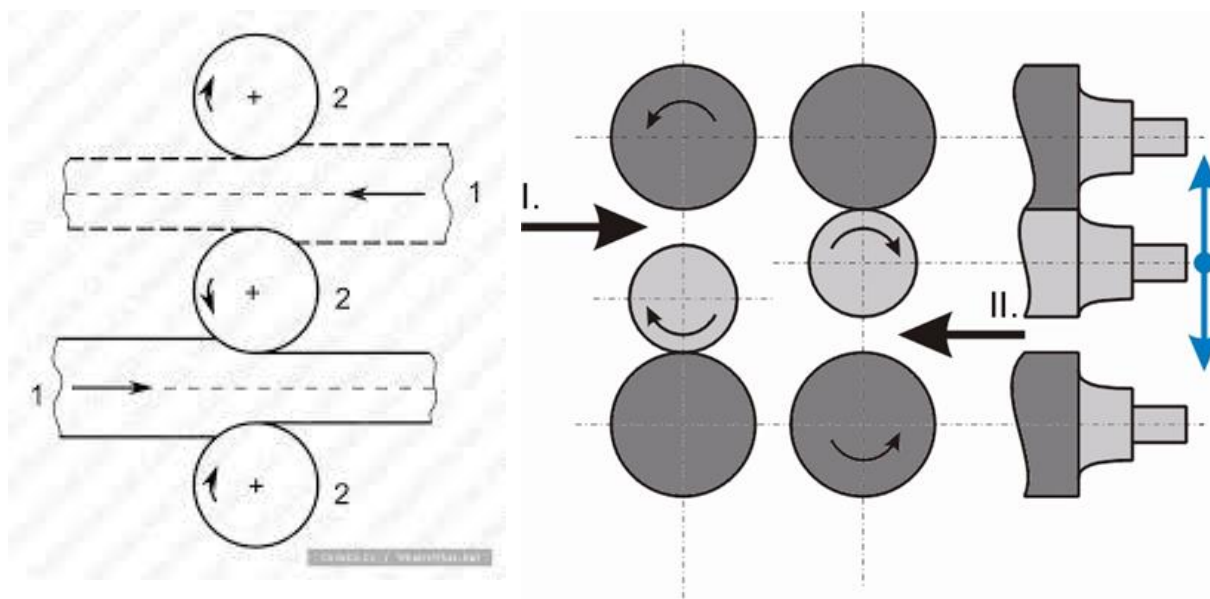


Obr. 3.5 – Kalibrované válce [29]

• Dle počtu válců

I. Pouze pracovní válce

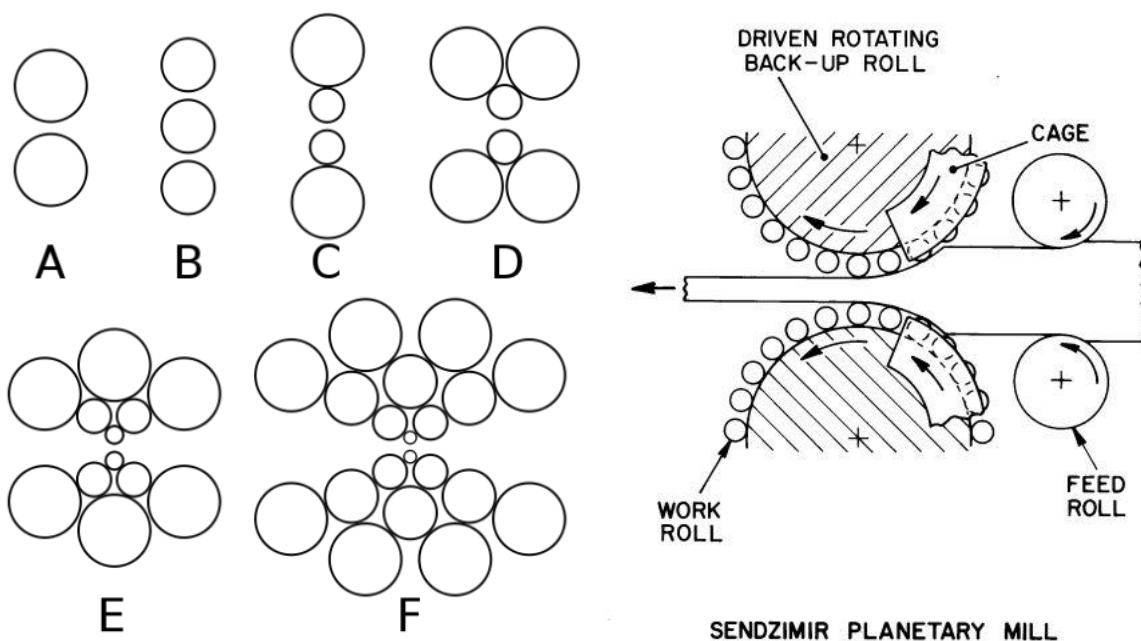
1. Duo – k válcování jsou použity pouze dva pracovní válce (viz. obr. 3.1)
2. Dvojitě duo – stolice má čtyři válce umístěné ve dvou párech, které se otáčejí v opačném směru.
3. Trio – v prvním směru se materiál válcuje mezi horním a prostředním válcem, v tom druhém prochází mezi prostředním a dolním válcem. Prostřední válec bývá uložen pevně, ostatní jsou nastavitelné.
4. Lauthovo trio – horní a spodní válce jsou poháněny a prostřední válec je vlečen a otáčí se pouze vlivem tření. Při každém průchodu materiálu se opírá o materiál a vnější válec.
5. Univerzální stolice – Jsou zde použity horizontální, vertikální nebo šikmé válce.



Obr. 3.6 – Trio (vlevo) a Lauthovo trio (vpravo) [26][33]

II. Pracovní i opěrné válce

1. Kvarto (C) – Používají se 4 válce, dva prostřední jsou pracovní a vnější válce jsou opěrné. Opěrné válce mají větší průměr než válce pracovní.
2. Sexto (D) – Za účelem zvýšení tuhosti se zde používá více opěrných válců.
3. Decento
4. Dvanáctiválců (E)
5. Dvacetiválců (F)
6. Planetová válcovací stolice



Obr. 3.7 – Různá provedení válcovacích stolic (vlevo) / Planetová stolice (vpravo) [3][36]

4 Požadavky na válcovací stolice^[38]

Aby byl stroj konkurenceschopný a zároveň v jisté míře dostupný, musí mít požadované vlastnosti. Ideální stroj vykazuje dokonalé řešení z jakéhokoliv hlediska. V reálném světě se tomuto stroji snaží co nejvíce přiblížit, proto při konstrukci a výrobě zohledňují konstruktéři tyto důležité aspekty:

I. Ergonomické hledisko

II. Estetické hledisko

III. Ekologické hledisko

IV. Ekonomické hledisko

V. Výkonnost

U válcovacích stolic se výkonnost měří hmotností vyválcovaného materiálu za jednotku času při dané redukci. Výkonnost lze zvýšit tím, že se dokonale využije čas pracovního cyklu. U válcovacích stolic toho lze docílit zvýšením rychlosti válcování, snížením času na manipulaci s materiálem, zavedením kontinuálních výrobních metod nebo zdokonalením válcovací tratě.

VI. Přesnost výroby

Přesnou výrobu lze hodnotit podle odchylky rozměrů výrobku od požadovaného modelu. Cílem je zlepšit schopnost stroje přesně vyrábět a minimalizovat dokončovací operace. Přesnost výrobku lze ovlivnit geometrickou přesností činných ploch nástroje (válců), výchozími vlastnostmi polotovaru (operace před samotným válcováním), **tuhostí** a nastavením stroje (citlivost nastavení, vůle) a vliv má i tepelná dilatace stroje.

VII. Spolehlivost a trvanlivost

Spolehlivost je vlastnost stroje (nebo jeho prvků), která závisí na bezporuchovosti, životnosti a údržbě. Spolehlivost lze zhodnotit podle doby bezporuchového chodu nebo podle samotných poruch.

VIII. Bezpečnost

Na každém tvářecím stroji musí být předepsaná ochranná zařízení, aby se zajistila bezpečnost provozu a obsluhy. U válcovacích stolic je nutné zamezit kontaktu rotujících částí s člověkem.

IX. Tuhost a stabilita

Jak již bylo zmíněno, tuhost má značný vliv na přesnost výroby. Zároveň je důležitým kritériem pro návrh tvaru a rozměrů stroje a silové působení v pracovním prostoru stroje.

5 Technologie válcování^{[35][38]}

Válcování je tvářecí proces, při němž dochází ke změně tvaru materiálu vlivem působení dvojice válců, které jsou s ním přímo ve styku. Materiál je vtažen mezi válce, načež se při průchodu mezi nimi plynule zmenšuje jeho výška.

5.1 Základní pojmy

Tváření za studena – tváření, které probíhá pod rekrystalizační teplotou (což je přibližně 30% teploty tavení) zpracovávaného materiálu. Tímto tvářením se materiál zpevňuje a zároveň u něj klesá tažnost. Výhodou je vysoká přesnost tváření, kvalita povrchu a zlepšování mechanických vlastností. Nevýhodou je nutnost použít velké tvářecí síly.

Tváření za tepla – tváření, které probíhá nad rekrystalizační teplotou zpracovávaného materiálu, tudíž dochází k jeho rekrystalizaci. Výhodou této metody je, že stačí použít až několikanásobně menších sil, než tomu je u tváření za studena. Nevýhodou může být nekvalitní povrch nebo nutnost ohřevu materiálu.

5.1.1 Válcovaný materiál

Nejvíce výrobků nebo polotovarů, které se zpracovávají válcováním, je z oceli. Válcovat lze i neželezné kovy, např. hliník, měď, titan nebo různé slitiny niklu. Výrobky z nízkouhlíkové oceli se vyrábějí kombinací válcování za tepla i za studena, přičemž nejdůležitější vlastností je tvárnost za studena. Výrobky nízkolegovaných ocelí s vysokou pevností jsou naopak vyráběny za účelem vysoké pevnosti a menší tvárnosti za studena. Plechy z hliníkových slitin se obvykle válcují za tepla z bram.[40]

Vhodnost materiálu k válcování určují mimo jiné i následující pojmy:

- Plasticita – vlastnost materiálu, která se projevuje schopností stálé deformace bez poruchy celistvosti.
- Přetvárná pevnost – teoretická hodnota totožná s mezí kluzu materiálu. Po překročení této hodnoty dochází ke tváření. Pro každý materiál je různá a mění s teplotou.
- Přetvárný odpor – „*odpor, který klade materiál při tváření. Je větší než přetvárná pevnost a to hlavně o odpory vzniklé třením materiálu o povrch nástroje a o odpory, které vznikají při vyšších rychlostech tváření*“. [38] str. 7. Mění se s teplotou, rychlostí tváření nebo stupni deformace.

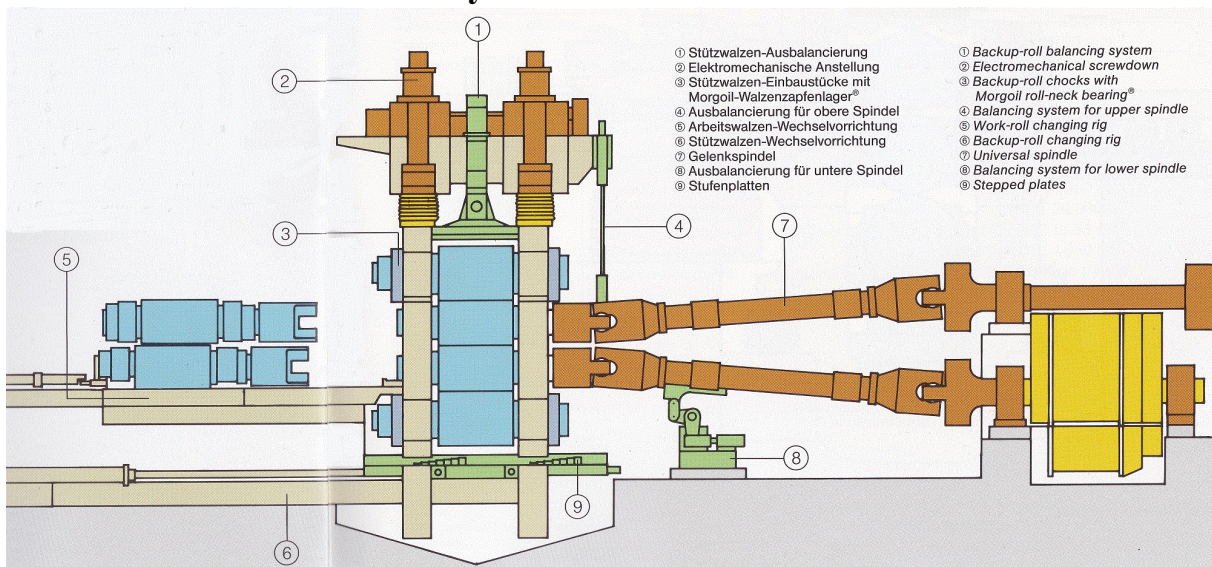
5.1.2 Zákony tváření

Při tváření, tudíž i při válcování platí zákony tváření:

1. zákon trvalé deformace: „*Při tváření probíhá deformace materiálu tak, že se jeho částice pohybují směrem nejmenšího odporu*“. [35] str. 17

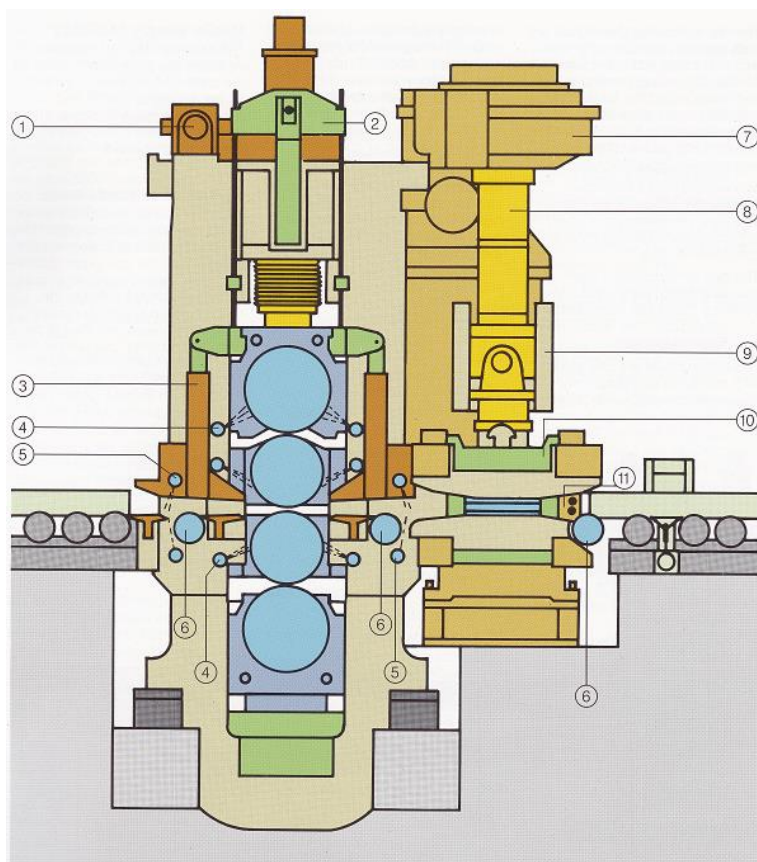
2. zákon trvalé deformace: „*Objem plastického tělesa před deformací tvářením se rovná jeho objemu po provedené deformaci*“. [35] str. 21

5.2 Základní konstrukční uzly válcovací stolice kvarto



Obr. 5.1 – Válcovací stolici kvarto [23]

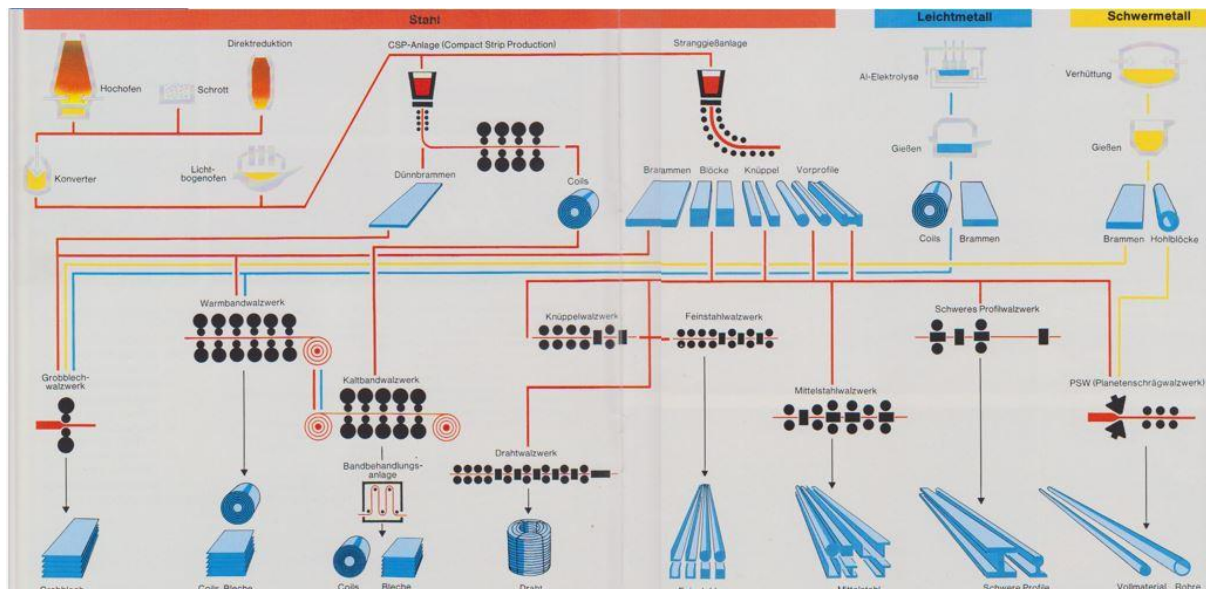
- | | |
|---|--|
| 1. Vyvažovací systém opěrných válců | 6. Zařízení pro výměnu opěrných válců |
| 2. Elektromechanické stavění | 7. Univerzální kloubový hřídel |
| 3. Ložiskové těleso | 8. Vyvažovací systém pro spodní hřídel |
| 4. Vyvažovací zařízení pro horní hřídel | 9. Stupňovité desky |
| 5. Zařízení pro výměnu pracovních válců | |



Obr. 5.2 – Řez válcovací stolici kvarto [23]

5.3 Využití válcovacích stolic^{[28][38]}

Válcování je poměrně jednoduchá, rychlá, levná a vysoce výkonná technologie. Z tohoto důvodu se využívá při výrobě mnoha druhů výrobků. Některé z nich (obr. 5.3) jsou uvedeny níže. Válcovací stolice kvarto se používá pro výrobu plochého materiálu, svitků nebo širokých plechů, které jsou válcovány za tepla nebo za studena.[40]



Obr. 5.3 – Sortiment výrobků [4]

- **Plech**

Nerezové plechy se válcují za tepla nebo za studena a dodávají se v normalizovaných velikostech. Dále se vyrábějí plechy pozinkované, se vzory (lístkové, žebrované), ořezvzdorné, tvarové a jiné.

	ROZMĚR	MIN. [mm]	MAX. [mm]
ZA STUDENA	Tloušťka	0,5	6
	Šířka	1000	1500
	Délka	2000	3000
ZA TEPLA	Tloušťka	2	120
	Šířka	1000	3000
	Délka	2000	6000

Tab. 5.1 – Rozměry vyráběných ocelových plechů [28]

- **Tyče**

Tyče se válcují za tepla a mohou mít různé průřezy (čtvercové, kruhové, ploché, HEA, HEB, IPE, U, UPE, apod.).

- **Trubky a profily (jekly)**

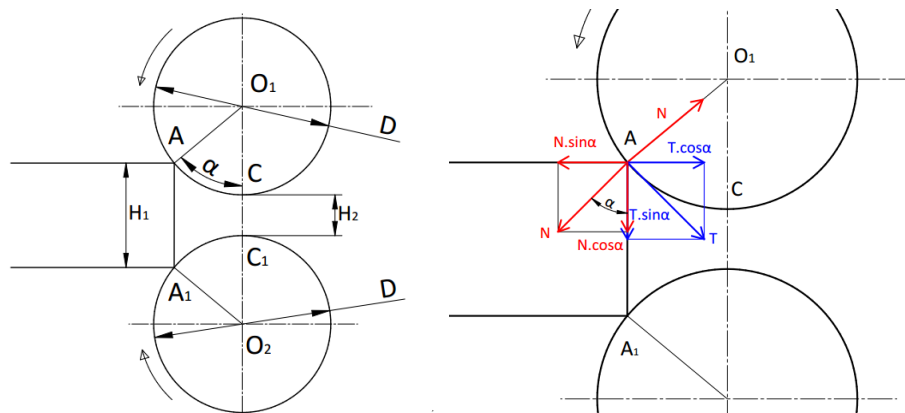
Bezešvé trubky se obvykle prodávají s vnějším průměrem cca 20 mm až 370 mm. Profily mohou být otevřené (C, L, U) nebo uzavřené (čtvercové, obdélníkové, speciální).[28]

- **Kolejnice**

- **Dráty**

5.4 Základní vztahy^[35]

5.4.1 Podmínka pro vtažení provalku mezi válců



Obr. 5.4 – Schéma válcování

Na obr. 5.4 je zobrazeno schéma válcovacího procesu v době, kdy je polotovar těsně před vtažením mezi válce. Z tohoto schéma lze vyčíst následující údaje:

D ... průměr válce [m]

H_1 ... neredukovaná výška materiálu [m]

H_2 ... výška materiálu po deformaci (mezera mezi válci) [m]

α ... úhel záběru (mezi body AO_1C) [°]

Úhel záběru závisí na průměru, neredukované výšce a výšce materiálu po deformaci. Pokud jsou průměry válců stejné, jsou shodné i úhly záběru ($AO_1C = AO_2C_1$). Z obrázku lze odvodit následující vztah:

$$D = \frac{H_1 - H_2}{1 - \cos \alpha} \quad (5.1)$$

Při doteku materiálu a válců nastane ráz v bodech A a A_1 , v nichž je také působiště normálové síly N (kolmé k povrchu válce). Dle zákona akce a reakce bude síla o stejné velikosti a opačném směru působit i na materiál. Sílu lze rozložit na vodorovnou složku ($N * \sin \alpha$), která působí na materiál proti jeho pohybu a svislou složku ($N * \cos \alpha$), která se snaží materiál stlačovat. V bodech A a A_1 zároveň dochází ke tření, proto zde vzniká třecí síla T , kterou lze opět rozložit na vodorovnou a svislou složku. Vodorovná složka třecí síly působí po směru pohybu materiálu, a tedy proti složce $N * \sin \alpha$. Nyní mohou nastat tři možnosti:

1. Materiál je odstrčen od válců: $N * \sin \alpha > T * \cos \alpha$
2. Materiál může být odstrčen i nemusí: $N * \sin \alpha = T * \cos \alpha$ (záleží na okolnostech)
3. Materiál je vtažen mezi válce: $N * \sin \alpha < T * \cos \alpha$

Pro vtažení materiálu mezi válce tedy platí:

$$N * \sin \alpha < T * \cos \alpha$$

$$\operatorname{tg} \alpha < \frac{T}{N}$$

Protože platí:

$$T = N * f \text{ [N]}$$

lze psát:

$$\mathbf{tg \alpha < f} \quad (5.2)$$

kde

f ... součinitel tření ($f = \text{tg } \varphi$) [-]

Z posledního vztahu je patrné, že materiál je vtažen mezi válce tehdy, když je součinitel tření mezi válcem a materiálem větší, než tangenta úhlu záběru. To znamená, že na vtažení materiálu má přímý vliv pouze úhel záběru, který dle vztahu (5.1) závisí na úběru a průměru válce. Na součinitel tření má vliv materiál válců, jeho drsnost, teplota tvářeného materiálu a obvodová rychlost válců.

5.4.2 Rychlost provalku

Ze zákona zachování objemu materiálu se musí objem na vstupu rovnat objemu na výstupu, matematicky to lze následovně popsat:

$$S_1 * v_1 = S_2 * v_2 \quad (5.3)$$

kde

S_1 ... průřez provalku na vstupu [mm^2]

S_2 ... průřez provalku na výstupu [mm^2]

v_1 ... vstupní rychlost provalku [ms^{-1}]

v_2 ... výstupní rychlost provalku [ms^{-1}]

Z tohoto vztahu vyplývá, že pokud se **průřez** provalku **zmenší**, musí se jeho **rychlost zvětšit**. Vzhledem k obvodové rychlosti (v) platí:

$$v_1 < v < v_2$$

5.4.3 Úběr a styčná plocha

Absolutní úběr je rozdíl mezi výškou provalku na vstupu a výstupu:

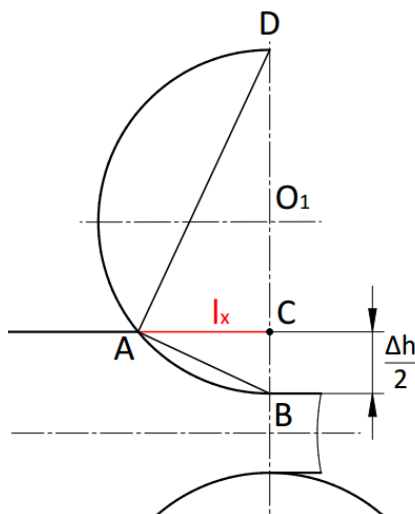
$$H_1 - H_2 = \Delta h \text{ [mm]}$$

Pro zjištění tzv. hloubky proválcování se používá poměrný úběr:

$$\text{poměrný úběr} = \frac{\Delta h}{H_1} * 100 \text{ [%]}$$

Pokud se bude uvažovat i šíření materiálu (zvětšování šířky), vznikne poměrný plošný úběr:

$$\text{poměrný plošný úběr} = \frac{S_1 - S_2}{S_2} * 100 \text{ [%]}$$



Obr. 5.5 – Styčná plocha

Styčná plocha je plocha, kde se provalek dotýká válce – na obr. 5.5 je to oblouk mezi body A a B. Tato plocha se využívá k výpočtu válcovacího tlaku. Z obr. 5.5 lze zjistit, že vzdálenost B-C je rovna polovině absolutního úběru a vzdálenost B-D je rovna dvojnásobku poloměru pracovního válce.

Šířka styčné plochy:

$$B_S = \frac{B_1 + B_2}{2} \quad [\text{m}] \quad (5.4)$$

kde

B_1 ... šířka provalku před válcováním [m]

B_2 ... šířka provalku po válcování [m]

Délka styčné plochy (oblouk A-B):

$$l_S = R * \alpha \quad [\text{m}]$$

Z podobnosti trojúhelníků ABC a DBA lze vodorovný průmět délky vyjádřit jako:

$$l_x = \sqrt{R * \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \quad [\text{m}] \quad (5.5)$$

Styčná plocha je tedy:

$$S_S = B_S * l_x \quad [\text{m}^2]$$

5.4.4 Válcovací síla

Válcovací síla závisí na středním měrném tlaku a styčné ploše:

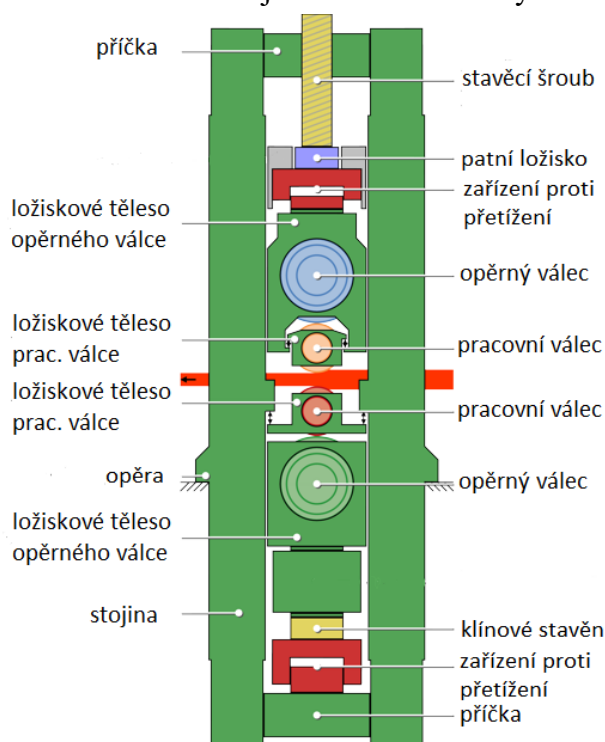
$$F_V = p * S_S \quad [\text{N}] \quad (5.6)$$

kde p ... střední měrný tlak [Pa]

Z předchozího vztahu vyplývá, že při stejném měrném tlaku je na menší styčnou plochu potřeba menší válcovací síla. To znamená, že u menšího válce je za potřebí menší síly, než u válce většího pro dosažení stejného tlaku. Nevýhodou menších válců je ovšem jejich nízká tuhost, proto se k nim přidávají **válce opěrné**. Pro výpočet středního měrného tlaku se běžně používá výpočet podle Ekelunda.

6 Výpočet válcovací stolice kvarto

Tato část se zaměřuje na částečnou modernizaci válcovací stolice kvarto s označením $\varnothing 420/\varnothing 1050 \times 1200$. Na válcovací stolici kvarto se provede výpočet rámu a válce. Rám se zkontroluje z hlediska napětí a deformace. Použité pracovní válce budou nahrazeny válci s větším průměrem a opěrný válec bude zkontrolován z hlediska deformace. Dále se provede kontrolní výpočet stavěcího šroubu a stávající ložiska budou vyměněna za moderní.



Obr. 6.1 – Schéma válcovací stolice kvarto [22]

6.1 Výpočet rámu^{[26][27][39]}

Pro výpočet jsou zadány rozměry rámu (obr. 6.3), materiál (tab. 6.1) a zatížení:

Válcovací síla ... $F_v = 14 \text{ MN}$

Materiál	Norma	Mez kluzu R_e [MPa]	Modul pružnosti v tahu E [MPa]	Modul pružnosti ve smyku G [MPa]
Ocel na odlitky	ČSN 42 2641	230	$2,1 \cdot 10^5$	$0,8 \cdot 10^5$

Tab. 6.1 – Materiálové charakteristiky

Maximální dovolené napětí je $\sigma_D = 80 \text{ MPa}$ (bezpečnost cca 2,8). Materiál je zadán na základě používaných materiálů ve společnosti TS Plzeň a.s.

6.1.1 Průřezové charakteristiky a střední čára profilu

STOJINA	PŘÍČKA
Plocha průřezu	
$S_S = 324\,900\text{ mm}^2$	$S_P = 538\,650\text{ mm}^2$
Kvadratický moment průřezu	
$J_S = 8,796 \cdot 10^9\text{ mm}^4$	$J_P = 4,009 \cdot 10^{10}\text{ mm}^4$
Modul průřezu v ohybu	
$W_{OS} = 3,086 \cdot 10^7\text{ mm}^3$	$W_{OP} = 8,484 \cdot 10^7\text{ mm}^3$
Délka střední čáry profilu	
$l_S = 4920\text{ mm}$	$l_P = 1800\text{ mm}$

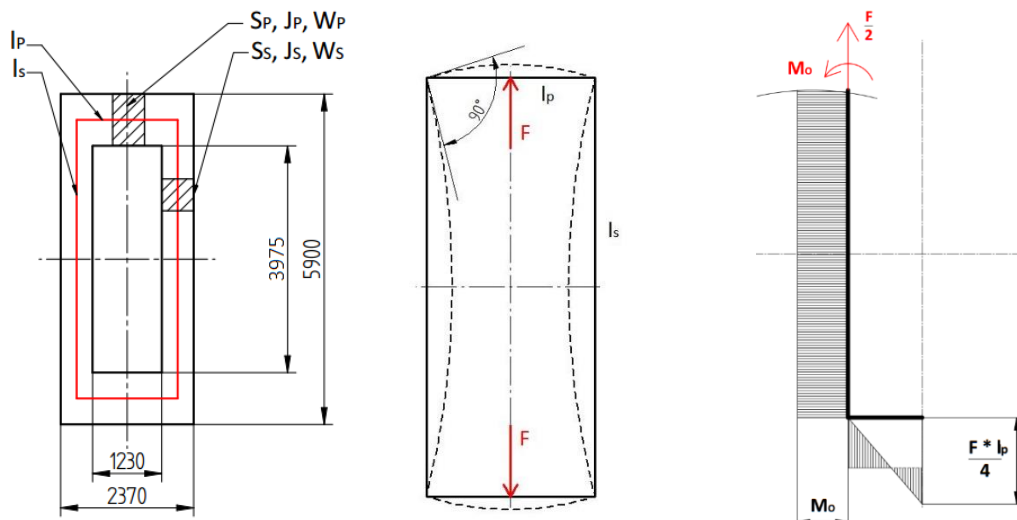
Tab. 6.2 – Průřezové charakteristiky

Střední čára profilu (obr. 6.2 vlevo) je čára, která vznikla spojením bodů těžišť všech míst průřezu stojiny a příčky.

6.1.2 Výpočtový model

Při výpočtu se předpokládá, že se úhel mezi střední čarou profilu příčky (l_P) a stojiny (l_S) nemění. To znamená, že úhel natočení stojiny a příčky je v rohu stejný:

$$\varphi_S = \varphi_P \quad (6.1)$$



Obr. 6.2 – Rozměry rámu (vlevo), předpokládaný průhyb (uprostřed) a průběh ohybového momentu (vpravo)

Pro zjištění vnitřních silových účinků se vede rámem myšlený řez, který jej rozdělí na dvě části. Aby byla oddělená část v rovnováze, připojí se do řezu posouvající síla a vnitřní ohybový moment. Protože je součást symetrická co do tvaru i zatížení, lze řešit pouze její část (viz. obr. 6.2 vpravo). Vnitřní ohybový moment je možno vypočítat metodou momentových ploch, přičemž se využije deformační podmínky (6.1). Pro další výpočet byly použity odvozené vztahy.

6.1.3 Výpočet momentu, napětí a deformace

Posouvající síla:

$$T = \frac{F}{2} \text{ [N]} \quad (6.2)$$

kde

F ... polovina válcovací síly [N]

- Vnitřní ohybový moment:

$$M_O = \frac{F * l_P}{8 * \left(\frac{J_P}{J_S} * \frac{l_S}{l_P} + 1 \right)} \text{ [Nm]} \quad (6.3)$$

$$M_O = \frac{7 * 10^6 * 1800}{8 * \left(\frac{4,009 * 10^{10}}{8,796 * 10^9} * \frac{4920}{1800} + 1 \right)}$$

$$M_O = 1,170 * 10^5 \text{ Nm}$$

- Maximální napětí ve stojně:

$$\sigma_{S\text{MAX}} = \frac{F}{2S_S} + \frac{M_O}{W_{OS}} \text{ [Pa]} \quad (6.4)$$

$$\sigma_{S\text{MAX}} = \frac{7 * 10^6}{324900} + \frac{1,170 * 10^8}{3,086 * 10^7}$$

$$\sigma_{S\text{MAX}} = 14,56 \text{ MPa}$$

- Maximální napětí v příčce:

$$\sigma_{P\text{MAX}} = \frac{\frac{F * l_P}{4} - M_O}{W_{OP}} \text{ [Pa]} \quad (6.5)$$

$$\sigma_{P\text{MAX}} = \frac{\frac{7 * 10^6 * 1800}{4} - 1,170 * 10^8}{8,484 * 10^7}$$

$$\sigma_{P\text{MAX}} = 35,75 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{S\text{MAX}}, \sigma_{P\text{MAX}} < \sigma_D = 80 \text{ MPa}$$

- Stupeň využití materiálu:

$$V_s = \frac{\sigma_{S\text{MAX}}}{\sigma_D} * 100 \text{ [%]}$$

$$V_s = \frac{14,5}{80} * 100$$

$$V_s = 18,2 \text{ %}$$

$$V_p = \frac{\sigma_{P\text{MAX}}}{\sigma_D} * 100 \text{ [%]}$$

$$V_p = \frac{35,8}{80} * 100$$

$$V_p = 44,7 \%$$

6.1.4 Kontrola místa s otvorem pro šroub:

Ve výpočtovém modelu se uvažuje, že průřez stojiny a příčky je v každém místě stejný. Ve skutečnosti tomu tak není, a proto je nutno kritická místa zkontrolovat zvlášť. V tomto případě se jedná o místo s otvorem pro stavěcí šroub. Místo je kontrolováno z hlediska napětí, tudíž se využije vztahu (6.5):

$$\sigma_{\text{šo}} = \frac{F * l_p - M_o}{W_M} \text{ [Pa]}$$

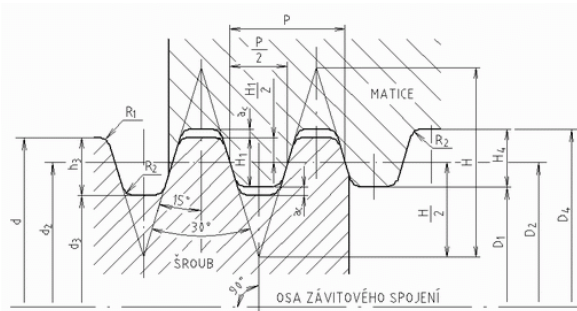
kde W_M [mm³]... modul průřezu v ohybu v místě s otvorem pro matici

$$\sigma_{\text{šo}} = \frac{7 * 10^6 * 1800}{4} - 1,170 * 10^8$$

$$\sigma_{\text{šo}} = 169,88 \text{ MPa}$$

Z tohoto výsledku je patrné, že je místo konstruováno s koeficientem bezpečnosti cca 1,35. Pro dosažení koeficientu bezpečnosti 2 by bylo nutné příčku zvýšit o 125 mm. Pro dosažení nižšího napětí, než je dovolená hodnota, by bylo nutné zvýšit příčku o 300 mm (pak je napětí 74,3 MPa).

6.1.5 Kontrola stavěcího šroubu:



Obr. 6.3 – Základní rozměry závitu [37]

Závit	Lichoběžníkový rovnoramenný
Označení	Tr 400x12
* $d_2 = D_2$	394 mm
* d_1	387 mm
* D_1	388 mm
* D	401 mm
S	117 628 mm ²
L_M	945 mm
Materiál	Šroub: 15 241 Matice 42 3145

Tab. 6.3 – Parametry šroubu a matice *[21]

- Kontrola tlaku v závitu

$$p_z = \frac{F}{S_z} \text{ [Pa]}$$

$$S_Z = \frac{\pi * (D^2 - d_1^2)}{4} * \left(\frac{L_M}{p_h}\right) [\text{m}^2]$$

kde

p_Z ... tlak v závitu [Pa]

F ... zatěžující síla [N]

S_Z ... výpočtová plocha závitu [m^2]

H_1 ... polovina rozdílu velkého průměru šroubu a malého průměru matice [m]

L_M ... výška matice [m]

P_h ... stoupání [m]

$$S_Z = \frac{\pi * (401^2 - 387^2)}{4} * \left(\frac{945}{12}\right)$$

$$S_Z = 682\,330 \text{ mm}^2$$

$$p_Z = \frac{7 * 10^6}{682330}$$

$$p_Z = 10,26 \text{ MPa}$$

$$p_Z < p_D = 30 \text{ MPa}$$

- Kontrola napětí

$$\sigma = \frac{F}{S} [\text{Pa}]$$

$$\tau = \frac{M}{W_k} [\text{Pa}]$$

$$M = F \left(\frac{d_2}{2} * \tan(\alpha + \varphi) + \frac{D_S}{3} * f \right) [\text{Nm}]$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + 4 * \tau^2} [\text{Pa}]$$

kde

σ ... normálové napětí [Pa]

S ... plocha průřezu závitu na průměru d_1 [m^2]

τ ... tečné napětí [Pa]

M ... kroutící moment [Nm]

α ... úhel stoupání šroubovice [$^\circ$]

φ ... třecí úhel [$^\circ$] ($\tan \varphi = f$)

D_S ... střední průměr patního ložiska [mm]

f ... součinitel tření (mazáno tlakovým olejem = 0,05)

σ_{red} ... redukované napětí [Pa]

Po dosazení:

$$\sigma = \frac{7 * 10^6}{117628}$$

$$\sigma = 59,5 \text{ MPa}$$

$$M = 7 * 10^6 \left(\frac{0,394}{2} * \tan(0,56 + 2,8) + \frac{0,310}{3} * 0,05 \right)$$

$$M = 117\,128 \text{ Nm}$$

$$\tau = \frac{117128}{0,0114}$$

$$\tau = 10,3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{59,5^2 + 4 * 10,3^2}$$

$$\sigma_{red} = 63 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{red} < \sigma_D = 120 \text{ MPa}$$

6.1.6 Maximální deformace rámu ve svislém směru:

- Natažení stojiny:

$$y_s = \frac{F * l_s}{2 * E * S_s} \text{ [mm]} \quad (6.6)$$

$$y_s = \frac{7 * 10^6 * 4920}{2 * 2,1 * 10^5 * 324900}$$

$$y_s = 0,252 \text{ mm}$$

- Deformace příčky od ohybového momentu:

$$y_{PM} = \frac{l_p^2}{8 * E * J_p} * \left(\frac{F * l_p}{6} - M_0 \right) \text{ [mm]} \quad (6.7)$$

$$y_{PM} = \frac{1800^2}{8 * 2,1 * 10^5 * 4,009 * 10^{10}} * \left(\frac{7 * 10^6 * 1800}{6} - 1,17 * 10^8 \right)$$

$$y_{PM} = 0,095 \text{ mm}$$

- Deformace příčky od posouvající síly:

$$y_{PF} = \frac{F * l_p * \beta}{4 * G * S_p} \text{ [mm]} \quad (6.8)$$

$$y_{PF} = \frac{7 * 10^6 * 1800 * 1,2}{4 * 0,82 * 10^5 * 538650}$$

$$y_{PF} = 0,086 \text{ mm}$$

kde

β ... průřezový součinitel (pro obdélníkový průřez $\beta \cong 1,2$) [-]

- Celková deformace je rovna součtu dílčích deformací:

$$y_C = y_S + 2 * (y_{PM} + y_{PF})$$

$$y_C = 0,252 + 2 * (0,095 + 0,086)$$

$$y_C = 0,614 \text{ mm}$$

6.1.7 Zhodnocení

Maximální napětí v příčce i ve stojně je menší než dovolené napětí, tudíž v tomto ohledu rám vyhovuje. Celková deformace (ve svislém směru) by měla být méně než 3 mm, to znamená, že rám z pohledu deformační podmínky vyhovuje.

Stupeň využití materiálu stojiny je přibližně 18%, u příčky 45%. Vždy je snaha mít tento ukazatel nejlépe nad 50%, což nebylo v tomto případě splněno. Stupeň využití materiálu lze zvýšit změnou průřezu, což má však velký vliv na samotnou tuhost rámu (která je pro proces válcování velice důležitá – viz. kap. 4 *Požadavky na válcovací stolice*). S ohledem na tuhost byl změněn průřez na dutý, jehož rozměry pro stojinu jsou v porovnávací tab. 6.4. Použitím tohoto průřezu se **sníží hmotnost rámu přibližně o 30%** a zároveň dojde ke snížení napětí v místě s otvorem pro matici stavěcí šroubu (viz. kap. 6.1.4) o více jak 70 MPa.

PRŮŘEZ	V _S / V _P [%]	y _C [mm]	TUHOST [N/mm]	HMOTNOST [kg]
4HR 570 (původní)	18 / 45	0,614	1,1 * 10 ⁷	40 602
TR 4HR 670x100	23 / 52	0,871	0,8 * 10 ⁷	27 872

Tab. 6.4 – Porovnání průřezů

6.2 Výpočet opěrného válce^{[26][38]}

Na válec jsou kladeny požadavky hlavně z pohledu tuhosti, která přímo souvisí s přesností provalku. Z tohoto důvodu je válec kontrolován zejména na deformaci. Opěrné válce musí být natolik tuhé, aby dokázaly podepřít pracovní válce. Průhybu pracovního válce lze zamezit bombírováním, přebroušením válce podle vypočtené průhybové čáry. S tím souvisí i poloha ložiskových těles, které musí umožnit bezchybný provoz při přebroušení o 10%.

Výpočet je prováděn na opěrném válci o největším průměru 1050 mm. K výpočtu je zadáno:

- Válcovací síla ... $F_V = 14 \text{ MN}$
- Rozměry válce (obr. 6.4)
- Materiál (tab. 6.5)

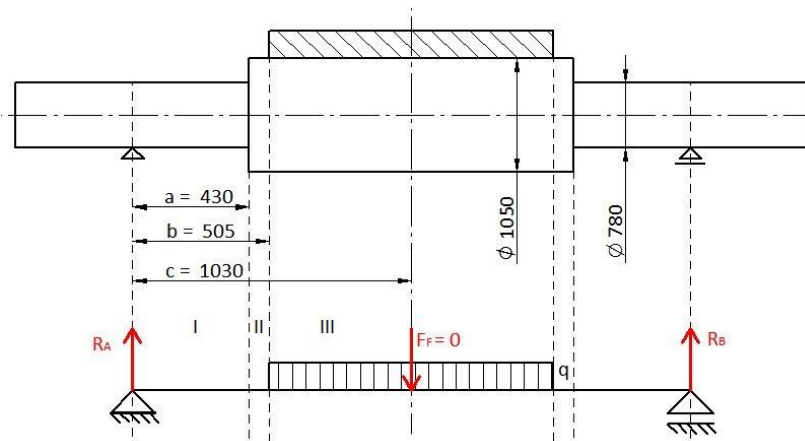
Materiál	Mez kluzu R _e [MPa]	Modul pružnosti v tahu E [MPa]	Modul pružnosti ve smyku G [MPa]
Ocel	230	2,1*10 ⁵	0,8*10 ⁵

Tab. 6.5 – Materiálové charakteristiky

6.2.1 Výpočtový model

Úloha je řešena jako nosník na dvou podporách, který je zatížen konstantním spojitým zatížením. Dále se zanedbávají pasivní odpory v ložiskách válce. Vzhledem k přísným požadavkům na tuhost válce se počítá především deformace, kterou lze zjistit např. za pomoci Castigliánovou metody.

Dle výpočtového modelu (obr. 6.4) je zřejmé, že kritické místo se nachází uprostřed válce, kde je ohybový moment maximální. Aby bylo možné počítat Castigliánovou metodou, musí v místě působit osamocená síla, a proto je zde zavedena fiktivní síla F_F .



Obr. 6.4 – Výpočtový model válce

Podmínky rovnováhy:

$$\bullet \sum F_i = 0:$$

$$R_A + R_B - F_F - q * 2 * e = 0 \quad (6.9)$$

$$\bullet \sum M_{iB} = 0:$$

$$R_A * 2 * c - F_F * c - q * 2 * e * c = 0 \quad (6.10)$$

R_A ... reakce v podpoře A [N]

R_B ... reakce v podpoře B [N]

q ... velikost spojitě obtížení [N/m]

e ... polovina délky spojitěho obtížení [m]

Z rovnic (6.9) a (6.10) byly vypočteny reakce:

$$\begin{aligned} R_A + R_B - 0 - 13333 * 2 * 525 &= 0 \\ R_A * 2 * 1030 - 0 * 1030 - 13333 * 2 * 525 * 1030 &= 0 \\ \mathbf{R_A = R_B = 7 \text{ MN}} \end{aligned}$$

6.2.2 Výpočet průhybu válce

Definici Castigliánovy metody (pro průhyb) lze matematicky zapsat následovně:

$$y = \frac{\partial U}{\partial F} \text{ [m]} \quad (6.11)$$

kde

y ... průhyb v místě [m]

U ... deformační energie [J]

F ... síla působící v místě [N]

Z toho vyplývá vztah pro průhyb od ohybového momentu:

$$y_0 = \frac{1}{E * J} * \int_1 M \frac{\partial M}{\partial F} dx \quad (6.12)$$

a analogicky od posouvající síly:

$$y_T = \frac{\beta}{G * S} * \int_1 T \frac{\partial T}{\partial F} dx \quad (6.13)$$

Pro výpočet průhybu od ohybového momentu je potřeba určit jeho průběh v jednotlivých částech:

$$M_I = R_A * x = \left(\frac{F}{2} + q * e \right) * x$$

$$M_{II} = R_A * x = \left(\frac{F}{2} + q * e \right) * x$$

$$M_{III} = R_A * x - q * \frac{(x - b)^2}{2} = \left(\frac{F}{2} + q * e \right) * x - q * \frac{(x - b)^2}{2}$$

Dosazením do vztahu (6.12) vyplývá vztah pro průhyb od ohybového momentu:

$$y_0 = \frac{2}{E} * \left\{ \frac{1}{J_I} * \int_0^a M_I \frac{\partial M_I}{\partial F} dx + \frac{1}{J_{II}} * \int_a^b M_{II} \frac{\partial M_{II}}{\partial F} dx + \frac{1}{J_{III}} * \int_b^c M_{III} \frac{\partial M_{III}}{\partial F} dx \right\} \quad (6.14)$$

Po integraci, úpravě a dosazení:

$$y_0 = \frac{q}{E * J_2} * \left\{ \frac{e * a^3}{3} * \left(\frac{J_2}{J_1} - 1 \right) + \frac{5 * c^4}{24} + \frac{b^4}{24} - \frac{b^2 * c^2}{4} \right\} \quad (6.15)$$

$$y_0 = \frac{13333,33}{2,1 * 10^5 * 5,97 * 10^{10}} * \left\{ \frac{525 * 430^3}{3} * \left(\frac{5,97 * 10^{10}}{1,82 * 10^{10}} - 1 \right) + \frac{5 * 1030^4}{24} + \frac{505^4}{24} - \frac{505^2 * 1030^2}{4} \right\}$$

$$y_0 = \mathbf{0,214 \text{ mm}}$$

Pro výpočet průhybu od posouvající síly je potřeba určit průběh posouvajících sil:

$$T_I = R_A = \left(\frac{F}{2} + q * e \right)$$

$$T_{II} = R_A = \left(\frac{F}{2} + q * e \right)$$

$$T_{III} = R_A - q * (x - b) = \left(\frac{F}{2} + q * e \right) - q * (x - b)$$

Dosazením do vztahu (6.13):

$$y_T = \frac{2 * \beta}{G} * \left\{ \frac{1}{S_I} * \int_0^a T_I \frac{\partial T_I}{\partial F} dx + \frac{1}{S_{II}} * \int_a^b T_{II} \frac{\partial T_{II}}{\partial F} dx + \frac{1}{S_{II}} * \int_b^c T_{III} \frac{\partial T_{III}}{\partial F} dx \right\} \quad (6.16)$$

Po integraci, úpravě a dosazení:

$$y_T = \frac{\beta * q}{G * S_2} * \left[\frac{e * a}{S_1} + \frac{(b - a) * e}{S_2} + \frac{1}{S_2} * \left\{ e * (c - b) - \frac{c^2 - b^2}{2} + b * (c - b) \right\} \right] \quad (6.17)$$

$$y_T = \frac{1,19 * 13333,33}{8 * 10^4 * 8,66 * 10^5} * \left[\frac{525 * 430}{4,78 * 10^5} + \frac{(505 - 430) * 525}{8,66 * 10^5} + \frac{1}{8,66 * 10^5} * \left\{ 525 * (1030 - 505) - \frac{1030^2 - 505^2}{2} + 505 * (1030 - 505) \right\} \right]$$

$$y_T = 1,54 * 10^{-7} \text{ mm}$$

Celkový průhyb uprostřed válce je součet vypočtených průhybů:

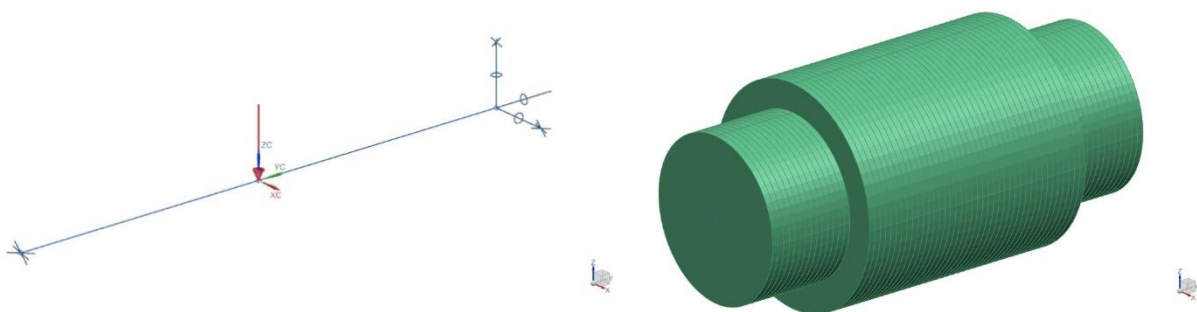
$$y_C = y_O + y_T$$

$$y_C = y_O + y_T = 0,214 + 1,54 * 10^{-7}$$

$$y_C = 0,214 \text{ mm}$$

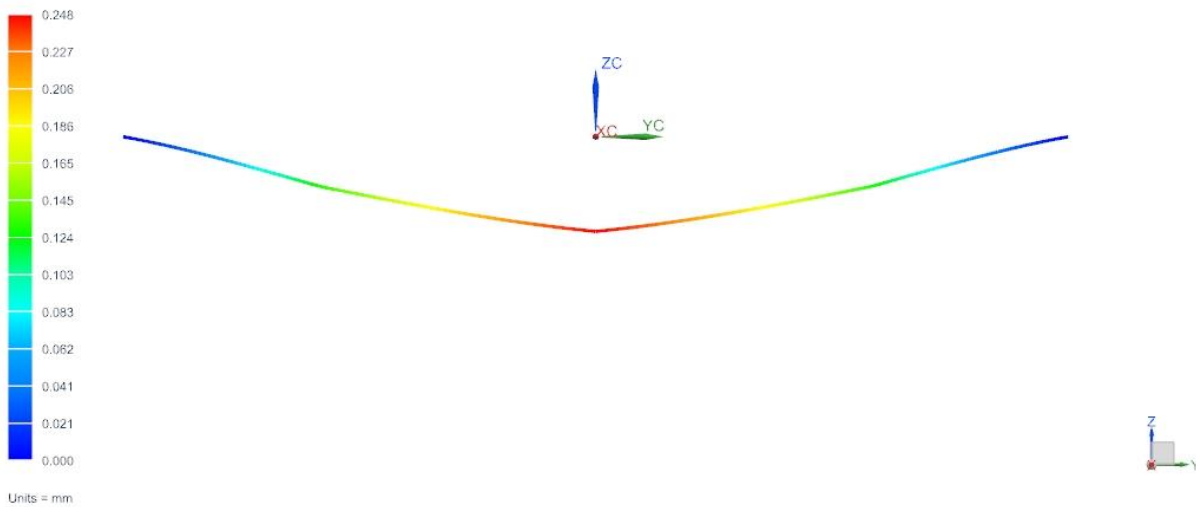
6.2.3 Výpočet pomocí MKP

Úloha byla řešena také metodou konečných prvků (MKP). Model válce byl vytvořen funkcí *beam* s kruhovým průřezem. Dále byly zvoleny okrajové podmínky a vytvořena síť modelu (obr. 6.5). Výsledky analýzy MKP je možno vidět na obr. 6.6. Výsledky této metody a analytické metody se liší s odchylkou $\Delta = 0,034$ mm. Tato odchylka vznikla pravděpodobně zadáním osamoceně síly doprostřed válce, avšak ve výpočtovém modelu analytické metody se uvažuje konstantní spojitě obtížení. Válec byl modelován a počítán v softwaru NX 10.



Obr. 6.5 – Okrajové podmínky (vlevo) a síť modelu (vpravo)

valec_ultimate_fem1_sim1 : Solution 1 Result
 Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
 Displacement - Nodal, Magnitude
 Min : 0.000, Max : 0.248, Units = mm
 Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obr. 6.6 – Výsledky analýzy MKP: Průhyb v [mm]

6.2.4 Ložiska^[11]

Ve válcovacích stolicích kvarto se obvykle používají čtyřřadá kuželíková ložiska pro pracovní válce a čtyřřadá válečková ložiska pro opěrné válce (viz. obr. 6.7). Ložiska pracovních válců zachycují jak radiální tak axiální sílu a není tedy potřeba axiálních ložisek. Ve výsledku to znamená, že čepy pracovního válce mohou být kratší a symetrické (ušetří se místo pro axiální ložisko). Nevýhodou těchto ložisek je jejich volné uložení, které je používáno z důvodu rychlé výměny válců. Vnitřní kroužky se pohybují během zatížení po ploše čepu, která se rychleji opotřebovává. Pro snížení opotřebování se vnitřní kroužky opatří šroubovou drážkou, které k ploše přivádějí mazivo. Ložiska byly vybrány ve společnosti SKF a nesou následující označení:

Pro pracovní válec: čtyřřadá kuželíková ložisko **BT4-0020/HA1** (provedení TQON/W)

Pro opěrný válec: čtyřřadá válečková ložisko **BC4-8015/HB1** (provedení BC4.10/W33WI) a axiální soudečkové ložisko **293/750**.^{[5][7][31]}

I. Výpočet ložiska opěrného válce [39]

- Výpočet otáček

$$n = \frac{v}{\pi * D} [s^{-1}] \quad (6.18)$$

kde

v ... válcovací rychlost [ms^{-1}]

D ... průměr válce [m]

n ... počet otáček [s^{-1}]

$$n = \frac{3}{\pi * 1,050} = 0,91 s^{-1}$$

- Výpočet radiálního ložiska

$$L = \left(\frac{C}{F_e} \right)^{\frac{10}{3}} [10^6 \text{ otáček}] \quad (6.19)$$

$$L_H = \frac{16666}{60 * n} \left(\frac{C}{F_e} \right)^{\frac{10}{3}} [h] \quad (6.20)$$

$$F_e = X * F_R + Y * F_A [N] \quad (6.21)$$

kde

L ... trvanlivost [10^6 otáček]

C ... dynamická únosnost [N]

F_e ... ekvivalentní zatížení [N]

L_H ... trvanlivost [h]

X, Y ... radiální a axiální faktor [-]

F_R, F_A ... radiální a axiální zatížení [N]

Radiální zatížení je v tomto případě stejně velké jako reakce. Pro čistě radiální ložisko platí:

$$F_A = 0 \text{ N}, X = 1$$

Po dosazení do rovnic (6.19),(6.20) a (6.21):

$$F_e = 7 \text{ MN}$$

$$L_1 = \left(\frac{24200000}{7000000} \right)^{\frac{10}{3}} = 62,48 \text{ mil. otáček}$$

$$L_{H1} = \frac{16666}{60 * 0,91} \left(\frac{2,4 * 10^7}{7 * 10^6} \right)^{\frac{10}{3}} = \mathbf{19\ 282,4\ h}$$

- Výpočet axiálního ložiska

Obvykle se velikost axiálního zatížení volí jako desetina radiální síly. Poměr axiálního a radiálního zatížení je větší než výpočtový faktor e (radiální zatížení je nulové), a proto je axiální faktor nenulový.

Opět se využije výše uvedených vztahů (6.19), (6.20) a (6.21):

$$F_e = X * F_R + Y * F_A = 0 + 3,6 * 7000000 * 0,1$$

$$F_e = 2520 \text{ kN}$$

$$L_2 = \left(\frac{9370}{2520} \right)^{\frac{10}{3}} = 79,64 \text{ mil. otáček}$$

$$L_{H2} = \frac{16666}{60 * 0,91} \left(\frac{9370}{2520} \right)^{\frac{10}{3}} = \mathbf{24\ 310\ h}$$

II. Výpočet ložiska pracovního válce [39]

- Výpočet otáček

$$n = \frac{3}{\pi * 0,387} = 2,47 \text{ s}^{-1}$$

pozn.: otáčky byly počítány s nejmenším možným průměrem válce, který lze přebroušením dosáhnout. Opět se využilo vztahu (6.18).

Pro hladké válce se stanovuje velikost axiálního zatížení jako 1% válcovací síly. Radiální zatížení je rovno třecí síle, vyvolané kroučícím momentem.

$$M_K = \frac{F * D * f}{2} \text{ [Nm]}$$

$$F_T = \frac{2 * M_K}{D} \text{ [N]}$$

kde

M_K ... kroučící moment [Nm]

F ... válcovací síla [N]

D ... průměr opěrného válce [m]

f ... součinitel [-]

F_T ... třecí síla [N]

$$M_K = \frac{14 * 10^6 * 1,050 * 0,06}{2} = 2,205 * 10^5 \text{ Nm}$$

$$F_T = \frac{2 * 2,205 * 10^5}{1,050} = 4,2 * 10^5 \text{ N}$$

Protože je poměr axiálního a radiálního zatížení nižší, než výpočtový faktor daného ložiska, platí:

$$X = 1, Y = 0$$

$$F_e = F_T = 4,2 * 10^5 \text{ N}$$

$$L_3 = \left(\frac{2,5 * 10^6}{4,2 * 10^5} \right)^{\frac{10}{3}} = 408 \text{ mil. otáček}$$

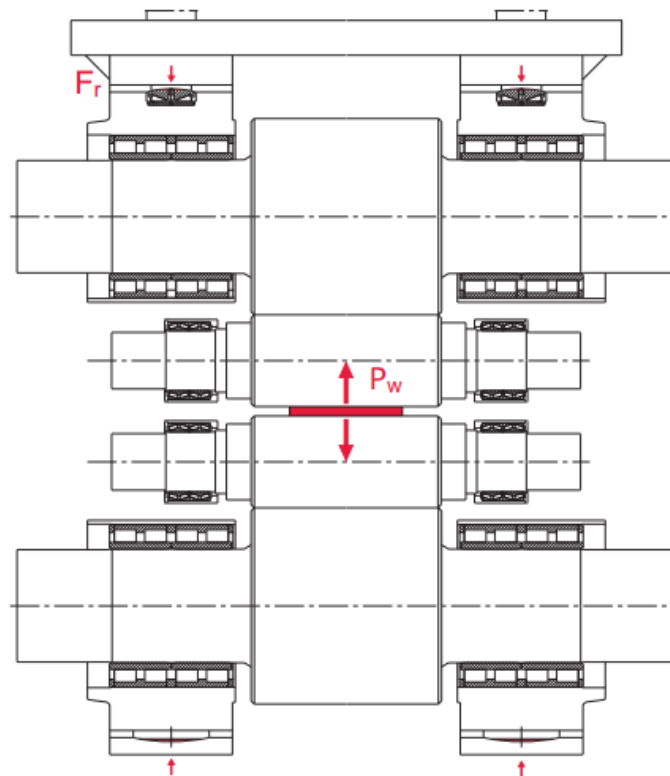
$$L_{H3} = \frac{16666}{60 * 2,47} \left(\frac{2,5 * 10^6}{4,2 * 10^5} \right)^{\frac{10}{3}} = 45 \text{ 915 h}$$

$$L_{H1}, L_{H2}, L_{H3} < L_{HD} = 1000 \text{ h}$$

6.2.5 Zhodnocení

Využitím Castiglianovy metody byl vypočten celkový průhyb válce ($y_c = 0,214$ mm). Tento výsledek potvrzuje již zmíněný fakt, že vnější válec slouží k podepření pracovních válců, které nemají potřebnou tuhost. Pokud by se stejným způsobem počítal pracovní válec (viz. Příloha č. 1), hodnota průhybu by se vyšplhala až na hodnotu 11,3 mm. Tento průhyb by však nastal pouze v případě, že by pracovní válec nebyl podepřen jiným válcem. Opěrný válec byl také počítán pomocí MKP, kde byl zjištěn maximální průhyb (uprostřed válce) $y = 0,248$ mm. Rozdíl výsledků MKP a Castiglianovy metody mohl nastat odlišným přístupem k zatížení válce (u metody MKP působila osamělá síla).

Dále bylo vybráno uložení válců. Zvolená ložiska byla zkontrolována a požadavek na hodinovou trvanlivost 1000 h splnila všechna ložiska.



Obr. 6.7 – Uložení pracovních a opěrných válců [11]

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo v první části vypracovat přehled o historickém vývoji v oblasti válcovacích stolic, provést rešerši současného stavu a objasnit základní pojmy válcovacího procesu. Druhá část práce se zaměřuje na výpočet a inovaci konkrétní válcovací stolice kvarto. Je zde uveden postup při výpočtu rámu a opěrného válce.

V úvodní části jsou popsány důležité historické okamžiky v rozvoji válcovacích stolic, kterými se zabýval již Leonarda da Vinci. Postupem času se objevovaly nové metody válcování a válcovací stolice nacházely větší využití ve výrobě polotovarů. V 19. století již tvořily neodmyslitelnou část strojírenské výroby a vznikaly nové postupy ve válcování trubek a dalších profilů. Na základě současného průzkumu lze válcovací stolice rozdělit do mnoha skupin, některé používají pouze válce pracovní, u jiných jsou pracovní válce podepřeny válci opěrnými.

Válcovací stolice jsou zpravidla součástí válcovacích linek, které mimo jiná zařízení obsahují několik stojanů za sebou. Využití těchto linek je velmi široké, válcováním lze vyrábět plechy, tyče nebo trubky, ale také kolejnice a různé profily. Aby bylo možné tyto výrobky kvalitně vyrábět, musí válcovací stolice splňovat určité požadavky, na které je nutno dbát při konstrukci. Konstrukce, respektive popis konstrukčních uzlů současné válcovací stolice a její technické parametry jsou také obsaženy v této práci. Další část této práce se věnuje samotnému válcovacímu procesu a vztahům, které např. zahrnují podmínku vtažení provalku mezi válce, styčnou plochu nebo výpočet válcovací síly.

V praktické části bylo úkolem provést základní výpočty na válcovací stolici kvarto. V první řadě byl počítán rám. Výpočet proběhl analytickou metodou, při níž byla využita metoda řezu a metoda momentových ploch. Výsledky výpočtu napověděly, že rám byl dostatečně tuhý, ale využití materiálu nebylo optimální. Proto se provedla změna průřezu rámu, který byl původně plný, za dutý. Použitím dutého rámu se dospělo ke snížení jeho hmotnosti, přičemž stále vyhovoval zatěžujícím účinkům. Negativním důsledkem této změny byla zvýšená deformace a snížení celkové tuhosti rámu, která byla stále v přijatelné hodnotě. Poté byl kontrolován stavěcí šroub a místo s otvorem pro matici v rámu.

V druhé polovině praktické části bylo cílem zjistit deformace opěrného válce a navrhnout jeho uložení. Při výpočtu deformace byla úloha řešena jako nosník o dvou podporách, který je zatížen konstantním spojitým zatížením. Protože byla známa poloha místa s největším průhybem válce, k výpočtu se použila metoda podle Castigliána. Za pomoci této metody byl vypočítán celkový průhyb opěrného válce, ale i válce pracovního, který by nebyl podepírán. Porovnáním hodnot průhybu lze dokázat fakt, že pracovní válce mají velice malou tuhost, a proto je nutno k nim přidat válce opěrné. Použitý pracovní válec byl nahrazen válcem s větším průměrem, a proto bylo nutno navrhnout i jeho uložení. Při návrhu uložení byly vybrány ložiska pro opěrný i pracovní válec. U ložisek byla následovně vypočtena a zkontrolována životnost.

Seznam obrázků

<i>Obr. 2.1 – První náčrt válcovací stolice a válcovací stolice Salomona de Causeho [6]</i>	10
<i>Obr. 2.2 – Válcovací a dělicí stolice [16]</i>	10
<i>Obr. 2.3 – Lauthovo trio [19]</i>	11
<i>Obr. 2.4 – Mannesmannova metoda výroby bezešvých trubek [2]</i>	11
<i>Obr. 2.5 – Válcovací stolice společnosti SMS SIEMAG [18]</i>	12
<i>Obr. 2.6 – Durston DRM C130 RE (vlevo) a Durston DRM C130 SSP (vpravo) [8][9]</i>	13
<i>Obr. 2.7 – Válcovací trať [1]</i>	14
<i>Obr. 3.1 – Průběžné (vlevo) a vratné (vpravo) válcovací stolice [26]</i>	16
<i>Obr. 3.2 – Univerzální duo [30]</i>	17
<i>Obr. 3.3 – Hladké válce [17]</i>	17
<i>Obr. 3.4 – Rýhovaný válec [34]</i>	17
<i>Obr. 3.5 – Kalibrované válce [29]</i>	18
<i>Obr. 3.6 – Trio (vlevo) a Lauthovo trio (vpravo) [26][33]</i>	18
<i>Obr. 3.7 – Různé provedení válcovacích stolic (vlevo) / Planetová stolice (vpravo) [3][36]</i>	19
<i>Obr. 5.1 – Válcovací stolicí kvarto [23]</i>	22
<i>Obr. 5.2 – Řez válcovací stolicí kvarto [23]</i>	22
<i>Obr. 5.3 – Sortiment výrobků [4]</i>	23
<i>Obr. 5.4 – Schéma válcování</i>	24
<i>Obr. 5.5 – Styčná plocha</i>	26
<i>Obr. 6.1 – Schéma válcovací stolice kvarto [22]</i>	27
<i>Obr. 6.2 – Rozměry rámu, předpokládaný průhyb a průběh ohybového momentu</i>	28
<i>Obr. 6.3 – Základní rozměry závitu [37]</i>	30
<i>Obr. 6.4 – Výpočtový model válce</i>	34
<i>Obr. 6.5 – Okrajové podmínky (vlevo) a síť modelu (vpravo)</i>	36
<i>Obr. 6.6 – Výsledky analýzy MKP: Průhyb v [mm]</i>	37
<i>Obr. 6.7 – Uložení pracovních a opěrných válců [11]</i>	40

Seznam tabulek

<i>Tab. 2.1 – Technické parametry válcovacích stolic [8][9]</i>	13
<i>Tab. 2.2 – Technické parametry [23]</i>	14
<i>Tab. 2.3 – Vývoj produkce ocelářských výrobků v tisících tun [32]</i>	15
<i>Tab. 2.4 – Předpokládaná produkce ocelářských výrobků v tisících tun [32]</i>	15
<i>Tab. 5.1 – Rozměry vyráběných ocelových plechů [28]</i>	23
<i>Tab. 6.1 – Materiálové charakteristiky</i>	27
<i>Tab. 6.2 – Průřezové charakteristiky</i>	28
<i>Tab. 6.3 – Parametry šroubu a matice *[21]</i>	30
<i>Tab. 6.4 – Porovnání průřezů</i>	33
<i>Tab. 6.5 – Materiálové charakteristiky</i>	33

Seznam příloh

<i>Příloha č. 1 – Výpočet průhybu pracovního válce</i>	1
<i>Příloha č. 2 – Výpočet rámu s dutým průřezem</i>	3
<i>Příloha č. 2 – Výkres válcovací stolice kvarto Ø420/Ø1050x1200</i>	
<i>Příloha č. 3 – Výkres uložení pracovních válců Ø430</i>	

8 Použitá literatura

- [1]. 05-valcovaci trat.jpg. *Katedra tváření kovů a plastů - Skripta* [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/02-valcovani/05-valcovaci%20trat.jpg
- [2]. 08.mannesmanuv.jpg. *Katedra tváření kovů a plastů - Skripta* [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/02-valcovani/08-mannesmanuv.jpg
- [3]. 13.2.4.pdf. *Metalforming* [online]. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.metalforming-inc.com/Publications/Books/Handbook/13.2.4.pdf>
- [4]. *Anlagen- und Maschinenbau weltweit*. SMS Schloemann-Siemag Aktiengesellschaft. ISBN Není.
- [5]. Axiální soudečková ložiska. *SKF* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/roller-bearings/spherical-roller-thrust-bearings/spherical-roller-thrust-bearings/index.html?designation=293/750&unit=metricUnit>
- [6]. ROBERTS, William L. *Cold Rolling of Steel*. Sv. II. New York: CRC Press, 1978. Manufacturing Engineering and Materials Processing. ISBN 0-8247-6780-2.
- [7]. Cylindrical roller bearings. *SKF* [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/roller-bearings/cylindrical-roller-bearings/multi-row-cylindrical-roller-bearings/four-row/index.html?designation=BC4-8015/HB1&unit=metricUnit>
- [8]. Dm-130. *W DURSTON LTD* [online]. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.durston.co.uk/dm-130.htm>
- [9]. Dm-130-power-mills. *W DURSTON LTD* [online]. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.durston.co.uk/dm-130-power-mills.htm>
- [10]. Efficient solutions for plants, machinery and servicex. *SMS group* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://www.sms-group.com/>
- [11]. *FAG Wälzlager in Walzengerüsten*. Schweinfurt: Schaeffler Technologies AG & Co. KG, 2015.
- [12]. Historie. *Z-Group Steel Holding* [online]. 2016 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.steel-holding.cz/index.php/cs/steel-holding-cz/history-cz>
- [13]. Historie. *TS Plzeň a.s.* [online]. 2016 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.tsplzen.cz/historie/>
- [14]. Historie. *ŽďAS a.s.* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.zdas.cz/cs/content.aspx?catid=47>

- [15]. Historie hutnictví. *VÍTKOVICE STEEL, a.s.* [online]. ©2007-2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.vitkovicesteel.com/stranky/historie-hutnictvi>
- [16]. ROBERTS, William L. *Hot Rolling of Steel*. 1983. New York: MARCEL DEKKER, INC., 1983. ISBN 0-8247-1345-1.
- [17]. Chilled Roll - Manufactures, Suppliers and Exporters. *Indiamart* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://dir.indiamart.com/impcat/chilled-roll.html>
- [18]. Images. *SMS Group* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://www.sms-group.com/press-media/images/>
- [19]. LAUTH, Bernard. *Improvement in rolls for rolling hoop-iron*. US172457 A. Uděleno 1875. Dostupné také z: <http://www.google.com/patents/US172457>
- [20]. KWW a.s.: Historie. *KWW* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.kaltww.cz/>
- [21]. ČSN 01 4050. *Lichoběžníkový závit rovnoramenný*.
- [22]. Modeling and control of a four-high heavy plate rolling mill. *TU Wien* [online]. 2015 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.acin.tuwien.ac.at/?id=382&L=1>
- [23]. *Neue Vorstraße für Warmbreitbandwalzwerk: New roughing train for hot strip mill*. SMS Schloemann-Siemag Aktiengesellschaft. ISBN Neznámé.
- [24]. Ondřejovice (Zlaté Hory). *Wikipedie* [online]. 16.10.2013 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Ondřejovice_\(Zlaté_Hory\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Ondřejovice_(Zlaté_Hory))
- [25]. Products. *Sendzimir* [online]. 2009 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.sendzimir.com/products/>
- [26]. STANĚK, Jiří. Přednášky z předmětu KKS/KTS. Plzeň: Západočeská univerzita.
- [27]. HOSNEDL, S. a J. KRÁTKÝ. *Příručka strojního inženýra 1*. Brno: Computer Press, 1999. ISBN 80-7226-055-3.
- [28]. Sortiment Ferony. *Ferona, a.s.* [online]. 2016 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.ferona.cz/cze/sortiment/sortiment.php>
- [29]. Soustružna válců. *ArcelorMittal Engineering Products Ostrava* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://amepo.cz/cz/article/soustruzna-valcu>
- [30]. Steel construction products. *SteelConstruction.info* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: http://www.steelconstruction.info/Steel_construction_products
- [31]. Tapered roller bearings. *SKF* [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/roller-bearings/tapered-roller-bearings/four-row-tapered-roller-bearings/four-row-tqo-configuration/index.html?designation=BT4-0020/HA1&unit=metricUnit>

- [32]. *Technický týdeník*. LXIII. Praha: Business Media CZ, 2015, (11).
- [33]. Trio, hutnictví, válcovací stolice se třemi vodorovně uloženými válci. *CoJeCo* [online]. 2016 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=99173&s_lang=2
- [34]. Úvodem - Romill. *ROMILL* [online]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.romill.cz/cz/krmivarske-stroje-uvodem>
- [35]. VELSOVSKÝ, A. a E. ČERVENÝ. *Válcování*. 2. upravené vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961. DT 621.944.14.
- [36]. Válcování kovů. *Wikipedie* [online]. 2016 [cit. 2016-03-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Válcování_kovů
- [37]. Výběr norem z ČSN. *Ústav konstruování* [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/indexe256.html?akce=1&sekce=csn&ln=cs&norma_id=5
- [38]. STANĚK, J. *Základy stavby výrobních strojů: Tvářecí stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001. ISBN 80-7082-738-6.
- [39]. KALIVODA. *Stolice kvarto*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1992.
- [40]. SEMIATIN, S. L. *Forming and Forging*. USA: ASM International, 1988. 9. edice, Volume 14. ISBN 0-87170-007-7.

PŘÍLOHA č. 1

Výpočet průhybu pracovního válce o průměru 430 mm

1 Vstupní hodnoty

PARAMETR	HODNOTA	JEDNOTKY
Rozměry	a = 430	[mm]
	b = 505	
	c = 1030	
	e = 525	
	d = 240	
	D = 430	
Materiál	E = 2,1*10 ⁵	[MPa]
	G = 0,8*10 ⁵	
Zatížení	q = 13 333	[N/mm]
Tvarový součinitel	β = 1,19	[-]

Tab. 1.1 – Vstupní hodnoty

2 Výpočet průhybu

Výpočtový model (viz. obr. 6.4) je shodný jako u výpočtu opěrného válce (mění se pouze rozměry válce). Z tohoto důvodu lze při výpočtu využít již zmíněných vztahů (6.15) a (6.17). Do těchto vztahů se dosadí vstupní hodnoty (viz. Tab. 1.1):

$$y_0 = \frac{13333,33}{2,1 * 10^5 * 1,68 * 10^9} * \left\{ \frac{525 * a^3}{3} * \left(\frac{1,68 * 10^9}{1,63 * 10^8} - 1 \right) + \frac{5 * 1030^4}{24} + \frac{505^4}{24} - \frac{505^2 * 1030^2}{4} \right\}$$

$$y_0 = 11,3 \text{ mm}$$

$$y_T = \frac{1,19 * 13333,33}{8 * 10^4 * 1,45 * 10^5} * \left[\frac{525 * 430}{4,5 * 10^4} + \frac{(505 - 430) * 525}{1,45 * 10^5} + \frac{1}{1,45 * 10^5} * \left\{ 525 * (1030 - 505) - \frac{1030^2 - 505^2}{2} + 505 * (1030 - 505) \right\} \right]$$

$$y_T = 8,5 * 10^{-6} \text{ mm}$$

Celkový průhyb uprostřed válce je součet vypočtených průhybů:

$$y_C = y_0 + y_T \text{ [mm]}$$

$$y_C = y_0 + y_T = 11,3 + 8,5 * 10^{-6}$$

$$y_C = 11,3 \text{ mm}$$

PŘÍLOHA č. 2

Výpočet rámu s dutým průřezem

1 Vstupní hodnoty

STOJINA	PŘÍČKA
Plocha průřezu	
$S_S = 229\,876\text{ mm}^2$	$S_P = 311\,200\text{ mm}^2$
Kvadratický moment průřezu	
$J_S = 1,3 \cdot 10^{10}\text{ mm}^4$	$J_P = 3,45 \cdot 10^{10}\text{ mm}^4$
Modul průřezu v ohybu	
$W_{OS} = 3,8 \cdot 10^7\text{ mm}^3$	$W_{OP} = 7,3 \cdot 10^7\text{ mm}^3$
Délka střední čáry profilu	
$l_S = 4920\text{ mm}$	$l_P = 1800\text{ mm}$

Tab. 2.1 – Vstupní hodnoty

2 Výpočet

Protože se u rámu změnil pouze průřez, lze použít výše uvedených vztahů (6.1) až (6.8) a dosadit do nich vstupní hodnoty z tab. 2.1 :

- Ohybový moment

$$M_O = \frac{7 \cdot 10^6 \cdot 1800}{8 \cdot \left(\frac{3,45 \cdot 10^{10}}{1,3 \cdot 10^{10}} \cdot \frac{4920}{1800} + 1 \right)}$$

$$M_O = 1,34 \cdot 10^5 \text{ Nm}$$

- Maximální napětí ve stojině:

$$\sigma_{S\text{MAX}} = \frac{\frac{7 \cdot 10^6}{2}}{229876} + \frac{1,34 \cdot 10^8}{3,8 \cdot 10^7}$$

$$\sigma_{S\text{MAX}} = 18,74 \text{ MPa}$$

- Maximální napětí v příčce:

$$\sigma_{P\text{MAX}} = \frac{\frac{7 \cdot 10^6 \cdot 1800}{4} - 1,34 \cdot 10^8}{7,3 \cdot 10^7}$$

$$\sigma_{P\text{MAX}} = 41,27 \text{ MPa}$$

- Stupeň využití materiálu:

$$V_s = \frac{18,74}{80} \cdot 100 = 23,4 \%$$

$$V_P = \frac{41,27}{80} * 100 = \mathbf{51,6 \%}$$

- Natažení stojiny:

$$y_S = \frac{7 * 10^6 * 4920}{2 * 2,1 * 10^5 * 229876}$$
$$\mathbf{y_S = 0,357 \text{ mm}}$$

- Deformace příčky od ohybového momentu:

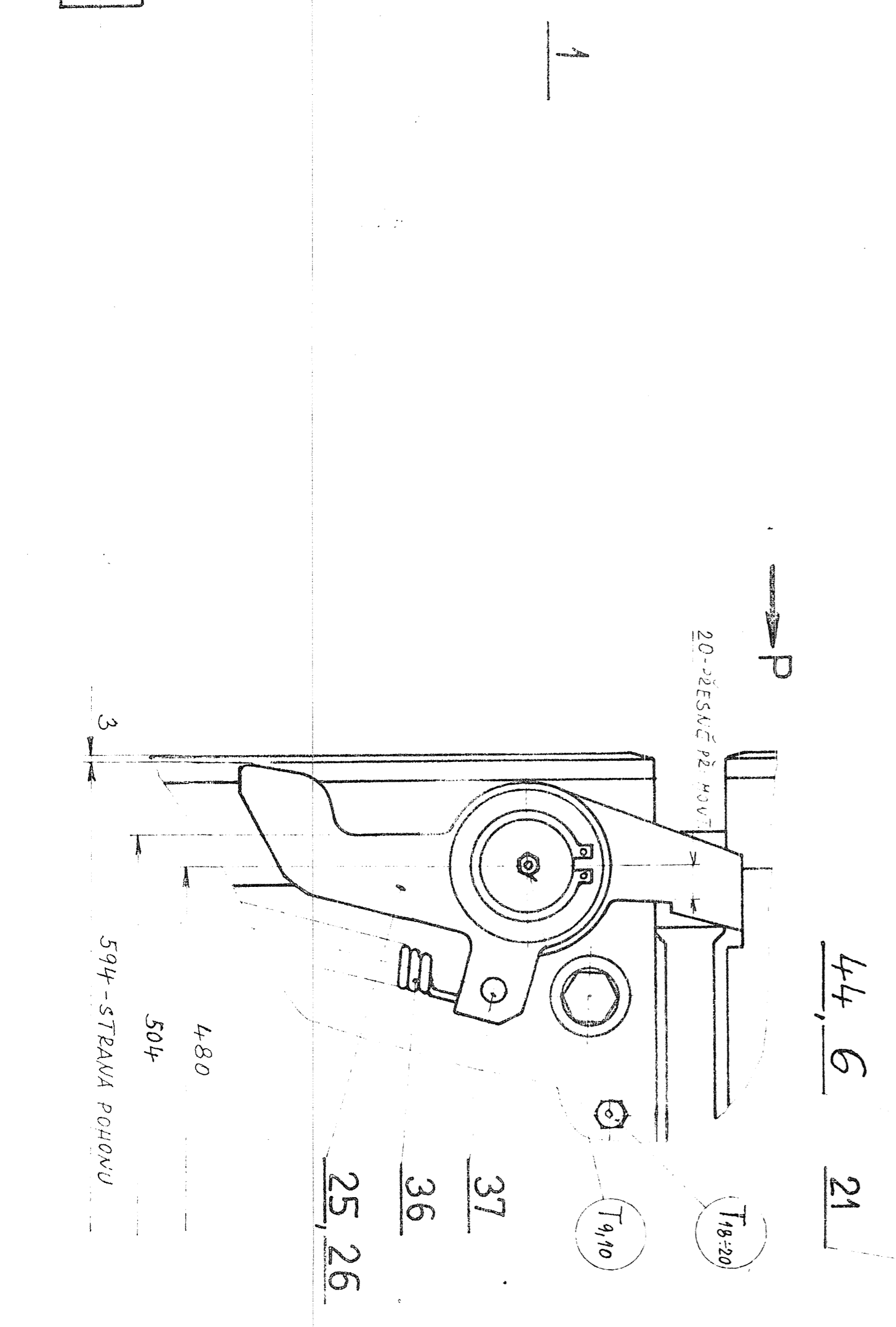
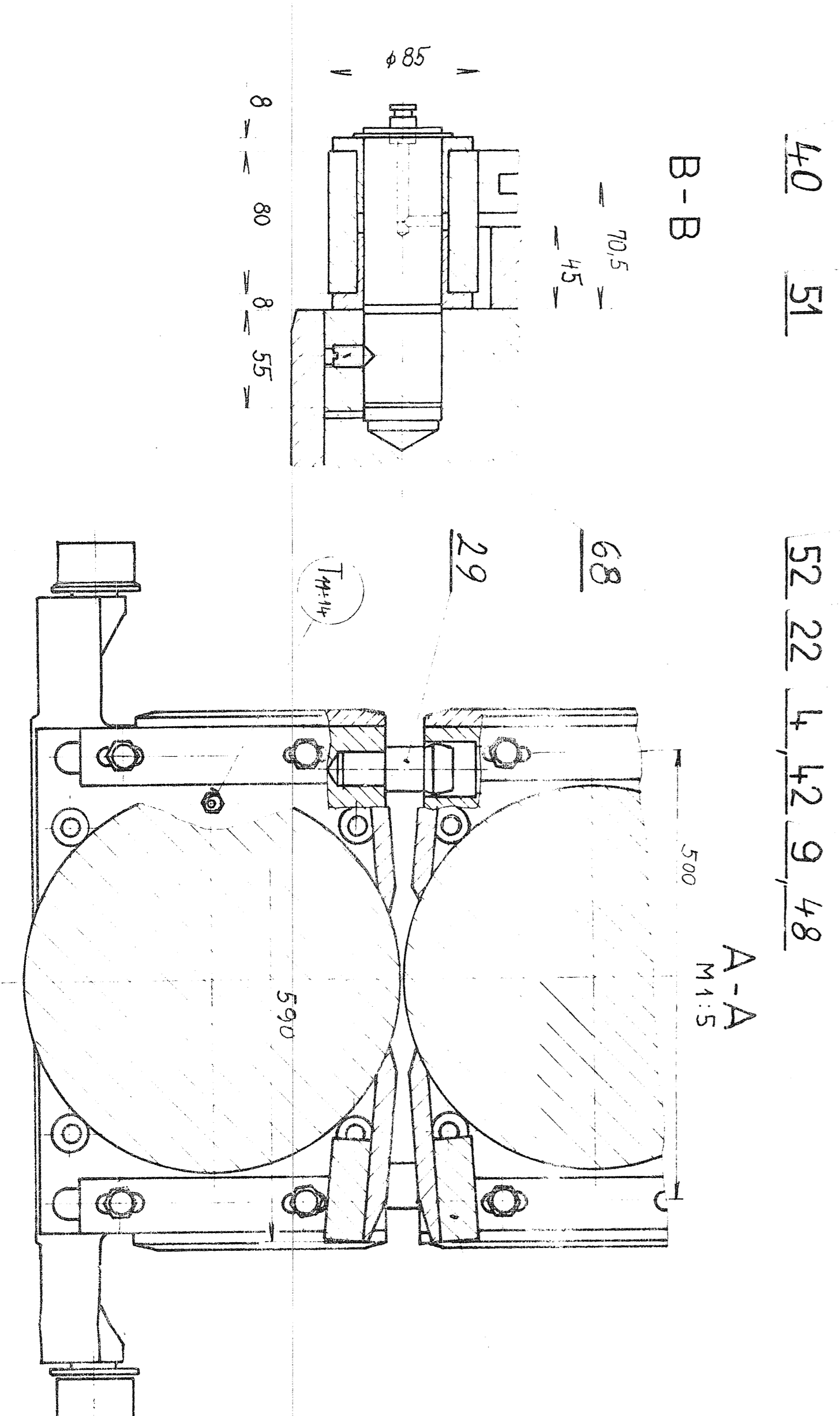
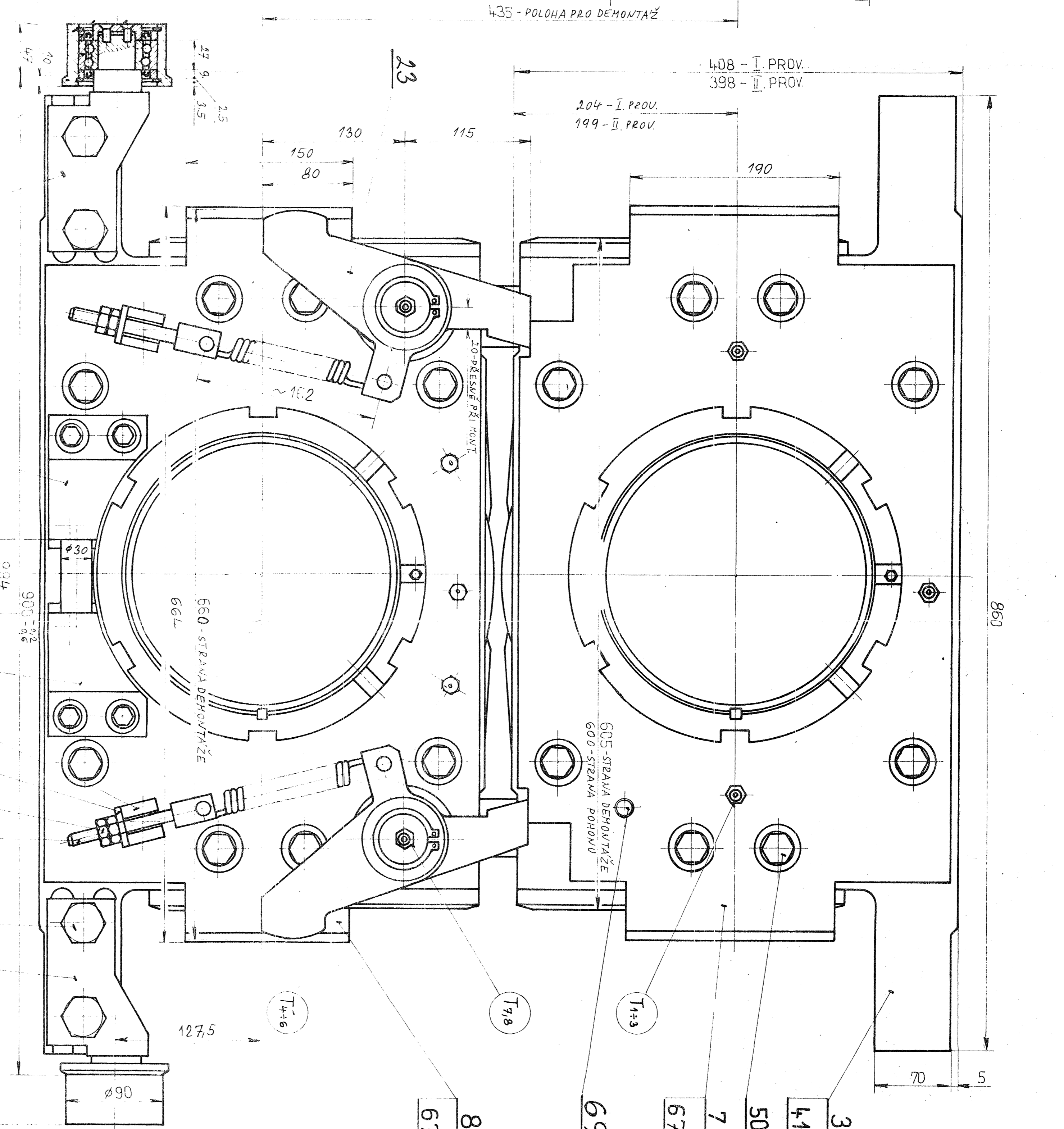
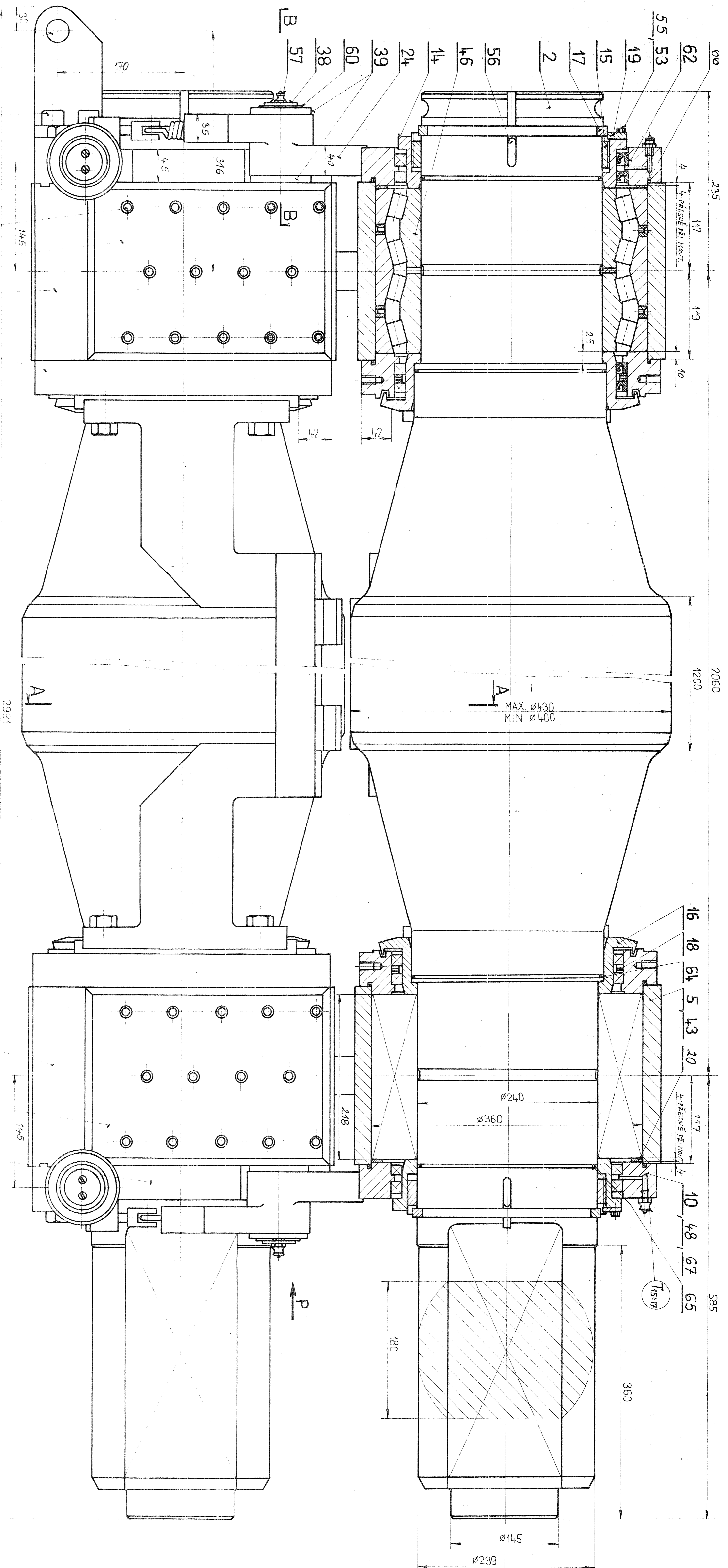
$$y_{PM} = \frac{1800^2}{8 * 2,1 * 10^5 * 3,45 * 10^{10}} * \left(\frac{7 * 10^6 * 1800}{6} - 1,34 * 10^8 \right)$$
$$\mathbf{y_{PM} = 0,109 \text{ mm}}$$

- Deformace příčky od posouvající síly:

$$y_{PF} = \frac{7 * 10^6 * 1800 * 1,2}{4 * 0,82 * 10^5 * 311200}$$
$$\mathbf{y_{PF} = 0,148 \text{ mm}}$$

- Celková deformace je rovna součtu dílčích deformací:

$$y_C = y_S + 2 * (y_{PM} + y_{PF})$$
$$y_C = 0,357 + 2 * (0,109 + 0,148)$$
$$\mathbf{y_C = 0,871 \text{ mm}}$$



TECHNICKÉ POŽADAVKY:

- 1 OSY VÁLCOV MUST SVIT V ZÁKRUŽNOM STAVU ROVNOBĚŽNĚ 60°
- 2 NEPŘÍMĚ PŘESLEZENÍ VE PRŮCH. MĚŘÍŠ V ROVNĚ VERTIKALITĚ JE 0,2 mm
- 3 ROZDÍLY OSY DO NULOVANĚ TĚL, ABY NEVSTĚPĚ ROZDÍLY LADĚNĚ, BHLI PĚVĚ STRÁŽNÝ
- 4 MONTÁŽ LADĚNĚ PROJEKT "K" ABY PĚ NEVSTĚPĚ LADĚNĚ, KA ROZDĚL, ZŮSTALA NEVSTĚPĚ
- 5 PĚVĚ NEVSTĚPĚ LADĚNĚ, KA ROZDĚL, ZŮSTALA NEVSTĚPĚ
- 6 PĚVĚ OSY 37 A 38 ABY NEVSTĚPĚ, LADĚNĚ, KA ROZDĚL, ZŮSTALA NEVSTĚPĚ
- 7 ROZDÍLY OSY 50 ZĚDA, KA ROZDĚL, ZŮSTALA NEVSTĚPĚ
- 8 MĚRŤVĚ LADĚNĚ, KA ROZDĚL, ZŮSTALA NEVSTĚPĚ
- 9, KĚDĚ OSY 45 VE VĚDĚNĚ PĚVĚ, KA ROZDĚL, ZŮSTALA NEVSTĚPĚ

TECHNICKÁ CHARAKTERISTIKA:

- 1 KAPNÝ
- 2 PĚVĚ VÁLCOV, KA ROZDĚL, ZŮSTALA NEVSTĚPĚ
- 3 PĚVĚ VÁLCOV, KA ROZDĚL, ZŮSTALA NEVSTĚPĚ
- 4 TĚLŤVĚ, KA ROZDĚL, ZŮSTALA NEVSTĚPĚ
- 5 PĚVĚ VÁLCOV, KA ROZDĚL, ZŮSTALA NEVSTĚPĚ
- 6 PĚVĚ VÁLCOV, KA ROZDĚL, ZŮSTALA NEVSTĚPĚ
- 7 PĚVĚ VÁLCOV, KA ROZDĚL, ZŮSTALA NEVSTĚPĚ
- 8 PĚVĚ VÁLCOV, KA ROZDĚL, ZŮSTALA NEVSTĚPĚ
- 9 PĚVĚ VÁLCOV, KA ROZDĚL, ZŮSTALA NEVSTĚPĚ

KUSOVNÍK TS 100163 list 1-6

UJOZENÍ PRACOVNÍCH VÁLCOV Ø 430
 MILLSER
 4:25
 1:X