

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: Konstruování strojů a technických zařízení
Studijní zaměření: Konstruování výrobních strojů a zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Svařované ozubené kolo s integrovanou spojkou kovacího lisu

Autor: **Bc. David KOVAŘÍK**

Vedoucí práce: **doc. Ing. Jan HLAVÁČ, Ph.D.**

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. David KOVAŘÍK**
Osobní číslo: **S20N0040K**
Studijní program: **N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení**
Specializace: **Konstruování výrobních strojů a zařízení**
Téma práce: **Svařované ozubené kolo s integrovanou spojkou kovacího lisu**
Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

Zásady pro vypracování

Základní požadavky:

Cílem této práce je variantní návrh svařence ozubeného kola kovacího mechanického lisu v němž je integrována spojka. Cílem je příprava náhrady stávajícího odlitku. Návrh bude vedle konstrukčního návrhu obsahovat i návrh technologie výroby, včetně samotného svařování.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

1. Studium funkce spojkového kola kovacího lisu.
2. Studium možností stavby svařovaného ozubeného kola.
3. Variantní návrh nového svařovaného kola spojky.
4. Stanovení zatížení a jeho aplikace v pevnostní kontrole navrženého kola.
5. Návrh technologie svařování a příprava výkresové dokumentace.

Konzultant: Ing. Martin Volejníček (ŠMERAL Brno a.s.)

Rozsah diplomové práce: **40-60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] RUDOLF, B., KOPECKÝ, M. *Toářecí stroje – Základy stavby a využití*. Praha: SNTL, 1985
[2] KAMELANDER, I. *Toářecí stroje I*. Brno: VUT, 1989, ISBN 80-214-1037-10
[3] BOLEK, A. a kol. *Části strojů*. Praha: SNTL, 1990, ISBN 80-03-00426-8
Podkladové materiály, výkresy, prospekty, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Jan Hlaváč, Ph.D.**
Katedra konstruování strojů

Datum zadání diplomové práce: **30. listopadu 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

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

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. KOVAŘÍK	Jméno David	
STUDIJNÍ OBOR	N0715A270017 „Konstruování strojů a technických zařízení“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení doc. Ing. HLAVÁČ, Ph.D.	Jméno Jan	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	
NÁZEV PRÁCE	Svařované ozubené kolo s integrovanou spojkou kovacího lisu		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN

CELKEM	82	TEXTOVÁ ČÁST	64	GRAFICKÁ ČÁST	18
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

ANOTACE	Diplomová práce zpracovává návrh svařence ozubeného kola jako náhradu za stávající řešení v podobě odlitku pro lis LMZ 4000 od firmy Šmeral Brno a.s. Kromě konstrukčního návrhu je navržena i technologie výroby, a to od návrhu výroby jednotlivých dílů až po návrh technologie svařování.
KLÍČOVÁ SLOVA	Konstrukční návrh, návrh technologie, analýza MKP, SolidEdge, Inventor, NX, tvářecí stroje, variantní návrh, svařování, ozubené kolo, spojka

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. KOVAŘÍK	Name David
FIELD OF STUDY	N0715A270017 "Design engineering of machines and technical devices"	
SUPERVISOR	Surname doc. Ing. HLAVÁČ, Ph.D.	Name Jan
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS	
TYPE OF THESIS	DIPLOMA	BACHELOR
NAME OF THESIS	Welded gear with integrated clutch of forging press	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KKS	SUBMITTED IN	2023
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES

TOTALLY	82	TEXT PART	64	GRAPHICAL PART	18
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

ABSTRACT	The diploma thesis deals with the design of a welded gear as a replacement for the existing casted gear for the LMZ 4000 press from Šmeral Brno a.s. In addition to the structural design, the production technology is also proposed - from the design of production of individual parts to the design of welding technology.
KEY WORDS	Construction design, technology design, FEM analysis, SolidEdge, Inventor, NX, forming machines, variant design, welding, gear, clutch

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Janu Hlaváčovi, Ph.D. za trpělivost, cenné technické rady a ochotu vždy pomoci během vypracování. Zároveň bych chtěl poděkovat konzultantovi Ing. Martinu Volejníčkovi za veškeré poskytnuté podklady a informace potřebné pro pochopení problematiky. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat Bc. Elišce Šprlákové a Marku Šmídovi za dílčí korekce práce.

Obsah

Přílohy	10
Úvod	11
1 Představení firmy Šmeral Brno, a.s.	12
1.1 O firmě	12
1.2 Portfolio vybraných tvářecích strojů	12
1.2.1 Svislé kovací lisy	12
1.2.2 Vodorovné kovací lisy	13
1.2.3 Stroje pro příčné klínové válcování	13
1.2.4 Kolenové razící lisy	14
1.2.5 Klikové lisy	14
2 Studium funkce spojkového kola kovacího lisu LMZ 4000	15
2.1 Popis lisů řady LMZ	15
2.1.1 Stojan	16
2.1.2 Beran	16
2.1.3 Hlavní hřídel a předloha	17
2.1.4 Brzda a spojka	17
2.1.5 Třetí ložisko	17
2.2 Princip lisu LMZ 4000	18
3 Studium možností stavby svařovaného ozubeného kola	21
3.1 Stávající provedení ozubeného kola	21
3.2 Variantní návrh svařovaného ozubeného kola	21
3.3 Možnosti technologie výroby dílčích částí svařence	23
3.3.1 Válcové části ve tvaru kroužků – náboj, ozubený věnec, náboj věnce spojky 1	23
3.3.2 Disk, žebra	26
3.4 Výběr optimální varianty	26
3.5 Přídavky na obrábění	27
3.6 Výběr technologie výroby, ekonomické zhodnocení	28
4 Stanovení zatížení navrženého kola a kontrola provozuschopnosti	30
4.1 Stanovení momentu pro vyvození jmenovité síly lisu	30
4.2 Posouzení provozuschopnosti	33
4.2.1 Určení potřebných veličin	33
4.2.2 Teorie únosnosti boků zubů v dotyku	34

4.2.3	Výpočet únosnosti boků zubů v dotyku	36
4.2.4	Únosnost zubů v ohybu	38
4.2.5	Výpočet únosnosti zubů v ohybu	39
5	Návrh technologie svařování	42
5.1	Metoda svařování	42
5.2	Stanovení teploty předehřevu	43
5.3	Návrh svarových ploch tupých svarů	45
5.4	Nedestruktivní zkoušení svarů	46
5.5	Výpočet svarů	47
6	MKP	49
6.1	Hrubý výpočet odlitku kola	49
6.2	Optimalizace výpočtu odlitku kola	54
6.3	Výpočet svařence kola	59
6.3.1	Analýza svarů	62
	Závěr	63
	Reference	64
	Tabulka 1: Svislé kovací lisí [1]	13
	Tabulka 2: Technické parametry lisů řady LMZ [2]	15
	Tabulka 3: Výrobní možnosti válcovaných kroužků firmy Bohemia rings s.r.o [5]	23
	Tabulka 4: Výrobní možnosti volně kovaných kroužků firmy TRIANGOLO spol. s.r.o [7]	24
	Tabulka 5: Výrobní možnosti volně kovaných kroužků firmy CZECH PRECISION FORGE a.s [8]	24
	Tabulka 6: Maximální parametry zakružovacího stroje BDUWO 150/4 [10]	25
	Tabulka 7: Vícekriteriální metoda rozhodování	26
	Tabulka 8: Rozměry dílčích komponent kola	28
	Tabulka 9: Výběr technologie jednotlivých dílů	29
	Tabulka 10: Orientační hodnoty teplot předehřevu [17]	43
	Tabulka 11: Analýza svarů	62

Obrázek 1: Svislé kovací lisy (zleva LZK, LMZ, SKL) [1]	12
Obrázek 2: Vodorovné kovací lisy (zleva LKH, LKL) [1]	13
Obrázek 3: Stroj pro příčné klínové válcování ULS [1]	13
Obrázek 4: Kolenový razící lis LLR [1].....	14
Obrázek 5: Klikové lisy (zleva LKT, LDC) [1]	14
Obrázek 6: Části lisu řady LMZ [2]	15
Obrázek 7: Provedení stojanů (vlevo) a beran s vyvažováním (vpravo) [2].....	16
Obrázek 8: Předloha a hlavní hřídel [2]	17
Obrázek 9: Schéma pohonu ozubeného kola	18
Obrázek 10: Schéma ozubeného kola	18
Obrázek 11: Detail uložení ozubeného věnce a lamelové spojky	19
Obrázek 12: Popis ostatních částí ozubeného kola	19
Obrázek 13: Schéma výstředníkového hřídele	20
Obrázek 14: Stávající provedení odlévaného ozubeného kola.....	21
Obrázek 15: Návrh rozdělení kola I	21
Obrázek 16: Návrh rozdělení kola II.....	22
Obrázek 17: Návrh rozdělení kola III	22
Obrázek 18: Výroba ozubeného věnce válcováním [4]	23
Obrázek 19: Výroba ozubeného věnce kováním [6]	24
Obrázek 20: Výroba kroužku zakružováním z plechu [9]	24
Obrázek 21: Zakružování na stroji BDUWO 150/4 [10]	25
Obrázek 22: Příklad výroby věnce ze 6 segmentů [11]	25
Obrázek 23: Řezací stroj AJAN CNC [12]	26
Obrázek 24: Optimální varianta	27
Obrázek 25: Přídavky na obrábění pro optimální variantu	28
Obrázek 26: Schéma výstředníkového mechanismu.....	30
Obrázek 27: Rozklad sil - silový trojúhelník	31
Obrázek 28: Pasivní odpory ve výstředníkovém mechanismu	32
Obrázek 29: Svařovací robot MOTOMAN AR3120 [14]	42
Obrázek 30: Svařování pod tavidlem [15]	43
Obrázek 31: Vybraní zástupci tupých svarů [18].....	45
Obrázek 32: Finální návrh svarů	45
Obrázek 33: Svařování nesymetrického ½ V svaru	46
Obrázek 34: Postup svařování dílů kola.....	46

Obrázek 35: Výpočet svarů	47
Obrázek 36: Idealizovaný díl odlitku	49
Obrázek 37: Síť odlitku	50
Obrázek 38: Přejídné uložení kola a věnce spojky	50
Obrázek 39: Propojení jednotlivých dílů odlitku	51
Obrázek 40: Vazby odlitku	51
Obrázek 41: Report počtů rovnic a konvergence kontaktu odlitku	52
Obrázek 42: Výsledky odlitku	52
Obrázek 43: Detail zatížení kolíků odlitku	53
Obrázek 44: Detail zatížení ozubení odlitku	53
Obrázek 45: Idealizovaný díl odlitku po optimalizaci	54
Obrázek 46: Síť odlitku po optimalizaci	54
Obrázek 47: Přejídné uložení kola a věnce spojky	55
Obrázek 48: Propojení jednotlivých dílů odlitku po optimalizaci	55
Obrázek 49: Vazby odlitku po optimalizaci	56
Obrázek 50: Definice zatížení odlitku po optimalizaci	56
Obrázek 51: Report počtů rovnic a konvergence kontaktu odlitku po optimalizaci	57
Obrázek 52: Výsledky odlitku po optimalizaci	57
Obrázek 53: Detail zatížení kolíků odlitku po optimalizaci	58
Obrázek 54: Detail zatížení ozubení odlitku napřesno	58
Obrázek 55: Idealizovaný díl svařence	59
Obrázek 56: Síť svařence	59
Obrázek 57: Propojení jednotlivých dílů svařence	60
Obrázek 58: Report počtů rovnic a konvergence kontaktu svařence	60
Obrázek 59: Porovnání svařence a odlitku	61
Obrázek 60: Detail zatížení kolíků a ozubení svařence a odlitku	61
Obrázek 61: Analýza svarů	62

Přílohy

Příloha 1: Tabulky a grafy z normy ČSN 01 4686-1/5

Příloha 2: Výrobní výkresová dokumentace

Úvod

Hlavním cílem diplomové práce je navrhnout variantní návrh svařence ozubeného kola jakožto náhradu za stávající řešení odlitku pro firmu Šmeral Brno a.s. Výsledný optimální návrh by měl výrazně zjednodušit složitou výrobu odlitku kola a zároveň snížit jeho celkovou hmotnost při zachování jeho pevnosti a tuhosti.

Součástí konstrukčního návrhu je definice zatížení, které bude stanoveno ze znalosti geometrie výstředníkového mechanismu lisu a známé jmenovité síly lisu. Dále bude provedeno posouzení provozuschopnosti, kde bude vyhodnocena únosnost boků zubů v dotyku a únosnost zubů v ohybu.

Kromě konstrukčního návrhu je cílem navrhnout technologie výroby jednotlivých částí optimálního návrhu svařovaného kola s ohledem na jejich cenu, požadované vlastnosti a dostupnosti výroby v okolí. Součástí bude návrh technologie svařování obsahující doporučení metody svařování, typu svarů, geometrie svarových ploch, výpočet teploty přehřevu (pokud bude potřeba) a zkoušení svarů. Pro hlavní nosné svary bude proveden pevnostní výpočet.

Na závěr práce budou vypracovány dva pevnostní výpočty pomocí metody konečných prvků, a to pro stávající řešení odlitku a pro optimální variantu svařence. Výsledky výpočtu optimální varianty svařovaného kola se následně porovnají s výsledky stávajícího řešení.

1 Představení firmy Šmeral Brno, a.s.

1.1 O firmě

Historie firmy Šmeral Brno a.s. sahá až do roku 1861, kdy byla vystavěna slévárna s kupolní pecí. Významným okamžikem, který vedl k celosvětovému povědomí byla spolupráce s Viktorem Kaplanem v roce 1918. Tento rok zde byla vyrobena úplně první kaplanova turbína na světě a tyto turbíny se zde vyráběly až do 50. let. Základ dnešního portfolia byl položen o dva roky později, v roce 1920, kdy majitelé firmy koupili licenci od rakouské společnosti Brüder Schreb na tvářecí stroje. Během svého působení firma získala několik ocenění v rámci mezinárodního strojírenského veletrhu, například zlatou medaili za kovací lis (rok 1964), hydraulický buchar (1971), postupový tvářecí automat na hotové šrouby (1980), výstředníkový lis (1995) a nejnovější za inovovaný stroj pro technologii příčného klínového válcování (2017). [1]

Dnes se firma Šmeral Brno zabývá stavěním tvářecích linek na tzv. klíč, které jsou automatizované pomocí robotů a transferů. Dále stavbou samostatných tvářecích strojů, jako jsou například lisy a buchary pro zápustkové kování za tepla nebo kovací válce. Kromě stavby nových linek a strojů zajišťují generální opravy a modernizace tvářecích strojů (včetně strojů od jiných výrobců). Firma také nabízí ostatním firmám možnosti kooperace pro obrábění, například na portálových obráběcích centrech, pětiosých souvisle řízených CNC obráběcích centrech, frézovacích centrech, vyvrtávaček, hrotových soustružích, karuselech nebo portálových frézek. Kromě obrábění nabízí kooperace i pro tepelné zpracování (plynová nitridace, žihání, kalení a zušlechťování do oleje či vody), svařování (ruční i strojní) a montáže. [1]

1.2 Portfolio vybraných tvářecích strojů

1.2.1 Svislé kovací lisy

Svislé kovací lisy se používají pro výrobu přesných zápustkových výkovek pro kování za tepla a za poloohřevu s tvářecími silami od 10 do 65 MN. Uplatnění nacházejí v automobilovém průmyslu, ve stavebnictví a příbuzných oborech. Lisy se dodávají s širokým sortimentem příslušenství, jako jsou různé druhy vyhazovačů, upínačů zápustek, zvedáků zápustek, transferů a dalších. Na obrázku 1 jsou představitelé svislých kovacích lisů, v tabulce 1 je jejich základní popis. [1]



Obrázek 1: Svislé kovací lisy (zleva LZK, LMZ, SKL) [1]

Tabulka 1: Svislé kovací lisy [1]

	LZK	LMZ	SKL
Pracovní pohyb	Klikový mechanismus	Výstředníkový mechanismus	Kulisový mechanismus
Vedení beranu	Čtyřboké tvaru O	Čtyřboké tvaru X	Osmiboké
Uložení hřídele	Dvojbodové	Dvojbodové	Tříbodové
Obsluha	Manuální	Robotizované pracoviště	Robotizované pracoviště

1.2.2 Vodorovné kovací lisy

Vodorovné kovací lisy jsou určeny k pýchovacím operacím z tyčí, jednostranných přírubových součástí, dutých výkovek nebo armatur za tepla s tvářecími silami od 2,5 do 12 MN. Lisy jsou vybaveny hlavním a svěracím beranem, kdy za jejich současného působení v postupovém nástroji je zhotoven výkovek. Uplatnění nacházejí v průmyslu dopravních prostředků, zemědělských strojů a valivých ložisek. Na obrázku 2 jsou představitelé vodorovných kovacích lisů. [1]

**Obrázek 2: Vodorovné kovací lisy (zleva LKH, LKL) [1]**

1.2.3 Stroje pro příčné klínové válcování

Stroje pro příčné klínové válcování se používají k výrobě vývalků za tepla z válcovacích polotovarů tvaru špalků nebo tyčí v rozsahu průměrů 10-160 mm. Válce mohou být pevné nebo výměnné. Vývalky zhotovené válcováním se zhotovují jako hotové rotační součásti, které se následně obrábějí (například hřídele do převodových skříní automobilů) nebo jako polotovary pro další kování. Představitel stroje pro příčné klínové válcování je na obrázku 3. [1]

**Obrázek 3: Stroj pro příčné klínové válcování ULS [1]**

1.2.4 Kolenové razící lisy

Kolenové razící lisy jsou robustní, tuhé a maximálně přesné lisy se speciálním vedením beranu, s hydraulickými pojistkami proti přetížení, umístěnými v ojnici nebo ve stojanu lisu. Lisy se používají pro razící operace (odznaky, medaile) k přesným stříhacím operacím z tlustých plechů za studena a ke kalibračním operacím zápusťkových výkovek za studena (dosažení přesných rozměrů, které není možno zajistit v kovacím lisu). Lisy mají rozsah tvářecí síly od 4 do 20 MN a mají provedení s horním nebo spodním náhonem. Na obrázku 4 je představitel kolenového razícího lisu. [1]



Obrázek 4: Kolenový razící lis LLR [1]

1.2.5 Klikové lisy

Klikové lisy jsou mechanické tažné lisy o jmenovité tvářecí síle od 1,6 do 4 MN, se stojany ve tvaru „O“ anebo ve tvaru „C“ s rozměrnými stoly a berany. Lisy je možno vybavit tažnými pneumatickými nebo hydraulickými přidržovači. Jsou určeny pro veškeré operace tváření plechových pásů, plechových tabulí či svitků (přesné stříhání, ohýbání, prostorové tažení) a taktéž pro postupové tváření malých součástí. Slouží například pro výrobu dřezů, skříní plynoměrů, sporáků, ledniček nebo radiátorů. Představitelé klikových lisu jsou na obrázku 5. [1]



Obrázek 5: Klikové lisy (zleva LKT, LDC) [1]

2 Studium funkce spojkového kola kovacího lisu LMZ 4000

V této kapitole bude provedena rešerše strojů řady LMZ, kde dále bude více dopodrobna rozebrán stroj LMZ 4000, pro který bude svařenec ozubeného kola navrhován.

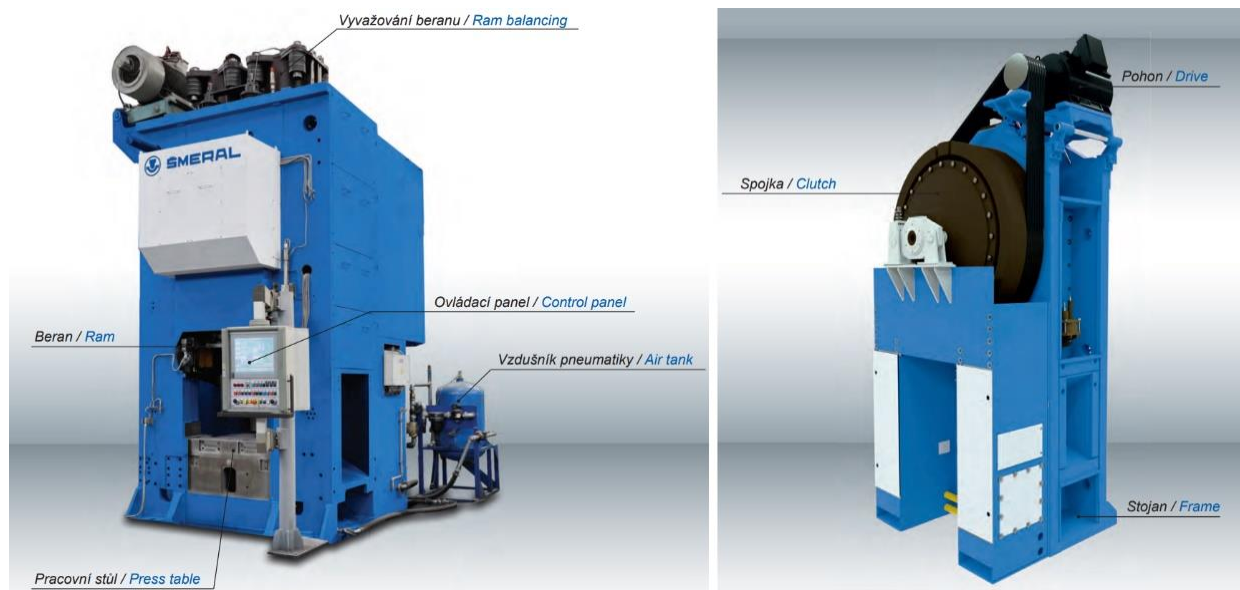
2.1 Popis lisů řady LMZ

Lisy řady LMZ jsou mechanické svislé výstředníkové jednobodové lisy s horním pohonem, s uložením hlavního hřídele ve stojanu ve směru zepředu dozadu, příčně ke směru technologického procesu kování zleva doprava. Využití těchto lisů je zejména pro práci za tepla při hromadné výrobě přesných zápustkových výkovků, například pro automobilový průmysl, stavebnictví a další příbuzné obory. Tato řada se vyrábí celkem v 5 velikostech, od LMZ 1000 až po LMZ 6500. Číslo udává tvářecí sílu v tunách. Další parametry této řady lisů jsou uvedeny v tabulce 2. [2]

Tabulka 2: Technické parametry lisů řady LMZ [2]

	LMZ 1000	LMZ 1600	LMZ 2500	LMZ 4000	LMZ 6500
Jmenovitá tvářecí síla [kN]	10000	16000	25000	40000	65000
Průchod [mm]	1120	1290	1470	1850	2300
Upínací plocha stolu [mm]	1080x950	1240x1150	1420x1400	1800x1700	2200x2000
Upínací plocha beranu [mm]	1010x850	1160x1035	1350x1250	1550x1700	2100x1890
Zdvih/počet zdvihů [mm/min ⁻¹]	220/100	270/85	320/70	380/60	480/45
Instalovaný výkon [kW]	55	75	130	200	400
Rozměry stroje [m]	2.3x3.0x4.9	3.2x3.7x5.8	3.8x4.2x3.7	5.9x5.9x7	7.0x5.9x8.8

Na obrázku 6 jsou popsány základní části stroje, z nichž některé budou popsány v dalších kapitolách:



Obrázek 6: Části lisu řady LMZ [2]

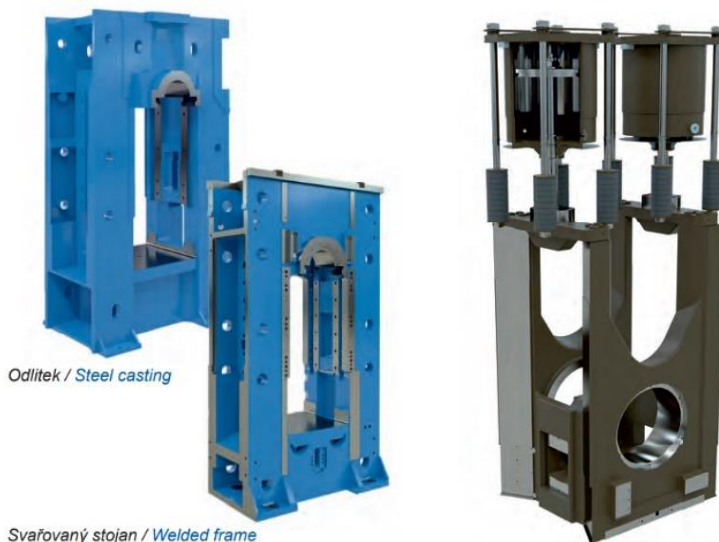
2.1.1 Stojan

Stojan lisu je vyroben jako odlitek nebo svařenec, viz obrázek 7 vlevo. Tuhá skříňová konstrukce je navržena tak, aby jeho deformace při nominální síle byla minimální a aby dovolovala mimořádné zatěžování v rozsahu běžných kovacíh procesů. Plocha stolu je opatřena deskou chránící stůl před poškozením. Závity pro upínání upínačů zápustek jsou opatřeny výměnnými vložkami. [2]

2.1.2 Beran

Beran je odlitek z jednoho kusu slitinové oceli na odlitky. Tvar vedení beranu v lištách stojanu ve tvaru „X“ snižuje vliv rozdílných teplot dílů soustavy na velikost vůlí ve vedení. Hlavní hřídel a čep beranu jsou vyrobeny z výkovků ze zušlechťených slitinových ocelí odolných proti únavě materiálu. Ojnice je vyrobena z oceli na odlitky. Kluzná pouzdra ojnice a beranu jsou vyrobena z bronzů a zaškrábána pro dosažení ideálních kluzných vlastností. Spodní plocha beranu je opatřena deskou, která chrání povrch beranu před poškozením. Závity pro upínání upínačů zápustek jsou opatřeny výměnnými vložkami. [2]

Beran je pneumaticky vyvažován – vymezují se vůle v kluzných uloženíh výstředníkového mechanismu před kontaktem nástrojů s výkovkem, zabraňuje tvrdým rázům a tím prodlužuje životnost bronzových kluzných ložisek a ostatních klíčových součástí. Dva pneumatické válce vyvažování beranu jsou umístěny na horní ploše stojanu. Na jejich pístnicích je zavěšen beran. Síla pneumatických válců působí proti součtu setrvačných a gravitačních sil beranu, jeho mechanismů a horní poloviny upínače s nástroji. [2]

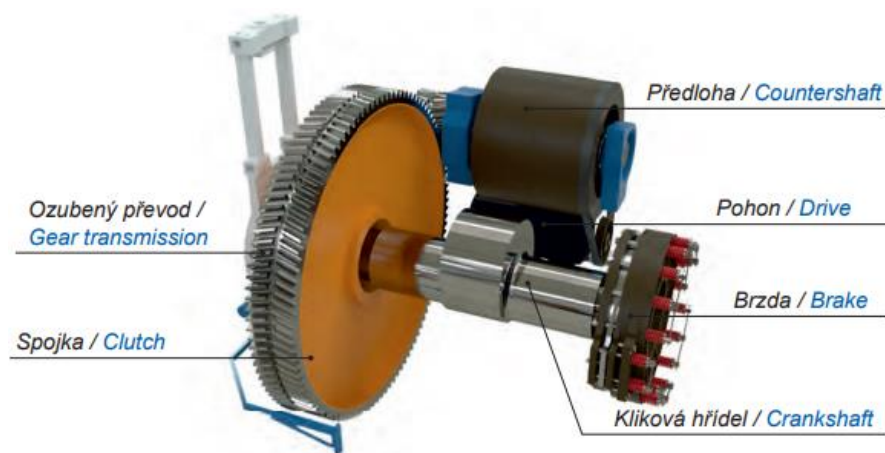


Obrázek 7: Provedení stojanů (vlevo) a beran s vyvažováním (vpravo) [2]

2.1.3 Hlavní hřídel a předloha

Předloha je součástí strojů s vyššími tvářecími silami – u lisů LMZ 2500 a LMZ 4000 a je uložena ve stojanu ve valivých ložiskách. U lisu LMZ 6500 jsou předlohy dvě. Hřídel předlohy je vyroben z výkovku ze slitinové oceli a je tepelně zpracován pro dosažení optimální odolnosti proti únavě materiálu. Předloha je poháněna klínovými řemeny. Na hřídeli je namontován setrvačnický a pastorek ozubeného převodu, který je vyroben z výkovku ze slitinové oceli. [2]

Výstředníkový hřídel je uložen ve stojanu v bronzových kluzných ložiskách zaškrábaných pro dosažení optimálních kluzných vlastností. Na konci hřídele je na valivých ložiskách uloženo ozubené kolo zabírající s pastorkem předlohy. Na opačném konci hlavního hřídele je namontována brzda, viz obrázek 8. [2]



Obrázek 8: Předloha a hlavní hřídel [2]

2.1.4 Brzda a spojka

Brzda lisu je lamelová, třecí a je pneumaticky ovládána tyčí spojenou s pístem spojky u lisů LMZ 1000 a LMZ 1600. U větších lisů je ovládána elektropneumatickým ventilem. Pevné lamely brzdy jsou uloženy ve vedení konzol brzdy na tělese stojanu, rotující lamely jsou uloženy v evolventním ozubení brzdového náboje hlavního hřídele. Brzda je chlazena vodou. [2]

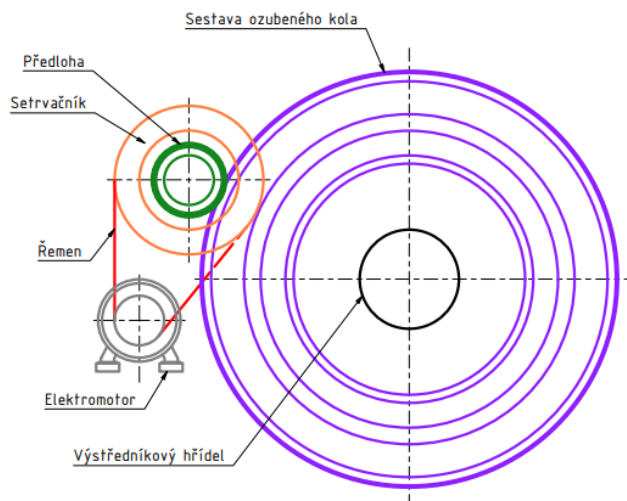
Spojka lisu je lamelová, třecí a je ovládána elektropneumatickým ventilem. U menších lisů LMZ 1000 a LMZ 1600 je spojka uložena na zadní straně hlavního hřídele v setrvačnicku, u větších lisů je integrována v ozubeném kole. Lamely jsou vedeny ve věnci kola a na spojkovém náboji hlavního hřídele v evolventních ozubeních. [2]

2.1.5 Třetí ložisko

Třetí ložisko je instalováno pouze u lisu LMZ 4000 a slouží ke snížení silových účinků na kluzná ložiska hlavního hřídele a nadlehčování hmoty ozubeného kola se spojkou. Ložisko je uloženo za spojkou na nosníku, který dosahuje ze stojanu na ozubené kolo. Náboj spojky je uloženo ve valivém ložisku třmenu páky třetího ložiska. Třmen nadlehčuje silou nastavenou pomocí talířových pružin hmotnosti ozubeného kola, spojky a hřídele. [2]

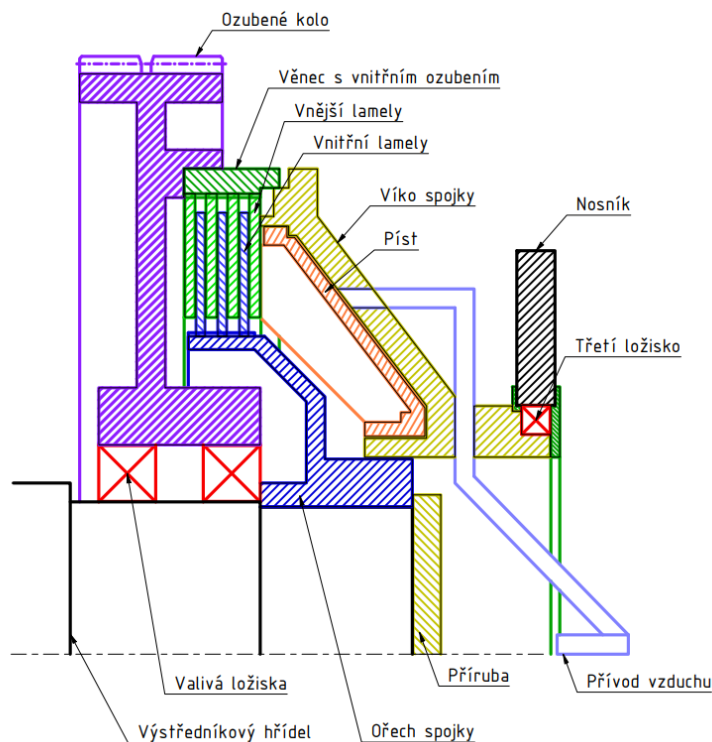
2.2 Princip lisu LMZ 4000

Kroučící moment od asynchronního elektromotoru je klínovými řemeny přenášen na setrvačnick uložený na předlohovém hřídeli. Na předloze je umístěn pastorek, který zabírá s ozubeným kolem. Soukolí má šípové ozubení (tvořené dvojicí šikmých zubů) za účelem eliminace axiálních sil v ložiskách. Schéma pohonu ozubeného kola je na obrázku 9.



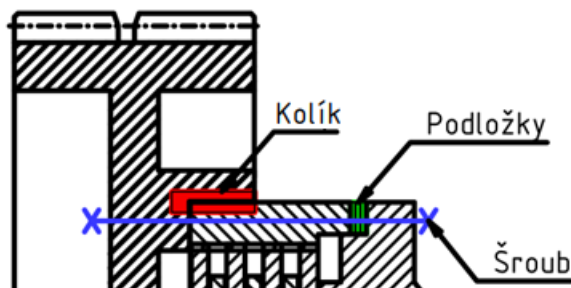
Obrázek 9: Schéma pohonu ozubeného kola

Ozubené kolo je uloženo na výstředníkovém hřídeli na dvouřadých soudečkových ložiskách. Díky tomuto uložení se může ozubené kolo točit nezávisle na hřídeli. Detail ozubeného kola je na obrázku 10.



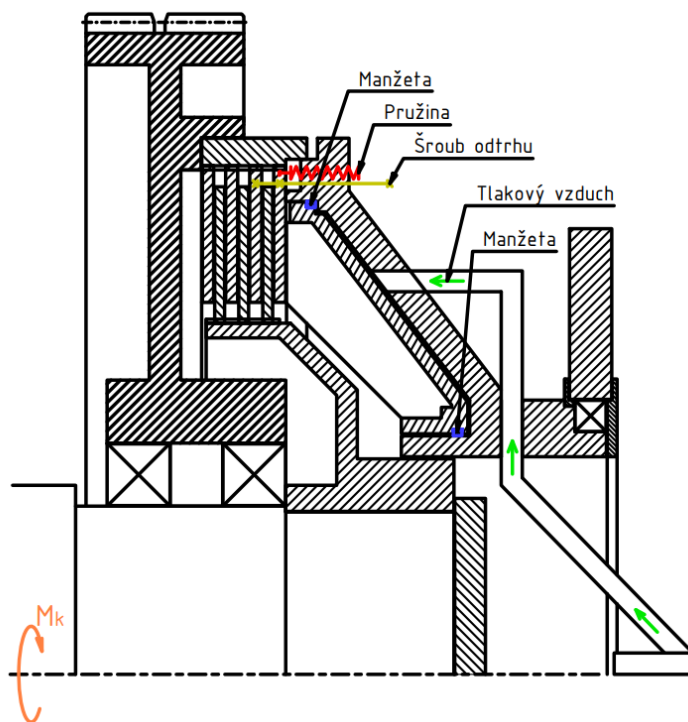
Obrázek 10: Schéma ozubeného kola

V ozubeném kole je vestavěna pneumaticky ovládaná třecí lamelová spojka spolu s nalisovaným věncem spojky, který je zajištěný kolíky. Ozubené kolo s nalisovaným věncem je spojeno s víkem spojky pomocí šroubů. Vzdálenost mezi víkem spojky a ozubeným věncem je dána tloušťkou a počtem podložek, viz obrázek 11.



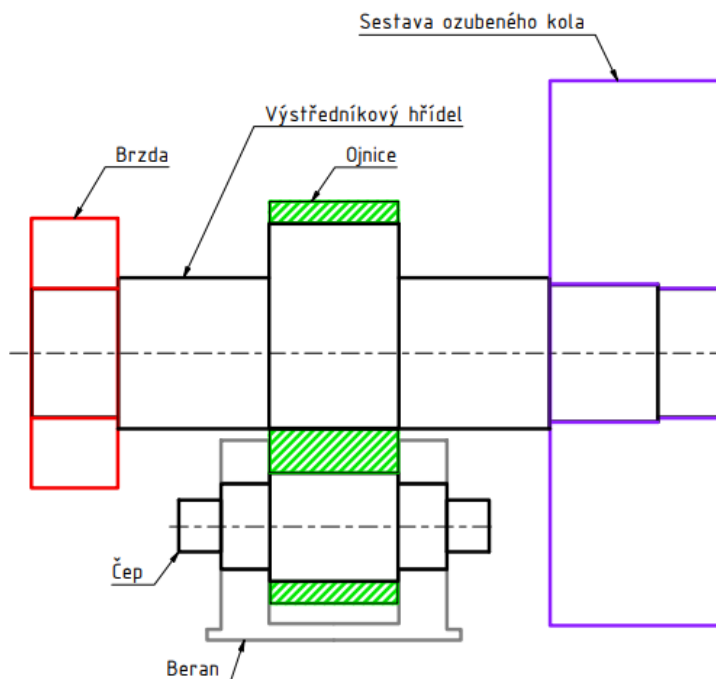
Obrázek 11: Detail uložení ozubeného věnce a lamelové spojky

Pokud operátor spustí nožní spínač, pneumatickým ventilem začne proudit tlakový vzduch, který působí na plochu pístu, který je utěsněný pístovými manžetami. Píst následně sevře lamely a dojde ke stlačení pružiny, která je spojena s krajní lamelou (viz obrázek 12). Tím dojde k dočasnému spojení a dočasnému přenosu kroutícího momentu z ozubeného kola na ořech spojky a na výstředníkový hřídel. Ořech spojky je spojený s hlavním výstředníkovým hřídelem pomocí kolíků.



Obrázek 12: Popis ostatních částí ozubeného kola

Roztočení výstředníkového hřídele uvede do pohybu ojnici. Ta přes čep v beranu uvede do chodu beran z horní do dolní úvratě. Zhruba 30° před dokončením jednoho cyklu, řídicí systém automaticky odpojí spojku, sepně brzdu a ta zabrzdí výstředníkový mechanismus v jeho horní úvratě. Schéma výstředníkového hřídele je na obrázku 13.



Obrázek 13: Schéma výstředníkového hřídele

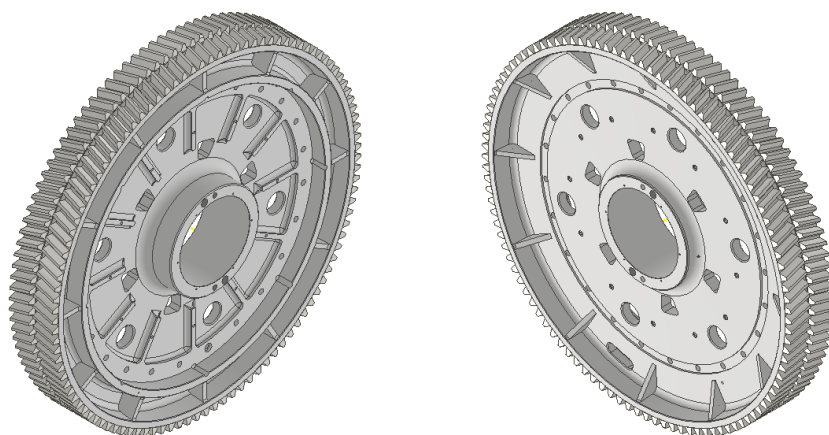
Při vypnutí spojky je tlakový vzduch vytlačován zpátky a stlačené pružiny, které jsou spojeny s krajní lamelou, se roztáhnou a vrátí píst do původní polohy. K uvolnění vnitřních lamel, tj. lamel umístěných na ořechu spojky, napomáhá spojení lamel věnce se šroubem odtrhu.

3 Studium možností stavby svařovaného ozubeného kola

V této kapitole bude proveden variantní návrh svařovaného ozubeného kola. Následně bude provedena rešerše možných způsobů technologie výroby dílčích komponent. Dále bude vybrána optimální varianta pomocí vícekritériální metody rozhodování, pro kterou budou stanoveny přídatky na obrábění. Na závěr kapitoly budou doporučeny technologie výroby jednotlivých dílů a bude nastíněno ekonomické zhodnocení mezi odlitkem a svařencem.

3.1 Stávající provedení ozubeného kola

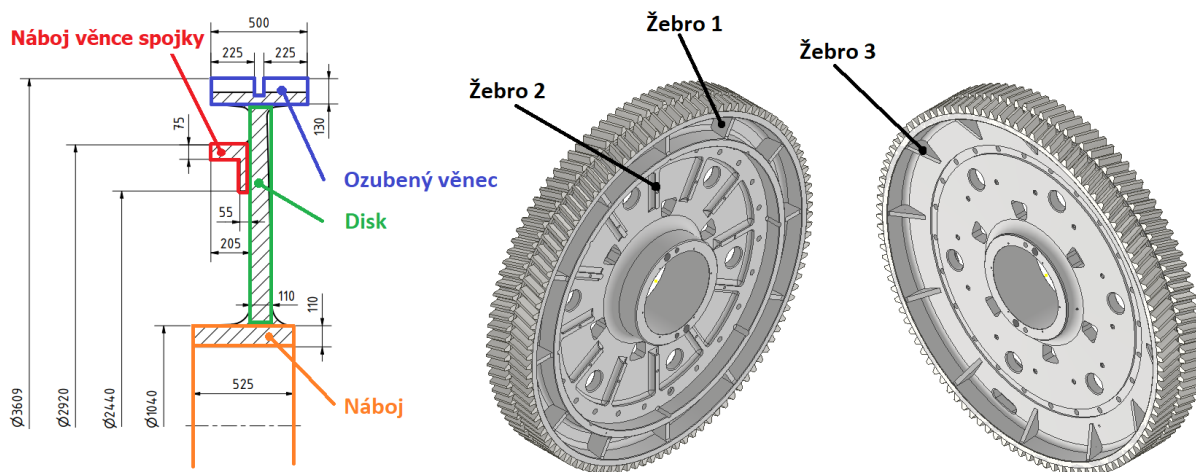
Na obrázku 14 byl v Inventoru 2021 na základě poskytnuté výrobní dokumentace vytvořen model stávajícího ozubeného kola řešeného jako odlitek.



Obrázek 14: Stávající provedení odlévaného ozubeného kola

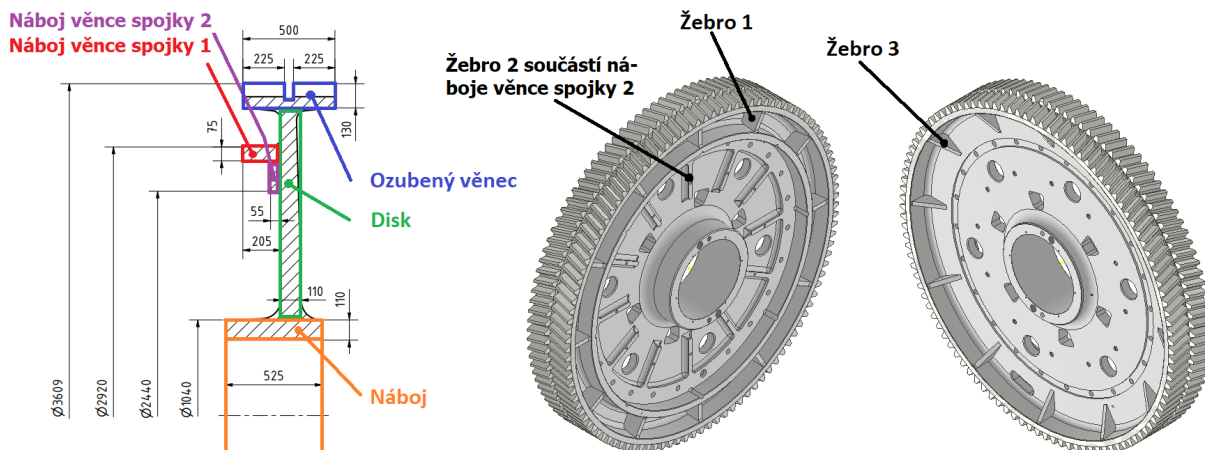
3.2 Variantní návrh svařovaného ozubeného kola

Protože je cílem navrhnout svařenec, je optimální rozdělit původní odlitek na co nejmenší počet částí kvůli nízkému počtu svarů a zároveň nízkému vnesení tepla do konstrukce svařence. Zároveň je cílem volit jednoduché a snadno vyrobitelné tvary. Na obrázku 15 je vidět první návrh, který se skládá z náboje věnce spojky, ozubeného věnce, disku, náboje a tří typů žebrování.



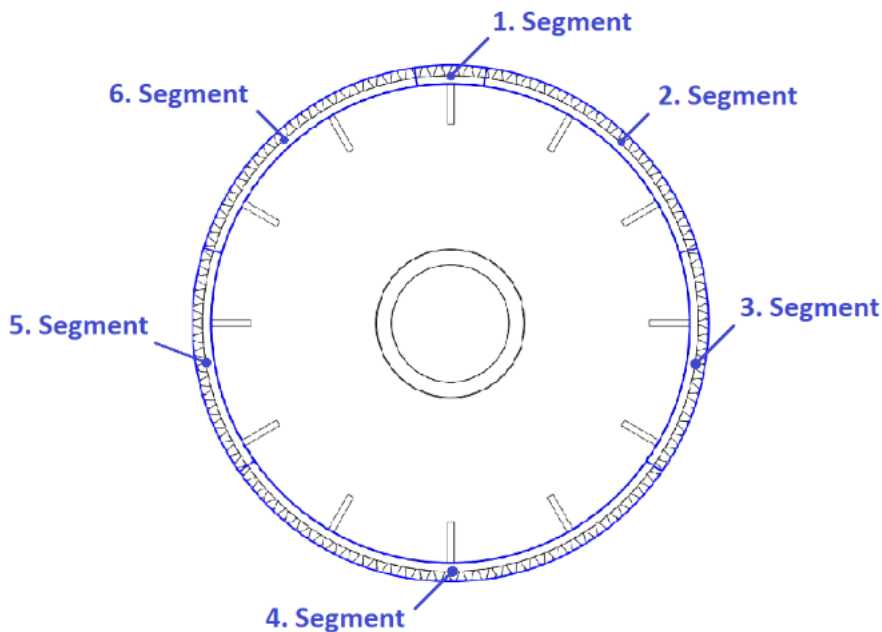
Obrázek 15: Návrh rozdělení kola I

Na obrázku 16 je vidět druhý návrh, lišící se oproti prvnímu návrhu rozdělením náboje věnce spojky na dvě jednodušší části, kde jsou navíc žebra 2 výhodně vyrobena společně s nábojem věncem spojky 2.



Obrázek 16: Návrh rozdělení kola II

Ve třetím návrhu se počítá s rozdělením ozubeného věnce do několika segmentů, což může a často i bývá pro takto rozměrné věnce výhodné z hlediska výroby. Na obrázku 17 je vidět příklad rozložení věnce do 6 segmentů.



Obrázek 17: Návrh rozdělení kola III

3.3 Možnosti technologie výroby dílčích částí svařence

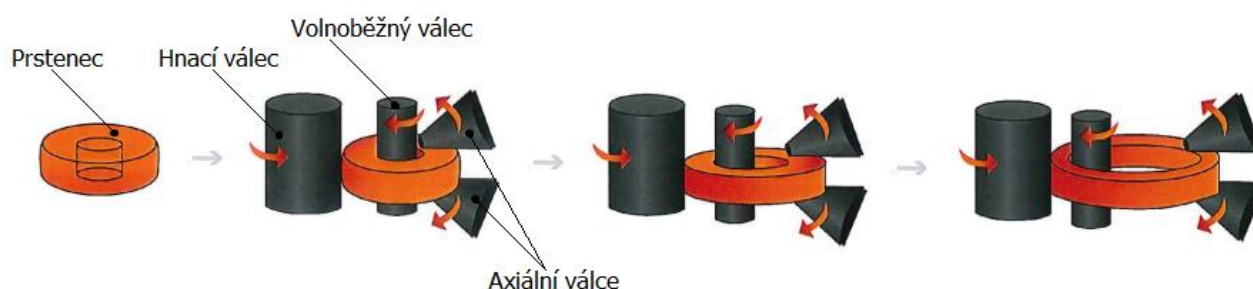
3.3.1 Válcové části ve tvaru kroužků – náboj, ozubený věnec, náboj věnce spojky 1

1) Válcování

Výroba bezešvých kovaných kroužků se nejčastěji provádí válcováním kroužků na válcovacích stolicích různých velikostí, které umožňují výrobu kovaných kroužků s vnějšími průměry od pár desítek milimetrů až po několik metrů s hmotností až do 130 tun. [3]

Proces válcování kroužků začíná s válcovým polotovarem, ve kterém se pomocí ploché raznice zhotoví otvor. Vzniklý prstenec se zahřeje nad teplotu rekrystalizace a umístí se na volnoběžný válec nebo trn. Tento volnoběžný válec se pak pod tlakem pohybuje směrem k hnacímu válci, který se neustále otáčí a zmenšuje tloušťku stěny, čímž se zvětšují průměry (vnější i vnitřní) výsledného prstence. Schéma výroby je na obrázku 18. [3]

Bezešvé válcované kroužky lze vyrábět v konfiguracích od plochých dílů podobných podložkám až po vysoké válcové tvary s výškou až 2 metry. Poměr tloušťky stěny k výšce kroužků se obvykle pohybuje od 1:16 do 16:1, i když speciálním zpracováním lze dosáhnout větších poměrů. Nejjednodušším a nejčastěji vyráběným tvarem je prstenec obdélníkového průřezu, ale při použití tvarových nástrojů lze vyrobit prstence složitějších či nestandardních tvarů. [3]



Obrázek 18: Výroba ozubeného věnce válcováním [4]

Technologii válcování zajišťuje například česká firma Bohemia rings s.r.o. V tabulce 3 jsou vidět maximální parametry kroužků:

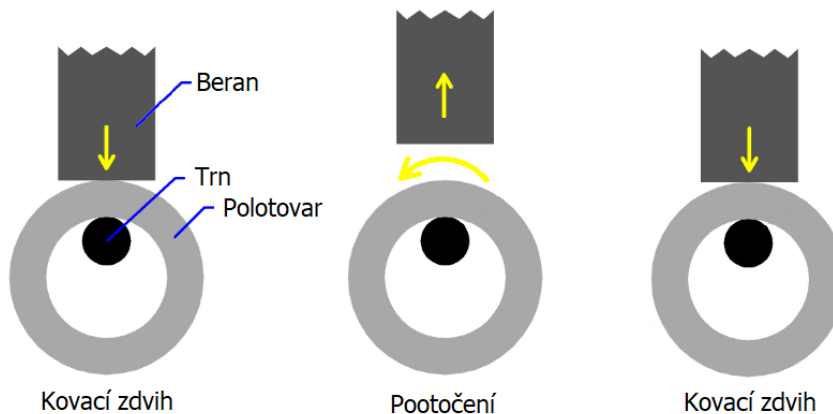
Tabulka 3: Výrobní možnosti válcovaných kroužků firmy Bohemia rings s.r.o [5]

Maximální průměr kroužku	Maximální výška kroužku	Maximální hmotnost kroužku
4000 mm	630 mm	6500 kg

2) Volné kování

Kování kroužků je jiný výrobní proces než válcování kroužků, ale oba mají podobné rysy. Jednou z důležitých podobností je, že se v obou případech jedná o operace tváření kovů, které ovlivní mechanické vlastnosti materiálu kroužku. V první fázi kování kroužku se zhotoví otvor podobně jako u válcování. [6]

Jakmile je polotovár proražen skrz naskrz, je připraven ke kování. Prstenec se nasadí na trn a je poté tvarován pohybem kovací matrice nahoru a dolů, která shora razí do materiálu, přičemž se dílec postupně otáčí v řadě kroků, které vykovávají prsten do konečné velikosti, viz obrázek 19. [6]



Obrázek 19: Výroba ozubeného věnce kováním [6]

Technologii volného kování zajišťuje například česká firma TRIANGOLO spol. s.r.o (tabulka 4) nebo česká firma CZECH PRECISION FORGE a.s (tabulka 5):

Tabulka 4: Výrobní možnosti volně kovaných kroužků firmy TRIANGOLO spol. s.r.o [7]

Max. průměr	Max. výška	Max. hmotnost
1000 mm	480 mm	800 kg

Tabulka 5: Výrobní možnosti volně kovaných kroužků firmy CZECH PRECISION FORGE a.s [8]

Max. vnější průměr	Max. vnitřní průměr	Max. výška	Max. hmotnost
1500 mm	1350 mm	500 mm	2500 kg

3) Zakružování

Další způsob výroby kroužku je zakružováním z plechu. U plechu je nutné před samotným zakroužením upravit svarové plochy dle požadovaného svaru (například úkos do oboustranného V, U, W, Y) v závislosti na tloušťce materiálu či požadované kvalitě provaření. Zakružovaný plech může být vyroben z jednoho kusu (pouze jeden svar), kde je nutné počítat s předohybem snižujícím přesnost, anebo může být vyroben ze dvou kusů, kde je sice tato nepřesnost odstraněna, nicméně jsou zde zapotřebí svary dva. Příklad výroby kroužku z jednoho kusu je na obrázku 20.

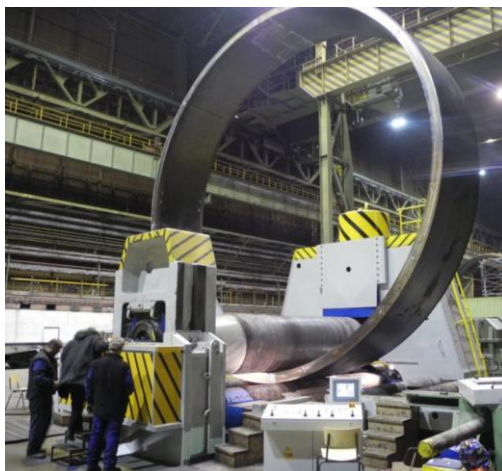


Obrázek 20: Výroba kroužku zakružováním z plechu [9]

Technologii zakružování zajišťuje například česká firma PSP Machinery s.r.o na stroji BDUWO 150/4, viz obrázek 21. V tabulce 6 jsou vypsány maximální parametry zakružovaného plechu.

Tabulka 6: Maximální parametry zakružovacího stroje BDUWO 150/4 [10]

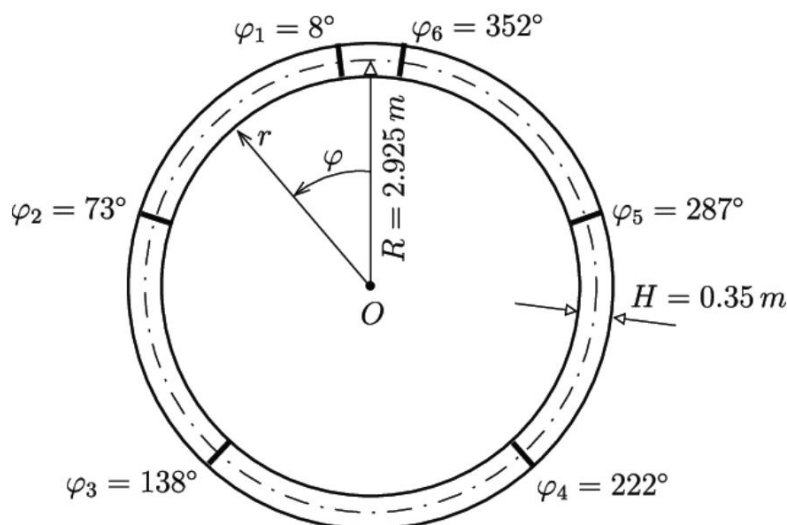
Max. tloušťka plechu	Max. šířka plechu	Max. průměr plechu
210 mm	1500 mm	12000 mm



Obrázek 21: Zakružování na stroji BDUWO 150/4 [10]

4) Segmenty

Poslední alternativou je vyrobení polotovaru pomocí několika obloukových segmentů, které by se následně k sobě svařily. Tato metoda je vhodná pro součásti velmi vysokých průměrů a velkých tlouštěk a tam, kde není jiná alternativa. Nevýhodou je potřeba většího množství svařování, s čímž souvisí větší množství vneseného tepla do svařence, což negativně ovlivňuje přesnost a cenu svařence. Na obrázku 22 je vidět příklad zhotovení téměř šestimetrové trubky svařené ze 6 segmentů.



Obrázek 22: Příklad výroby věnce ze 6 segmentů [11]

3.3.2 Disk, žebra

1) Pálení plazmou

Na trhu je k dispozici celá řada strojů, například řezací stroj AJAN CNC využívající plazmu (viz obrázek 23), které mohou vyrobit přesné výpalky o tloušťkách od 100 do 200 milimetrů. [12]



Obrázek 23: Řezací stroj AJAN CNC [12]

2) Řezání vodním paprskem

Vodním paprskem lze docílit řezání materiálů podobných tloušťek jako u plazmy. Výhodou vodního paprsku je řezání studeným řezem, kdy nedochází ke změně vlastností v okolí řezaného materiálu vlivem tepla. Díky tomu se řezaný materiál hodí více k následnému obrábění či svařování oproti materiálu páleném plazmou. Nevýhodou je menší řezná rychlost a produktivita.

3.4 Výběr optimální varianty

Na základě kapitoly 3.2 byly vybrány celkem 4 varianty rozdělení původního odlitku kola:

Varianta A – Rozdělení kola dle obrázku 15

Varianta B – Rozdělení kola dle obrázku 16

Varianta C – Rozdělení kola dle obrázku 15, věnec je rozdělený na segmenty dle obrázku 17

Varianta D – Rozdělení kola dle obrázku 16, věnec je rozdělený na segmenty dle obrázku 17

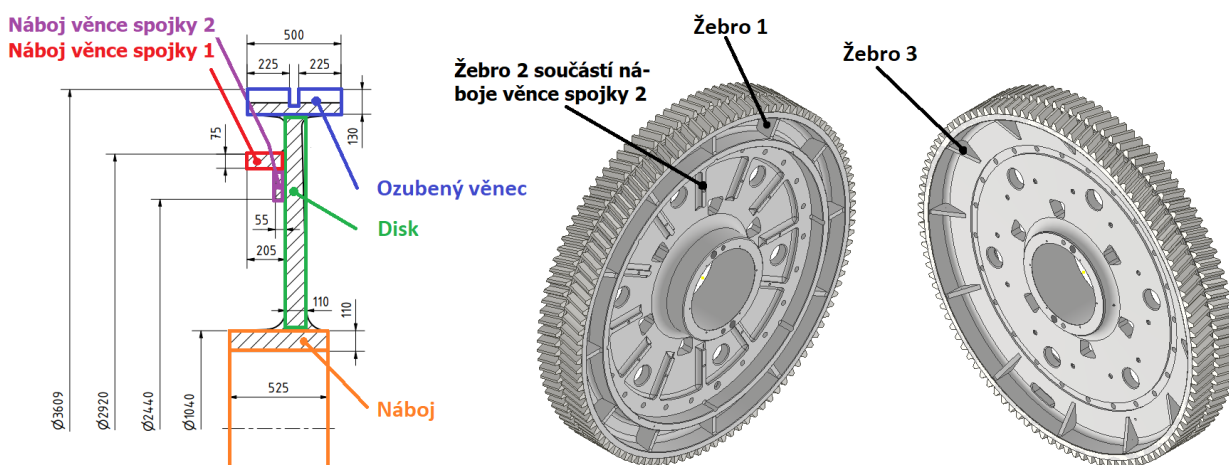
Varianty A-D jsou hodnoceny pomocí vícekritériální metody rozhodování v tabulce 7. Hodnotícími kritérii byly zvoleny: jednoduchost výroby jednotlivých dílů, svary (z hlediska jejich počtu a délky), montáž a manipulace, výsledná přesnost a dodatečné obrábění po zavaření. Škála vah byla uvažována od 3 (nejméně důležitá) do 5 (nejvíce důležitá) a škála hodnocení jednotlivých variant od 0 (nejhorší ohodnocení daného kritéria) do 10 (nejlepší ohodnocení daného kritéria).

Tabulka 7: Vícekritériální metoda rozhodování

Kritérium hodnocení	Váha kritéria	Hodnocení varianty			
		A	B	C	D
Jednoduchost technologie výroby	3	3	4	8	9
Svary	5	9	7	3	2
Montáž, manipulace	4	8	10	4	5
Výsledná přesnost	5	8	10	4	5
Dodatečné obrábění	4	4	8	4	8
Vážené hodnocení		126	137	75	82

Příklad hodnocení kritéria Svary – Varianta A je z hlediska svařování nejpříznivější. Varianta B se liší rozdělením náboje věnce spojky na 2 dílčí části, tudíž je zde na rozdíl od varianty A potřeba jednoho svaru navíc. Varianty C a D mají rozdělený ozubený věnec na dílčí segmenty, tudíž je zde mnohonásobně více svařování oproti variantám A a B. Varianta C je oproti variantě D příznivější ze stejného důvodu, jako je varianta A příznivější oproti variantě B.

Na základě tabulky 7 volím variantu č. B. Svařované ozubené kolo se bude skládat z ozubeného věnce, disku, náboje věnce spojky 1 a náboje věnce spojky 2, který je vyroben společně s žebro 2, náboje a dvou dalších typů žebor (žebro 1 a žebro 3). Optimální varianta je na obrázku 24.



Obrázek 24: Optimální varianta

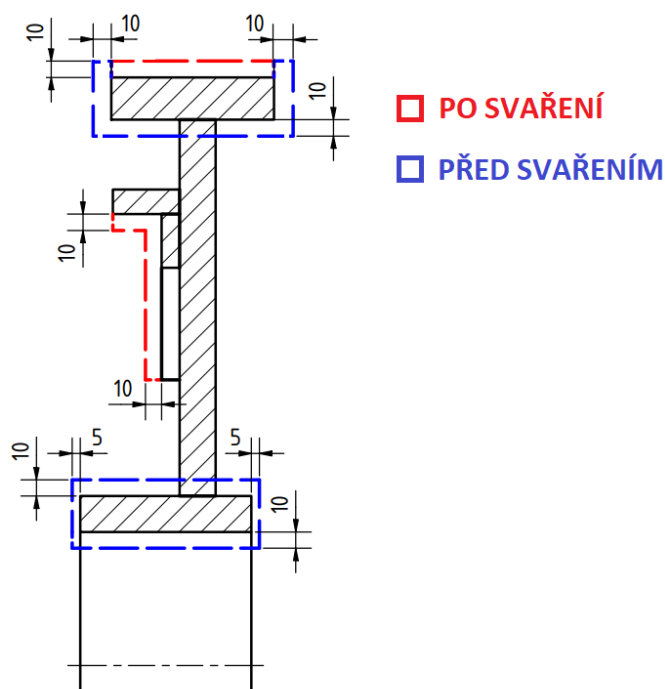
3.5 Přídavky na obrábění

V této kapitole bude proveden návrh přídavků pro obrábění. Nejprve je nutné rozlišit plochy, které se mohou obrábět před svařováním a plochy, které je nutné obrábět až po svařování.

Plochy, které se musí obrábět před svařováním, jsou plochy pro přesné usazení disku, tj. vnější průměr náboje a vnitřní průměr ozubeného věnce. Dále se bude obrábět vnitřní průměr náboje, protože se zde nepředpokládá negativní vliv tepelných deformací od svařování na výslednou přesnost. Nakonec budou obrobena čelní plochy náboje a ozubeného věnce. Obrábění přídavků před svařováním je výhodné zejména kvůli své jednoduchosti (je jednodušší obrábět jednotlivé komponenty, než celý svařenec) a s tím související konečné ceně.

Plochy, které je nutné obrobít až po svaření, vyžadují velmi vysokou přesnost a kvalitu povrchu. Pokud by se obrobily před svařením, vlivem tepelných deformací od svařování by tyto plochy již nemusely plnit požadovanou funkci v požadované kvalitě a přesnosti. Jedná se o vnější průměr ozubeného věnce, kde se bude obrábět ozubení, dále vnitřní plocha náboje věnce spojky, do které se nalisuje věnec spojky, a nakonec čelní plocha žebor 2 pro správné uložení a dosednutí krajní lamely.

Velikost jednotlivých přídavků byla volena dle strojnických tabulek. Některé hodnoty byly mírně korigovány po diskuzi s konzultantem práce na základě empirických zkušeností. Kompletní návrh přídavků je vidět na obrázku 25.



Obrázek 25: Přidavky na obrábění pro optimální variantu

V tabulce 8 jsou uvedeny rozměry jednotlivých částí svařovaného kola v různých fázích výroby:

Tabulka 8: Rozměry dílčích komponent kola

Komponenta	Hlavní (konečné) parametry											
	Vnější průměr [mm]			Vnitřní průměr [mm]			Tloušťka [mm]			Délka [mm]		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Ozubený věnec	3629	3629	3609	3329	3349	3349	150	140	130	520	500	500
Náboj věnce spojky 1	2920	2920	2920	2750	2750	2770	85	85	75	205	205	205
Náboj věnce spojky 2	2750	2750	2750	1600	1600	1600	65	65	55	x	x	x
Disk	3349	3349	3349	1040	1040	1040	110	110	110	x	x	x
Náboj	1060	1040	1040	800	820	820	130	110	110	535	525	525

X – Rozměry komponent před svařením a před prvotním obrobením

Y – Rozměry komponent před svařením a po prvotním obrobením

Z – Rozměry komponent po svaření a po finálním obrobení

3.6 Výběr technologie výroby, ekonomické zhodnocení

V tabulce 9 je seznam všech částí optimálního návrhu svařovaného ozubeného kola, ke kterým byla přiřazena doporučená technologie výroby a její možná alternativa.

Doporučenou technologií pro ozubený věnec bylo vybráno zakružování a alternativou bylo vybráno válcování. Zakružování bylo vybráno na základě dostupnosti výroby v blízkém okolí (na rozdíl od válcování, u kterého se z důvodu vysoké hmotnosti nenašel v okolí výrobce).

Pro náboj věnce spojky 1 byla vybrána technologie válcování a alternativou bylo zvoleno zakružování. V tomto případě vychází válcování levněji, jelikož zde na rozdíl od zakružování není potřeba svařování. Kvůli menší hmotnosti oproti ozubenému věnci je již výroba realizovatelná firmami z okolí.

Pro náboj věnce spojky 2, disk a žebra 1 a 3 bylo zvoleno řezání vodním paprskem. Tato metoda je oproti pálení plazmou výhodnější z důvodu studeného řezu, který je vhodný pro díly, které se plánují dále obrábět a svařovat.

Náboj je nejvýhodnější válcovat, zakružování zde nepřichází k úvahu kvůli poměru malého vnějšího průměru a velké tloušťce. Alternativou je volné kování, nicméně pro tuto variantu by bylo nutné zvýšit přídatky na oba průměry kvůli menší přesnosti výroby.

Na základě vytvořených nákrešů a modelů (již s přídatky) bylo konzultantem práce poskytnuto nacenění od výrobců pro doporučené technologie výroby jednotlivých dílů, které je rovněž součástí tabulky 9.

Tabulka 9: Výběr technologie jednotlivých dílů

Komponenta	Doporučená technologie	Alternativa	Cena
1x Ozubený věnec	Zakružování (+svaření)	Válcování	1 004 408 Kč
1x Náboj věnce spojky 1	Válcování	Zakružování	103 424 Kč
1x Náboj věnce spojky 2	Řezání vodním paprskem	Pálení plazmou	66 128 Kč
1x Disk	Řezání vodním paprskem	Pálení plazmou	260 228 Kč
1x Náboj	Válcování	Volné kování	140 123 Kč
12x Žebro 1	Řezání vodním paprskem	Pálení plazmou	10 362 Kč
12x Žebro 3	Řezání vodním paprskem	Pálení plazmou	5 181 Kč

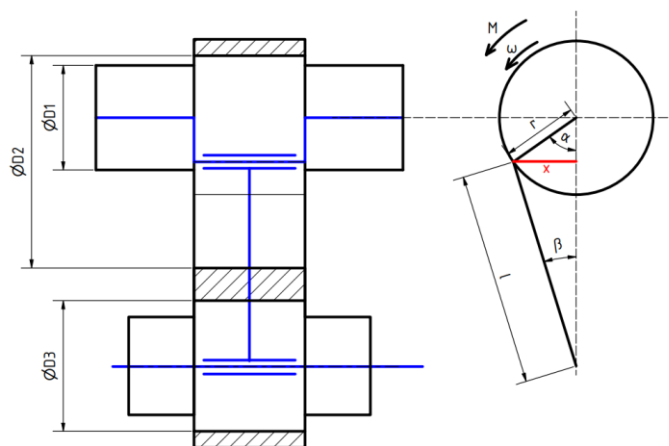
Pro kvalitní ekonomické zhodnocení je nutné provést analýzu veškerých nákladů na svařované ozubené kolo. Z tabulky 9 je známá cena jednotlivých dílů od výrobců. K této ceně je nutné přičíst cenu předobrobení jednotlivých dílů, která bude záviset na použitém výrobním stroji a jeho hodinové sazbě, dále cenu svařování včetně výroby jednotlivých úkosů a samotného zkoušení svarů, cenu tepelného zpracování na odstranění vnitřního pnutí po svařování (které je nutné provést externě) včetně dopravy, a nakonec cenu konečného obrábění, které je opět závislé na použitém stroji a jeho hodinové sazbě. Tato konečná cena by se následně porovnála s cenou odlitku. Z důvodu obchodního a výrobního tajemství nebude tato kapitola více zpracována.

4 Stanovení zatížení navrženého kola a kontrola provozuschopnosti

V první části této kapitoly bude stanoven moment potřebný pro dosažení jmenovité síly lisu. V druhé části bude provedeno posouzení provozuschopnosti na základě vyhodnocení únosnosti boků zubů v dotyku a únosností zubů v ohybu.

4.1 Stanovení momentu pro vyvození jmenovité síly lisu

Na obrázku 26 je znázorněno schéma výstředníkového mechanismu lisu LMZ 4000. Hodnoty geometrie mechanismu byly získány z katalogu nebo poskytnuty konzultantem práce.



Obrázek 26: Schéma výstředníkového mechanismu

Znamé hodnoty:

$D_1 = 670 \text{ mm}$	Průměr výstředníkového hřídele
$D_2 = 1060 \text{ mm}$	Průměr části hřídele s výstředností
$D_3 = 750 \text{ mm}$	Průměr čepu beranu
$r = 190 \text{ mm}$	Výstřednost (vzdálenost osy rotace a osy výstředníkové části hřídele)
$f_{\xi} = 0,035$	Součinitel čepového tření
$F_j = 40 \text{ MN}$	Jmenovitá síla lisu
$l = 1270 \text{ mm}$	Délka výstředníkové tyče
$\alpha = 7,5^\circ$	Úhel natočení výstředníkové části hřídele

Z obrázku 26 je patrné, že platí:

$$\sin \alpha = \frac{x}{r} \Rightarrow x = \sin \alpha \cdot r$$

$$\sin \beta = \frac{x}{l} \Rightarrow x = \sin \beta \cdot l,$$

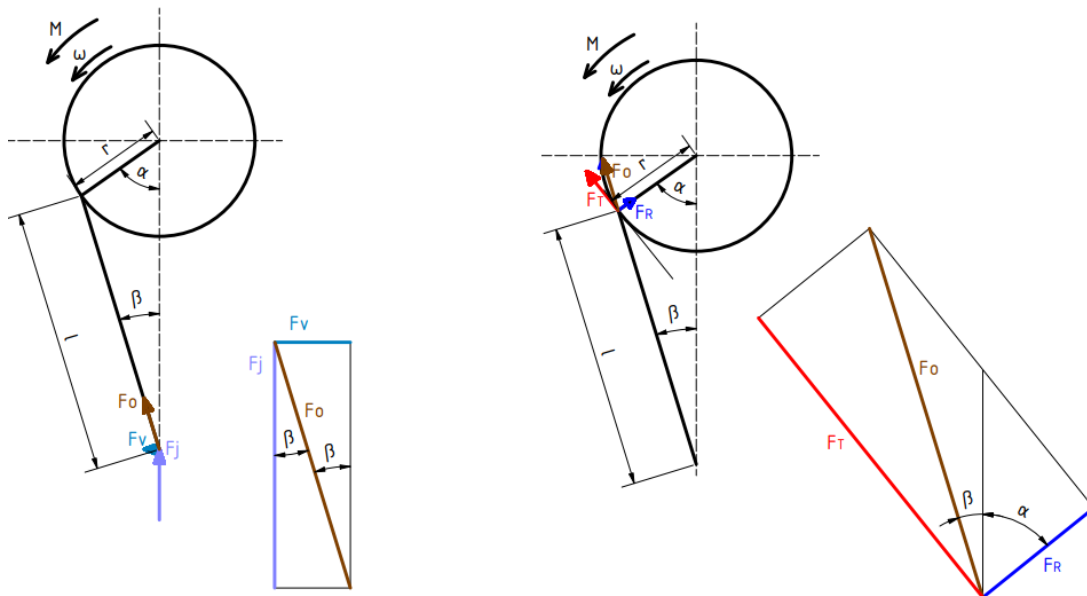
kde

β Úhel natočení výstředníkové tyče

Dosažením rovnic a následné úpravě dostaneme zdvihovou závislost úhlu beta na úhlu alfa.

$$x = \sin \alpha \cdot r = \sin \beta \cdot l \Rightarrow \beta = \arcsin \left(\frac{r}{l} \cdot \sin \alpha \right) = \arcsin \left(\frac{190}{1270} \cdot \sin 7,5^\circ \right) = 1,119^\circ$$

Pro stanovení momentu potřebného pro vyvození jmenovité síly beranu je nutné určit tečnou složku síly ve výstředníkové tyči. Tu získáme ze silových trojúhelníků.



Obrázek 27: Rozklad sil - silový trojúhelník

Na obrázku 27 vlevo je vidět rozklad síly ve výstředníkové tyči F_o na jmenovitou sílu lisu F_j a sílu ve vedení F_v . Závislost síly ve výstředníkové tyči a jmenovité síly lisu je dána rovnicí:

$$\cos \beta = \frac{F_j}{F_o} \Rightarrow F_o = \frac{F_j}{\cos \beta} = \frac{40}{\cos 1,119^\circ} = 40,00763 \text{ MN}$$

Tečnou složku síly ve výstředníkové tyči F_T získáme z obrázku 27 vpravo:

$$\sin (\alpha + \beta) = \frac{F_T}{F_o} \Rightarrow F_T = F_o \cdot \sin (\alpha + \beta) = 40,00763 \cdot \sin (7,5^\circ + 1,119^\circ) = 5,99567 \text{ MN}$$

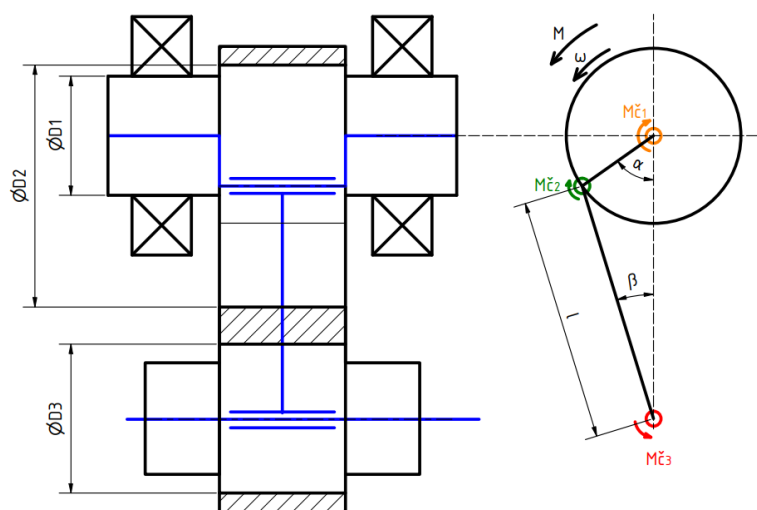
Potřebný moment lze nyní vyjádřit pomocí získané tečné síly. Tento vztah ovšem nezohledňuje vliv pasivních odporů.

$$M' = F_T \cdot r = 5,99567 \cdot 190 \cdot 10^{-3} = 1,139 \text{ MNm} ,$$

kde

M' Moment potřebný k dosažení jmenovité síly, bez uvážení pasivních odporů

V našem případě máme celkem 3 pasivní odpory (viz obrázek 28) – čepové tření mezi hřídelem a stojanem, čepové tření mezi hřídelem a výstředníkovou tyčí a čepové tření mezi výstředníkovou tyčí a čepem.



Obrázek 28: Pasivní odpory ve výstředníkovém mechanismu

Pro jednotlivé momenty čepových tření platí:

$$M_{\check{c}1} = F_j \cdot \frac{D_1}{2} \cdot f_{\check{c}} = 40 \cdot \frac{670 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 0,035 = 0,469 \text{ MNm}$$

$$M_{\check{c}2} = F_j \cdot \frac{D_2}{2} \cdot f_{\check{c}} = 40 \cdot \frac{1060 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 0,035 = 0,742 \text{ MNm}$$

$$M_{\check{c}3} = F_j \cdot \frac{D_3}{2} \cdot f_{\check{c}} = 40 \cdot \frac{750 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 0,035 = 0,525 \text{ MNm} ,$$

kde

$M_{\check{c}1}$ Moment čepového tření mezi hřídelem a stojanem (v ložisku)

$M_{\check{c}2}$ Moment čepového tření mezi hřídelem a výstředníkovou tyčí

$M_{\check{c}3}$ Moment čepového tření mezi výstředníkovou tyčí a čepem beranu

Ztrátový moment M_z má tedy velikost:

$$M_z = M_{\check{c}1} + M_{\check{c}2} + M_{\check{c}3} \cdot \frac{r \cdot \cos \beta}{l \cdot \cos \beta} = 0,469 + 0,742 + 0,525 \cdot \frac{190}{1270} = 1,290 \text{ MNm}$$

Celkový potřebný moment pro vyvození jmenovité síly M je dán momentem potřebným k dosažení potřebné jmenovité síly a momentem potřebným k překonání všech pasivních odporů:

$$M = M' + M_z = 1,139 + 1,290 = 2,429 \text{ MNm}$$

Pozn.: Výsledný potřebný moment se mírně odlišuje od momentu, se kterým počítají ve Šmeralu. Tam počítají s hodnotou 2,41 MNm. Tato mírná odchylka mohla být způsobena zaokrouhlením, případně mírně odlišnou volbou některých parametrů (například součinitele čepového tření). Dále v práci bude počítáno s hodnotou 2,41 MNm.

4.2 Posouzení provozuschopnosti

Provozechopností je myšlena schopnost ozubeného soukolí fungovat v požadované životnosti dostatečně bezpečně a bezporuchově pro dané zatížení a provozní podmínky. Pojem dostatečná bezpečnost a bezporuchovost se může v různých případech výrazně lišit. Je nutné ji uvažovat vždy vzhledem k danému použití. Například pro spotřební zboží není efektivní a hospodárné klást obrovské nároky na bezporuchovost a dlouhou životnost. Naopak pro pohony lodí je nutné počítat s velmi vysokou spolehlivostí a dlouhou životností. U kosmických lodí se počítá při krátké životnosti s velmi vysokou spolehlivostí, zatímco u zemědělských strojů se počítá s velmi dlouhou životností při vyšší pravděpodobnosti vzniku poruchy. [13]

Na optimální hodnotu součinitele bezpečnosti a nejmenší hodnotu pravděpodobnosti bezporuchového provozu je tedy nutné nahlížet s velkou pečlivostí tak, aby bylo dosaženo co nejvíce hospodárné konstrukce při rozumných nákladech. Posouzení provozuschopnosti pro ozubené soukolí lisu bude provedeno vyhodnocením únosnosti boků zubů v dotyku a únosností zubů v ohybu dle normy ČSN 01 4686-1/5. Vyhodnocovacím kritériem bude bezpečnost. [13]

4.2.1 Určení potřebných veličin

Pro výpočet únosnosti boků zubů v dotyku a únosností zubů v ohybu je zapotřebí řada parametrů. Ty byly získány z výkresové dokumentace, případně přímo z katalogu ze stránek Šmeralu.

$R_m = 580 \text{ MPa}$	Mez pevnosti v tahu (pro materiál S355J2)
$E = 210 \text{ GPa}$	Modul pružnosti v tahu pro pastorek i hnané kolo
$\mu = 0,3$	Poissonova konstanta pro pastorek i hnané kolo
$b_w = 450 \text{ mm}$	Šířka ozubení
$\beta_{12} = (\pm)15^\circ$	Úhel sklonu zubu
$m_n = 32 \text{ mm}$	Normálový modul soukolí
$d_1 = 762 \text{ mm}$	Průměr roztečné kružnice pastorku
$d_2 = 3545 \text{ mm}$	Průměr roztečné kružnice hnaného kola
$d_{a1} = 826 \text{ mm}$	Průměr hlavové kružnice pastorku
$d_{b1} = 713 \text{ mm}$	Průměr základní kružnice pastorku
$d_{a2} = 3609 \text{ mm}$	Průměr hlavové kružnice hnaného kola
$d_{b2} = 3317 \text{ mm}$	Průměr základní kružnice hnaného kola
$M_{k2} = M = 2,41 \text{ MNm}$	Kroutící moment na hnaném kolu
$P = 200 \text{ kW}$	Výkon elektromotoru
$n_{II} = 1 \text{ ot/s}$	Otáčky výstředníkového hřídele
$z_1 = 23$	Počet zubů pastorku
$z_2 = 107$	Počet zubů hnaného kola
$\alpha_n = 20^\circ$	Normálový úhel záběru
$a = 2153,5 \text{ mm}$	Osová vzdálenost kol

Zbylé hodnoty potřebné k výpočtu jsou dopočítány níže:

Převodový poměr soukolí

$$u = \frac{z_2}{z_1} = \frac{107}{23} = 4,652$$

Čelní úhel záběru

$$\alpha_t = \cot g \frac{tg \alpha_n}{\cos \beta_{12}} = tg^{-1} \left(\frac{tg 20^\circ}{\cos 15^\circ} \right) = 20,65^\circ$$

Obvodová síla na roztečné kružnici

$$F_t = \frac{2 \cdot M_{k2}}{d_2} = \frac{2 \cdot 2,41 \cdot 10^6}{3545 \cdot 10^{-3}} = 1,36 \text{ MN}$$

Krouticí moment na pastorku

$$M_{k1} = \frac{M_{k2}}{\eta \cdot u} = \frac{2,41}{0,98 \cdot 4,652} = 0,53 \text{ MNm}$$

Otáčky předlohového hřídele

$$u = \frac{n_I}{n_{II}} \Rightarrow n_I = u \cdot n_{II} = 4,652 \cdot 1 = 4,652 \text{ ot/s}$$

Obvodová rychlost na roztečné kružnici:

$$v = 2 \cdot \pi \cdot n_2 \cdot \frac{d_2}{2} = 2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot \frac{3545 \cdot 10^{-3}}{2} = 11,17 \text{ m/s}$$

Počet zubů virtuálního hnaného kola

$$z_{v2} = \frac{z_2}{\cos^3 \beta_{12}} = \frac{107}{\cos^3 15^\circ} = 118,7$$

4.2.2 Teorie únosnosti boků zubů v dotyku

Únosnost boků zubů v dotyku je schopnost zajistit bezpečnost vůči progresivní tvorbě pittingů a schopnost zabránit vzniku plastické deformace nebo křehkého lomu povrchové vrstvy. [13]

Pro posouzení této únosnosti bude využit tzv. Hertzův tlak ve valivém bodě:

$$\sigma_H = \sigma_{HO} \cdot \sqrt{K_H},$$

kde:

σ_H Hertzův tlak při skutečném zatížení zubů

σ_{HO} Hertzův tlak při ideálním zatížení zubů (bez působení přídavných/dynamických sil)

K_H Součinitel zohledňující přídavné/dynamické síly

Pro čelní soukolí má Hertzův tlak při ideálním zatížení zubů tvar:

$$\sigma_{HO} = Z_E \cdot Z_H \cdot Z_\varepsilon \cdot \sqrt{\frac{F_t}{b_w \cdot d_1} \cdot \frac{u+1}{u}},$$

kde,

Z_E Součinitel materiálu – respektuje mechanické vlastnosti materiálů spoluzabírajících kol na základě modulu pružnosti a Poissonova čísla

Z_H Součinitel tvaru zubů – respektuje tvar spoluzabírajících boků zubů ve valivém bodě

Z_ε Součinitel součtové délky dotykových křivek boků zubů – respektuje vliv trvání záběru zubů

Z_β Součinitel vlivu sklonu zubu

Pro součinitel zohledňující přídavné síly platí:

$$K_H = K_A \cdot K_{Hv} \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha},$$

kde,

K_A Součinitel vnějších dynamických sil – respektuje přídavné dynamické síly vyvolané zdroji rázů a kmitání vně ozubení (pouze pokud nejsou zahrnuty v souboru zatížení)

K_{Hv} Součinitel vnitřních dynamických sil – respektuje přídavné dynamické síly vyvolané zdroji rázů a kmitání uvnitř ozubení, například úchylkami ozubení nebo změnou tuhosti ozubení v průběhu záběru.

$K_{H\beta}$ Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce

$K_{H\alpha}$ Součinitel podílů zatížení jednotlivých zubů – respektuje rozdělení celkového zatížení na páry spoluzabírajících zubů

Bezpečnost soukolí se spočítá dle vztahu:

$$S_H = \frac{\sigma_{Hlim} \cdot Z_N}{\sigma_H} \cdot Z_L \cdot Z_R \cdot Z_v > S_{Hmin}$$

kde,

S_H Součinitel bezpečnosti proti vzniku únavového poškození boků zubů

σ_{Hlim} Mez únavy v dotyku odpovídající počtu cyklů v bodě zlomu Wöhlerovy křivky

Z_L Součinitel maziva – respektuje vliv viskozity maziva

Z_R Součinitel drsnosti boků zubů – respektuje vliv výchozí drsnosti boků zubů

Z_v Součinitel obvodové rychlosti

Z_N Součinitel životnosti

Nejmenší hodnota součinitele bezpečnosti S_{Hmin} respektuje přibližnost vlastní výpočtové metody a nepřesnost vstupních veličin. Nejmenší součinitel bezpečnosti je proto nutno stanovit s přihlédnutím k nepřesnostem výsledků a výpočtu a k nebezpečnosti vzniku poškození. [13]

Doporučená hodnota součinitele bezpečnosti dle normy:

$$S_{Hmin} = 1,1$$

4.2.3 Výpočet únosnosti boků zubů v dotyku

V této části bude proveden výpočet jednotlivých součinitelů pro výpočet únosnosti boků zubů v dotyku.

1) Součinitel mechanických vlastností:

$$Z_E = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}\right)}}$$

Protože mají obě kola stejný modul pružnosti a materiál, vztah lze zjednodušit na:

$$Z_E = \sqrt{0,175 \cdot E} = \sqrt{0,175 \cdot 210 \cdot 10^3} = 191,7 \sqrt{\text{MPa}}$$

2) Součinitel tvaru spoluzabírajících zubů:

Tento součinitel byl odečten z přílohy 1 na základě znalosti úhlu sklonu zubů a korekce:

$$Z_H = 2,42$$

Poznámka: Soukolí jsou nekorigovaná, tj. platí:

$$x_1 = x_2 = 0 \text{ mm}$$

3) Součinitel součtové délky dotykových křivek boků zubů:

Pro tento součinitel je nejprve nutné určit součinitel záběru profilu a součinitel záběru kroku.

Pro součinitel záběru profilu platí:

$$\begin{aligned} \varepsilon_\alpha &= \frac{\frac{1}{2} \cdot (\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2}) - a \cdot \sin \alpha_t}{\frac{\pi \cdot m_n}{\cos \beta_{12}} \cdot \cos \alpha_t} = \\ &= \frac{\frac{1}{2} \cdot (\sqrt{826^2 - 713^2} + \sqrt{3609^2 - 3317^2}) - 2153,5 \cdot \sin 20,65^\circ}{\frac{\pi \cdot 32}{\cos 15^\circ} \cdot \cos 20,65^\circ} = 5,32 \end{aligned}$$

Pro součinitel záběru kroku platí:

$$\varepsilon_\beta = \frac{b_w \cdot \sin \beta_{12}}{\pi \cdot m_n} = \frac{450 \cdot \sin 15^\circ}{\pi \cdot 32} = 1,2$$

Pro $\varepsilon_\beta > 1$ platí:

$$Z_\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_\alpha}} = \sqrt{\frac{1}{5,32}} = 0,43$$

4) Součinitel vnějších dynamických sil:

Tento součinitel byl odečten z přílohy 1 na základě znalosti zatěžování převodu:

$$K_A = 1,75$$

5) Součinitel vnitřních dynamických sil:

Nejprve je nutné si určit pomocné koeficienty. Ty byly určeny z přílohy 1 na základě znalosti stupně přesnosti podle ČSN 01 4682. Stupeň přesnosti je 6.

$$K_P = 13,3$$

$$K_Q = 0,0087$$

Dále je nutné určit tzv. směrodatnou obvodovou sílu, kterou lze předpokládat stejně velkou jako obvodovou sílu, dle normy ČSN 01 4682-2 (Způsob A).

$$F_{tH} = F_t = 1,36 \text{ MN}$$

Pro samotný součinitel vnitřních dynamických sil platí:

$$\begin{aligned} K_{Hv} &= 1 + \left(\frac{K_P \cdot b_w}{K_A \cdot F_{tH}} + K_Q \right) \cdot \frac{z_1 \cdot v_1}{100} \cdot \sqrt{\frac{u^2}{1 + u^2}} = \\ &= 1 + \left(\frac{13,3 \cdot 450 \cdot 10^{-3}}{1,75 \cdot 1,36 \cdot 10^6} + 0,0087 \right) \cdot \frac{23 \cdot 11,17}{100} \cdot \sqrt{\frac{4,652^2}{1 + 4,652^2}} = 1,02 \end{aligned}$$

6) Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů:

Tento součinitel byl odečten z přílohy 1 na základě znalosti stupně přesnosti a tepelného zpracování kol. Pastorek je nitridovaný, hnané ozubené kolo nikoliv.

$$K_{H\alpha} = 1$$

7) Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce:

Tento součinitel byl odečten z přílohy 1 na základě znalosti součinitele ψ a uspořádání ozubeného převodu. Uspořádání ozubeného převodu odpovídá nejvíce č. 6.

Součinitel ψ_d pro letmo uložená soukolí, kde je povrchově tvrzený pouze pastorek:

$$\psi_d = 0,7$$

Pro samotný součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce platí:

$$K_{H\beta} = 1,05$$

8) Hertzův tlak při ideálním zatížení:

$$\begin{aligned} \sigma_{HO} &= Z_E \cdot Z_H \cdot Z_\varepsilon \cdot \sqrt{\frac{F_t}{b_w \cdot d_1} \cdot \frac{u + 1}{u}} = \\ &= 191,7 \cdot 2,42 \cdot 0,43 \cdot \sqrt{\frac{1,36 \cdot 10^6}{450 \cdot 762} \cdot \frac{4,652 + 1}{4,652}} = 437,9 \text{ MPa} \end{aligned}$$

9) Součinitel zohledňující přidavné/dynamické síly:

$$K_H = K_A \cdot K_{Hv} \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha} = 1,75 \cdot 1,02 \cdot 1,05 \cdot 1 = 1,87$$

10) Hertzův tlak při skutečném zatížení zubů:

$$\sigma_H = \sigma_{HO} \cdot \sqrt{K_H} = 437,9 \cdot \sqrt{1,87} = 598,8 \text{ MPa}$$

11) Součinitelé maziva, drsnosti boků zubů a obvodové rychlosti:

Pro nebroušená soukolí platí:

$$Z_L \cdot Z_R \cdot Z_v = 0,9$$

12) Součinitel bezpečnosti proti vzniku únavového poškození boků zubů:

Mez únavy v dotyku odečtena ze strojních tabulek pro materiál 11 523 (ekvivalent k S355J2).

$$\sigma_{Hlim} = 380 \text{ MPa}$$

$$S_H = \frac{\sigma_{Hlim}}{\sigma_H} \cdot Z_L \cdot Z_R \cdot Z_v = \frac{380}{598,8} \cdot 0,9 = 0,57$$

Tedy platí:

$$S_H < S_{Hmin}$$

Orientačně se pro soukolí, u kterých nemá docházet k pittingu, uvažuje minimální bezpečnost 1,1 až 1,2. Skutečná bezpečnost daná výpočtem vychází 0,57. To znamená, že je vysoká pravděpodobnost, že k pittingu docházet bude. Pro zlepšení hodnoty bezpečnosti by bylo nutné kompletně předefinovat tvar ozubení, případně zvolit únosnější materiál. Mírným zlepšením by bylo soukolí brousit. Změnou parametrů ozubení by bylo nutné upravit také ozubení pastorku, volbou únosnějšího materiálu by při takto velkých rozměrech kola vzrostla mnohonásobně cena. Jelikož ani jedna z doporučených variant není žádoucí, je výpočet považován za vyhovující. Je nutné klást vyšší nároky na kontrolu ozubení v průběhu jeho funkce a jeho případné korekci.

4.2.4 Únosnost zubů v ohybu

Únosnost zubů v ohybu je schopnost zajištění dostatečné bezpečnosti v patě zubů proti únavovému lomu a proti trvalé deformaci či silovému lomu v důsledku místních napětí. Pro posouzení únosnosti slouží místní ohybové napětí v oblasti nebezpečného průřezu patního přechodu zubu. [13]

Místní ohybové napětí v nebezpečném průřezu paty zubu pro čelní soukolí má tvar:

$$\sigma_F = \frac{F_t}{b_w \cdot m_n} \cdot K_F \cdot Y_{FS} \cdot Y_\beta \cdot Y_\epsilon,$$

kde

σ_F Místní ohybové napětí v oblasti nebezpečného průřezu patního přechodu zubu

K_F Součinitel přidavných zatížení

Y_{FS} Součinitel tvaru zubu a koncentrace napětí

Y_β Součinitel sklonu zubu

Y_ϵ Součinitel vlivu záběru profilu

Pro součinitel přídavných zatížení dále platí:

$$K_F = K_A \cdot K_{Fv} \cdot K_{F\beta} \cdot K_{F\alpha}$$

Součinitel bezpečnosti je dán:

$$S_F = \frac{\sigma_{Flim} \cdot Y_N}{\sigma_F} \cdot Y_X \cdot Y_\delta > S_{Fmin},$$

kde

σ_{Flim} Mez únavy v ohybu odpovídající počtu cyklů v bodě zlomu Wöhlerovy křivky

Y_N Součinitel životnosti

Y_R Součinitel drsnosti v oblasti patního přechodu zubu

Y_X Součinitel velikosti – respektuje vliv rozměrů zubu

Y_δ Součinitel vrubové citlivosti – respektuje citlivost materiálu na koncentraci napětí

S_{Fmin} Nejmenší hodnota součinitele bezpečnosti proti vzniku únavového lomu v patě zubu

Nejmenší hodnota součinitele bezpečnosti respektuje přibližnost vlastní výpočtové metody a nepřesnost vstupních veličin. Nejmenší součinitel bezpečnosti je proto nutno stanovit s přihlédnutím k nepřesnostem výsledků a výpočtu a k nebezpečnosti vzniku poškození. [13]

Orientačně lze dle normy uvažovat

$$S_{Fmin} = 1,2$$

4.2.5 Výpočet únosnosti zubů v ohybu

V této části bude proveden výpočet jednotlivých součinitelů pro výpočet únosnosti zubů v ohybu

1) Součinitelé shodné se součiniteli pro únosnost boků zubů v dotyku:

Mnoho součinitelů potřebných pro výpočet únosnosti zubů v ohybu je shodných se součiniteli pro výpočet únosnosti boků zubů v dotyku. Jedná se o:

$$K_A = 1,75$$

$$K_{Fv} = K_{Hv} = 1,02$$

$$K_{F\alpha} = K_{H\alpha} = 1$$

2) Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce:

Pro výpočet tohoto součinitele vycházíme z již známé hodnoty součinitele podílu zatížení jednotlivých zubů. Nejprve je nutné si určit exponent:

$$NF = \frac{\left(\frac{b_w}{2 \cdot m_n}\right)^2}{\left(\frac{b_w}{2 \cdot m_n}\right)^2 + \frac{b_w}{2 \cdot m_n} + 1} = \frac{\left(\frac{450}{2 \cdot 32}\right)^2}{\left(\frac{450}{2 \cdot 32}\right)^2 + \frac{450}{2 \cdot 32} + 1} = 0,86$$

Pro samotný součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce platí:

$$K_{F\beta} = K_{H\beta}^{NF} = 1,05^{0,86} = 1,04$$

3) Součinitel tvaru zubu a koncentrace napětí:

Tento součinitel byl odečten z přílohy 1 na základě znalosti počtu zubů virtuálního hnaného kola a korekce:

$$Y_{FS} = 4,27$$

4) Součinitel sklonu zubu:

Tento součinitel byl odečten z přílohy 1 na základě znalosti úhlu sklonu zubů a součinitele záběru kroku:

$$Y_{\beta} = 0,875$$

5) Součinitel vlivu záběru profilu:

Pro $\varepsilon_{\beta} > 1$ platí:

$$Y_{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon_{\alpha}} = \frac{1}{5,32} = 0,19$$

6) Součinitel velikosti:

Tento součinitel byl odečten z přílohy 1 na základě znalosti normálového modulu a materiálu:

$$Y_X = 0,85$$

7) Součinitel vrubové citlivosti:

Nejprve je nutné určit poloměr křivosti patního přechodu náhradního přímého zubu v místě dotyku 30° - tečny

Tato hodnota byla určena z přílohy 1 na základě znalosti počtu zubů virtuálního hnaného kola a korekce (tato hodnota je podělena o hodnotu normálového modulu):

$$\frac{\rho_{Fn}}{m_n} = 0,32 \Rightarrow \rho_{Fn} = m_n \cdot 0,32 = 32 \cdot 0,32 = 10,24 \text{ mm}$$

Pomocí této hodnoty lze spočítat součinitel ostrosti vrubu:

$$\kappa = \frac{2,3}{\rho_{Fn}} = \frac{2,3}{10,24} = 0,22 \text{ mm}^{-1}$$

Součinitel vrubové citlivosti byl odečten z přílohy 1 na základě znalosti součinitele ostrosti vrubu a meze pevnosti v tahu:

$$Y_{\delta} = 1,11$$

8) Součinitel zohledňující přídavné/dynamické síly:

$$K_F = K_A \cdot K_{Fv} \cdot K_{F\beta} \cdot K_{F\alpha} = 1,75 \cdot 1,02 \cdot 1,04 \cdot 1 = 1,86$$

9) Místní ohybové napětí v oblasti nebezpečného průřezu patního přechodu zubu:

$$\sigma_F = \frac{F_t}{b_w \cdot m_n} \cdot K_F \cdot Y_{FS} \cdot Y_{\beta} \cdot Y_{\varepsilon} = \frac{1,36 \cdot 10^6}{450 \cdot 32} \cdot 1,86 \cdot 4,27 \cdot 0,875 \cdot 0,19 = 124,7 \text{ MPa}$$

10) Součinitel bezpečnosti proti vzniku únavového lomu v nebezpečném místě:

Mez únavy v ohybu odečtena ze strojních tabulek pro materiál 11 523 (ekvivalent k S355J2).

$$\sigma_{Flim} = 336 \text{ MPa}$$

$$S_F = \frac{\sigma_{Flim}}{\sigma_F} \cdot Y_X \cdot Y_\delta = \frac{336}{124,7} \cdot 0,85 \cdot 1,11 = 2,54$$

Tedy platí:

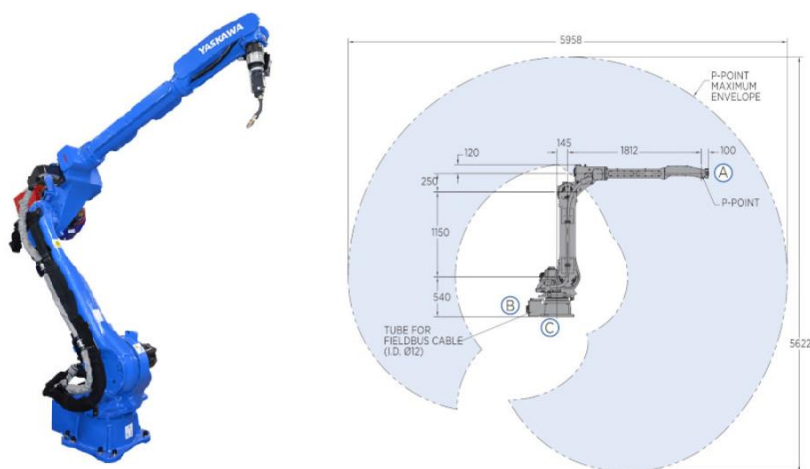
$$S_F > S_{Fmin}$$

Orientačně se pro soukolí uvažuje minimální bezpečnost 1,2. Skutečná bezpečnost daná výpočtem vychází 2,54. To znamená, že k tomuto poškození docházet nebude. Výsledek je mírně předimenzován, ale pokud by mělo dojít k jeho úpravě za účelem optimalizace, ovlivnilo by to negativně výpočet únosnosti boků zubů v dotyku. Výpočet je považován za vyhovující.

5 Návrh technologie svařování

V této kapitole bude proveden návrh technologie svařování obsahující návrh metody svařování, typu svarů, úpravu svarových ploch, provedení samotných svarů včetně výpočtu přehřevu. Dále bude doporučeno nedestruktivní zkoušení svarů. Na závěr bude proveden výpočet svarů.

Vzhledem k velmi vysokému rázovému zatížení svařence je jasné, že na kvalitu svarů jsou kladeny velmi vysoké nároky. Protože je nutné svařovat komponenty velkých průměrů, délky svarů se budou pohybovat v řádech jednotkách metrů. Pro zajištění velmi vysoké kvality svarů a zajištění rovnoměrného povrchu housenky není vhodné svařovat ručně a je nutné uvažovat strojní svařování. Firma Šmeral disponuje svařovacím robotem MOTOMAN AR3120 s maximálním rozsahem téměř 6000 mm, viz obrázek 29.



Obrázek 29: Svařovací robot MOTOMAN AR3120 [14]

5.1 Metoda svařování

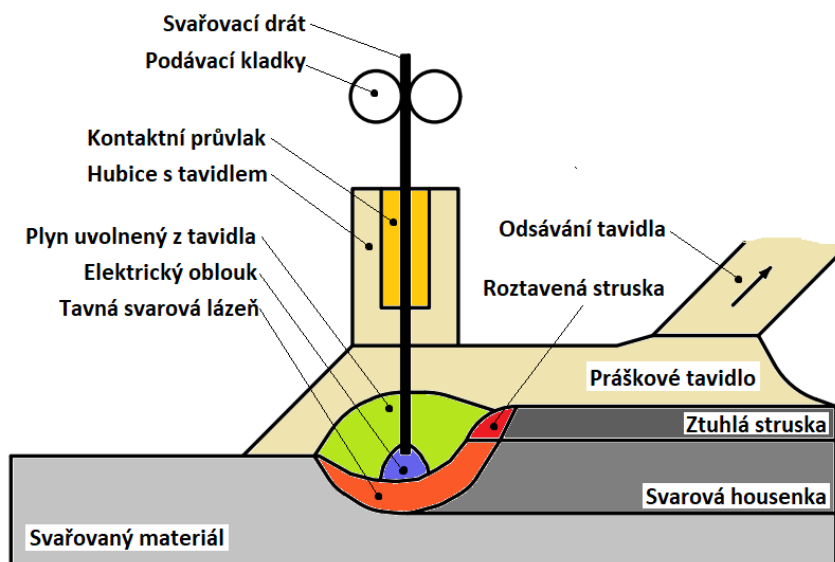
Vhodnou metodou svařování je svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou, kde elektrický oblouk hoří mezi základním svařovaným materiálem a odtavující se elektrodou. Elektroda je ve formě drátu navinutého na cívce a za pomoci elektromotorem poháněných kladek je posouvána do hořícího oblouku. [15]

Mezi nejvýhodnější způsoby obloukového svařování pro tlustostěnné díly patří MIG/MAG svařování nebo svařování pod tavidlem. Rozdíl mezi těmito metodami je v ochraně svarové lázně před oxidací (před přístupem vzduchu). U metody MIG je ochrana zajištěna ochranným inertním plynem, například argonem nebo směsí argonu a hélia. Inertní plyn má pouze ochranou funkci, neúčastní se chemických reakcí ve svarové lázni. V případě metody MAG je ochrana zajištěna ochranným aktivním plynem, který se kromě ochrany před přístupem vzduchu účastní chemických reakcí ve svarové lázni. Aktivním plynem bývá nejčastěji oxid uhličitý, pro lepší kvalitu se používají směsi argonu a oxidu uhličitého nebo argonu a kyslíku. [15] [16]

U svařování pod tavidlem ochranu zajišťuje namísto plynu práškové tavidlo. Svarová lázeň je během svařování neustále zasypávána vrstvou tavidla a pod touto vrstvou hoří elektrický oblouk. Oblouk tedy vůbec není viditelný, je schován pod vrstvou tavidla a z toho pramení minimální emise škodlivých dýmů a záření. Část práškového tavidla se působením vysoké teploty taví a posléze tuhne a vytváří ochranný struskový kryt nad tavnou lázní a tuhoucím svarovým kovem. Zároveň na sebe váže vyplavené nečistoty, může dolegovávat svarový kov a pozitivně působí

na formování svaru. Z roztaveného tavidla se také uvolňují plyny, které vytvářejí ochrannou atmosféru. Oblouk tedy nehoří přímo v tavidle, ale v dutině naplněné plynem, který se z tavidla uvolní. Tavidlo tedy plní podobnou funkci jako obal klasické elektrody. Zbylá, neroztavená, část tavidla se odsává pro další použití. [15]

Pro zajištění velmi vysoké kvality svarových spojů je doporučena technologie svařování pod tavidlem zobrazená na obrázku 30.



Obrázek 30: Svařování pod tavidlem [15]

5.2 Stanovení teploty předehřevu

Uvažování předehřevu jednotlivých dílů je nutné při splnění minimálně jedné z podmínek: [17]

1. Tloušťka svařovaných částí je větší než 25 mm
2. Obsah uhlíku je vyšší než 0,2%
3. Uhlíkový ekvivalent je vyšší než 0,45%

Protože tloušťky svařovaných materiálů vysoce převyšují 25 mm, je nutné předehřev stanovit.

Teplotu předehřevu lze orientačně uvažovat dle tabulky 10:

Tabulka 10: Orientační hodnoty teplot předehřevu [17]

Typ oceli dle ČSN	Teplota předehřevu (°C) pro tloušťky	
	do 25 mm	nad 25 mm
11 343, 11 353, 11 373, 11 416, 12 021, 42 2633	Bez předehřevu	150 - 200
11 444, 11 453, 11 474, 11 478, 11 523, 42 2643	Bez předehřevu	200 - 250
42 2053	200 - 250	200 - 250

Pro její výpočet je zapotřebí stanovit uhlíkový ekvivalent. Ten je stanoven pomocí chemického složení tavby použitého materiálu, v našem případě S355J2, dle normy ČSN EN 1011-2 ze vztahu: [17]

$$CEV = C + \frac{M_n}{6} + \frac{C_r + M_o + V}{5} + \frac{N_i + C_u}{15} = 0,22 + \frac{1,6}{6} + \frac{0 + 0 + 0}{5} + \frac{0 + 0,55}{15} = 0,52\%$$

kde,

CEV Uhlíkový ekvivalent

C Procentuální zastoupení uhlíku v tavbě

$M_n, C_r, M_o, V, N_i, C_u$ Procentuální zastoupení Manganu, chromu, molybdenu, vanadu, niklu a mědi v tavbě

Teplota předehřevu se následně stanoví dle vzorce [17]:

$$t_p = 350 \cdot \sqrt{\left(\frac{360 \cdot C + 40 \cdot (M_n + C_r) + 20 \cdot N_i + 28 \cdot M_o}{360}\right)} \cdot (1 + 0,005 \cdot s) - 0,25 =$$

$$= 350 \cdot \sqrt{\left(\frac{360 \cdot 0,22 + 40 \cdot (1,6 + 0) + 20 \cdot 0 + 28 \cdot 0}{360}\right)} \cdot (1 + 0,005 \cdot 140) - 0,25 = 322^\circ\text{C}$$

kde,

t_p Teplota předehřevu

s Maximální tloušťka stěny (v našem případě věnce)

Hodnota předehřevu vychází početně na 322 °C, což je hodnota, která odpovídá předehřevu spíše pro legované oceli. Pro nelegované oceli (ocel S355J2 je nelegovaná) se doporučují hodnoty do 250 °C. Takto vysoká hodnota je způsobena dosazením velmi velké tloušťky, proto je doporučeno teplotu předehřevu snížit na 250 °C. Vzhledem k velkým rozměrům svařence je výhodné docílit této teploty předehřevu lokálně, například za použití kyslík-acetylenového plamene.

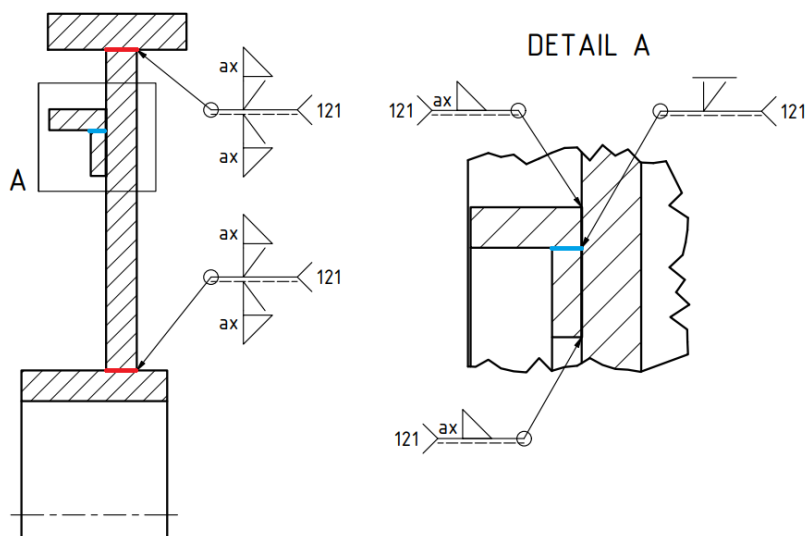
5.3 Návrh svarových ploch tupých svarů

Návrh typu tupého svaru a jeho geometrie má zásadní vliv na kvalitu provaření kořene svaru, na velikosti svarové plochy, množství použitého přídavného materiálu a na s tím související náklady. Na obrázku 31 jsou vybráni zástupci tupých svarů.

Název svaru	Značka (dle ISO 2553)	Řez	Název svaru	Značka (dle ISO 2553)	Řez
½ V-svar	✓		½ U-svar	∩	
½ V-svar se strmým úkosem	∟		Nesymetrický oboustranný ½ V-svar	K	

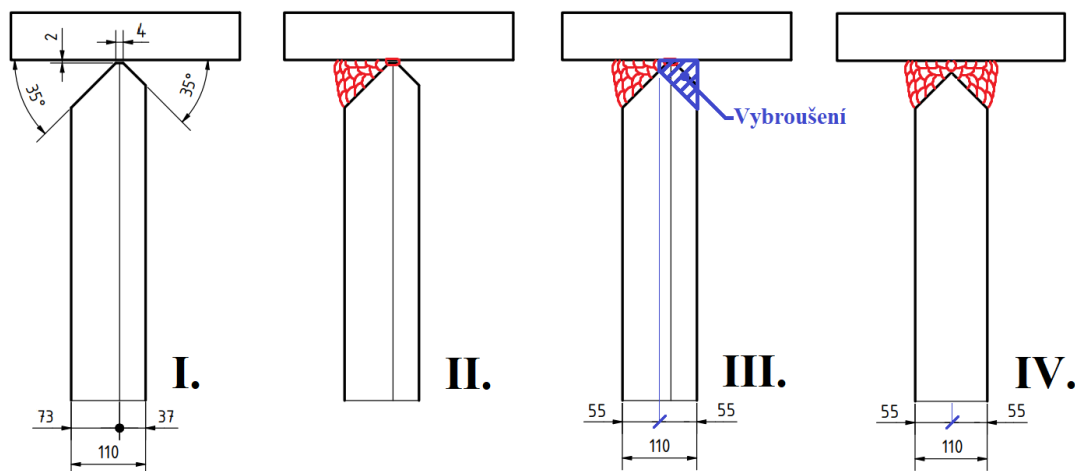
Obrázek 31: Vybráni zástupci tupých svarů [18]

Na obrázku 32 je vidět finální návrh svarů. Mezi ozubeným věncem a diskem a také mezi diskem a nábojem je zvolen nesymetrický oboustranný ½ V svar (zobrazeno červeně) pro zajištění plného provaření součástí. Mezi nábojem věnce spojky 1 a nábojem věnce spojky 2 vyrobeným společně s žebry 2 je zvolen ½ V svar (zobrazeno modře). Tyto součásti se budou z druhé strany po svaření obrábět kvůli zajištění přesnosti pro následné nalisování věnce spojky a přesné dosednutí krajní lamely, tudíž v případě nedokonalého provaření se tato plocha obrobením odstraní. Po svaření nábojů věnců spojky 1 a 2 dojde k jejich přivaření k disku z vnější i vnitřní strany koutovým svarem, jehož velikost bude určena až v analýze pomocí MKP. Pro koutové svary, které jsou na obrázku 32 v červeně označených místech, tedy mezi ozubeným věncem a diskem a také mezi diskem a nábojem, bude proveden ruční pevnostní výpočet pro zjištění, zda je jejich použití v kombinaci s tupými svary potřebné.



Obrázek 32: Finální návrh svarů

Postup zhotovení nesymetrického oboustranného $\frac{1}{2}$ V svaru mezi ozubeným věncem a diskem je vidět na obrázku 33. Svar mezi diskem a nábojem je principiálně stejný.



Obrázek 33: Svařování nesymetrického $\frac{1}{2}$ V svaru

I – Příprava svarové plochy

II – Svaření strany s větší hloubkou

III – Z druhé strany vybrousit materiál do $\frac{1}{2}$ tloušťky (vznik symetrického $\frac{1}{2}$ V svaru)

IV – Svaření druhé strany

Na obrázku 34 je zobrazen postup svařování jednotlivých dílů kola. Nejprve dojde dle výkresové dokumentace k vytvoření jednotlivých úkosů, a to na disku a na náboji věnce spojky 1. Na začátku se svaří náboj k disku a dále k ozubenému věnci oboustrannými $\frac{1}{2}$ V svari. Mimo se svaří náboje věnce spojky 1 a 2 pomocí jednostranného $\frac{1}{2}$ V svaru, které se dále svaří k disku koutovým svarem z vnější i vnitřní strany kolem dokola. Na konec se svaří žebra 1 a 3 koutovým svarem kolem dokola. Pro odstranění vnitřního pnutí po svařování (před obrobením) se bude kolo žíhat.



Obrázek 34: Postup svařování dílů kola

5.4 Nedestruktivní zkoušení svarů

Dle normy ČSN EN 17635 je potřeba stanovit zkoušky svarů pro vyhodnocení výsledků pro účely kontroly kvality, založené na kvalitativních požadavcích, materiálu, tloušťce svarů, metod svařování a rozsahu zkoušení. [19]

Obecné uznávané metody pro zjišťování přípustných povrchových diskontinuit u všech typů svarů s plným průvarem jsou: [19]

1. Vizuální kontrola (VT)
2. Vizuální kontrola (VT) a zkoušení magnetickým práškem (MT)
3. Vizuální kontrola (VT) a kapilární zkoušení (PT)

Obecné uznávané metody pro zjišťování vnitřních diskontinuit u tupých svarů jsou: [19]

1. Zkoušení ultrazvukem (UT)
2. Radiografické zkoušení (RT)

Pro kontrolu povrchových diskontinuit je doporučeno:

1. Vizuální zkoušení podle normy ČSN EN ISO 17637
2. Kapilární zkoušení podle normy ČSN EN ISO 23277

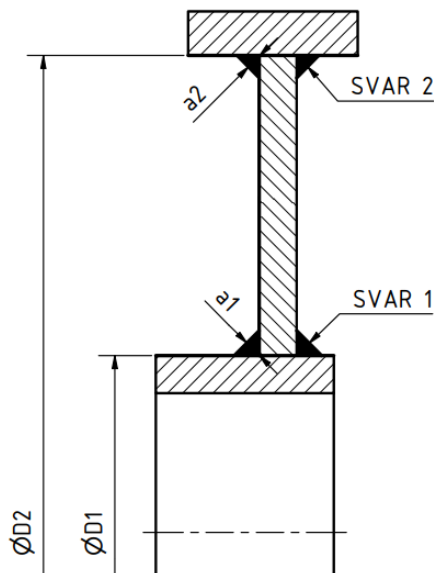
Pro kontrolu vnitřních diskontinuit je doporučeno:

1. Zkoušení ultrazvukem podle normy ČSN EN ISO 17640

5.5 Výpočet svarů

V této kapitole bude provedena úvaha potřeby koutových svarů v místech označených na obrázku 35.

Pro tupé svary s plným provařením lze uvažovat stejnou únosnost jako únosnost slabší ze spojovaných částí za předpokladu, že je svar proveden vhodným přídatným materiálem, který zajistí v celé oblasti svaru mez kluzu a pevnost stejnou či vyšší, než jaká je požadována pro základní materiál. Z toho důvodu nejsou tupé svary v obrázku 35 zakresleny a počítá se pouze s koutovými svary (nepočítá se se žádným zeslabením v okolí tupých svarů). [20]



Obrázek 35: Výpočet svarů

Kolo je namáháno krutem, kde velikost napětí ve svaru je dána vztahem:

$$\tau_k = \frac{M_k}{2 \cdot W_k},$$

kde

τ_k Napětí v krutu koutového svaru

M_k Kroutící moment na ozubeném kole

W_k Modul průřezu svaru v krutu

Necht' je pro svar 1, tj. svar mezi nábojem a diskem, uvažována velikost $a_1=10$ mm

$$W_{k1} = \frac{\pi \cdot [(D_1 + 2 \cdot a_1)^4 - D_1^4]}{16 \cdot (D_1 + 2 \cdot a_1)}$$

$$\tau_{k1} = \frac{M_k}{2 \cdot W_{k1}} = \frac{M_k}{\frac{2\pi \cdot [(D_1 + 2 \cdot a_1)^4 - D_1^4]}{16 \cdot (D_1 + 2 \cdot a_1)}} = \frac{2,41 \cdot 10^9}{\frac{2\pi \cdot [(1040 + 2 \cdot 10)^4 - 1040^4]}{16 \cdot (1040 + 2 \cdot 10)}} = 64,1 \text{ MPa}$$

Necht' je pro svar 2, tj. svar mezi ozubeným věncem a diskem, uvažována velikost $a_2=2$ mm

$$W_{k2} = \frac{\pi \cdot [(D_2)^4 - (D_2 - 2 \cdot a_2)^4]}{16 \cdot D_2}$$

$$\tau_{k2} = \frac{M_k}{2 \cdot W_{k2}} = \frac{M_k}{\frac{2\pi \cdot [(D_2)^4 - (D_2 - 2 \cdot a_2)^4]}{16 \cdot D_2}} = \frac{2,41 \cdot 10^9}{\frac{2\pi \cdot [(3349)^4 - (3349 - 2 \cdot 2)^4]}{16 \cdot 3349}} = 31,3 \text{ MPa}$$

Dle výpočtu je ve svaru 1 o velikosti $a=10$ mm napětí 64,1 MPa, pro $a=5$ mm je to již hraničních 128,9 MPa. Nicméně z principu funkce ozubeného kola je kroutící moment přenášen od ozubení na věnec spojky prostřednictvím kolíků, a tedy v místě svaru 1 se nepředpokládá takto veliké zatížení od momentu, se kterým bylo počítáno. Z toho důvodu zde nebude uvažován žádný koutový svar.

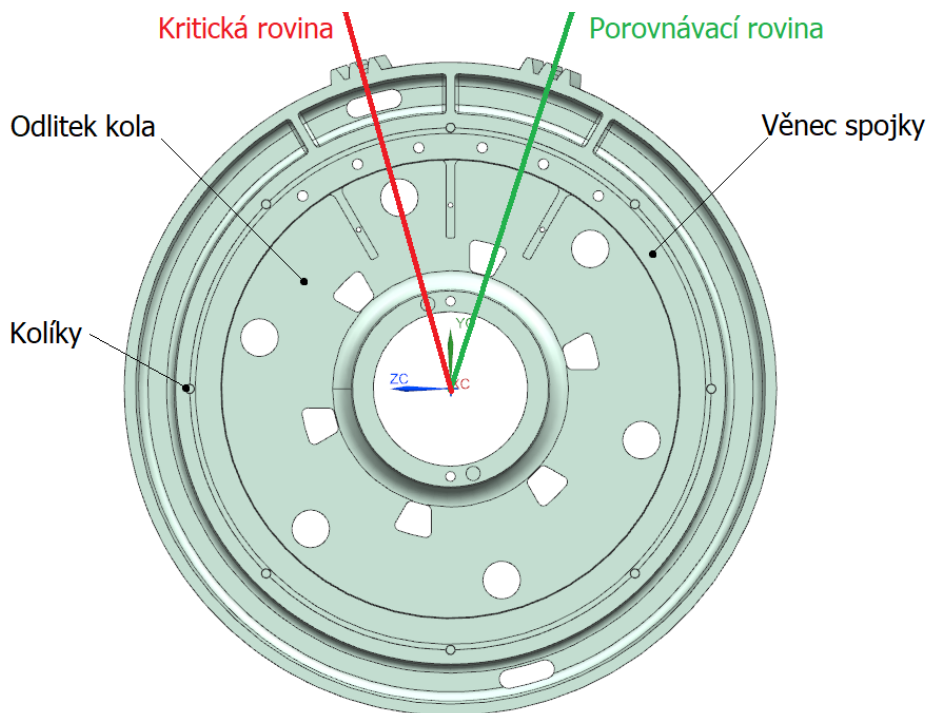
Dle výpočtu je ve svaru 2 o velikosti $a=2$ mm napětí 31,3 MPa. Například ve svaru o velikosti $a=5$ mm je napětí již pouze 10,5 MPa, to znamená, že v případě menších a menších svarů se již jedná pouze o divergenci k nekonečnu. Proto ani zde nebude uvažován žádný koutový svar.

6 MKP

V první fázi této kapitoly bude proveden hrubý pevnostní výpočet pomocí MKP pro stávající řešení odlitku, který bude následně optimalizován do stavu odpovídajícímu skutečnému zatěžování. Poté bude proveden výpočet pro svařenec kola, kde se bude klást důraz na podobnost jednotlivých sítí, zatížení a vazeb s optimalizovaným výpočtem odlitku. Následně se oba výpočty porovnají.

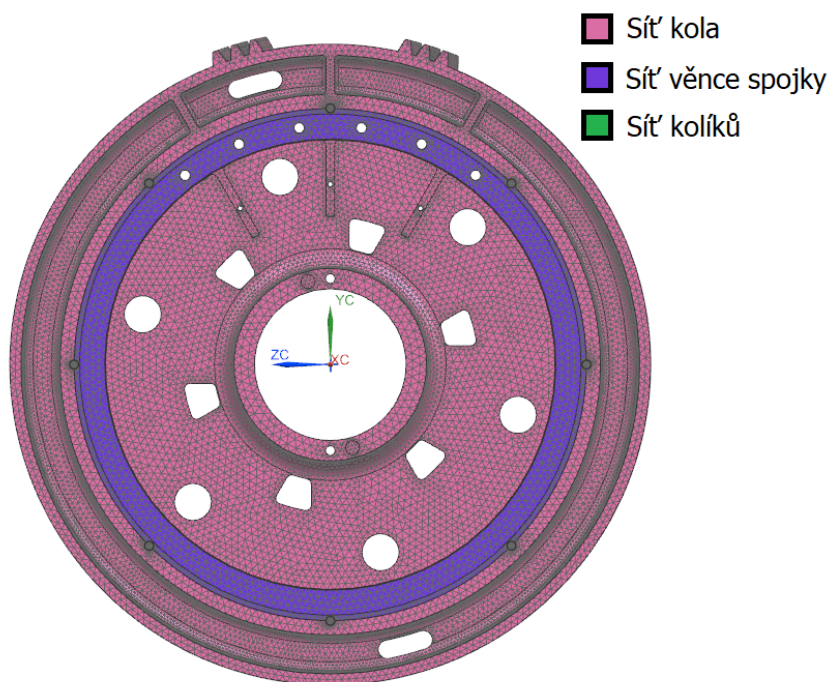
6.1 Hrubý výpočet odlitku kola

Vstupním modelem bylo ozubené kolo z obrázku 14, které bylo doplněno o modely věnce spojky a jednotlivých kolíků. Pro tuto sestavu byl vytvořen idealizovaný díl, na kterém se provedlo několik zjednodušení pro optimalizaci výpočtu – odstraněním některých zaoblení, zkosení a menších děr, viz obrázek 36. Větší úpravy byly provedeny pro ozubení, které se zachovalo pouze ve dvou místech – v okolí kritické roviny procházející kulatým a drážkovým otvorem zeslabující průřez kola (zobrazena červeně) a v okolí porovnávací roviny (zobrazena zeleně), kde je nejmenší zeslabení průřezu kola. Mimo tyto oblasti byla smazána žebra a díry pro šrouby. Celkem se model skládá ze 3 částí – z odlitku kola, věnce spojky a osmi kolíků.



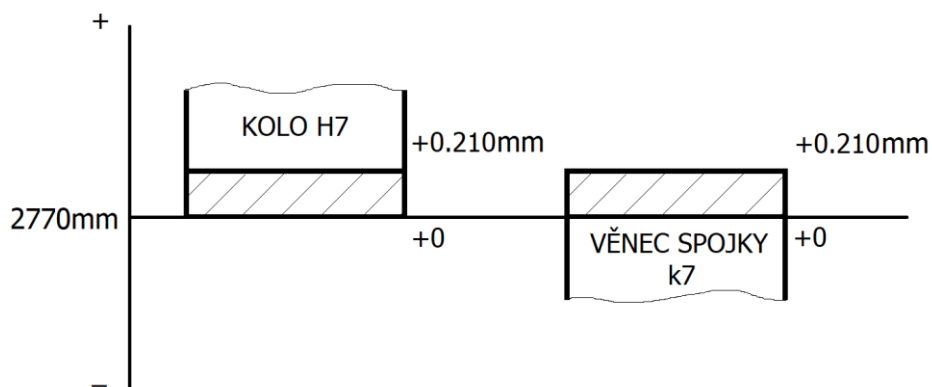
Obrázek 36: Idealizovaný díl odlitku

Po dokončení úprav na idealizovaném dílu bylo provedeno zasítování, viz obrázek 37. Pro síť kola a věnce spojky byla zvolena velikost 3D Tetrahedral elementů shodně 40 mm, pro síť jednotlivých kolíků byla zvolena velikost elementů 20 mm. Pomocí funkce Mesh Control byla zjemněna síť v okolí kolíků, v oblasti dotyku zubů, otvorů děr v žebrech 2 a některých zaoblení tak, aby funkce Element Quality reportovala 0 nevyhovujících zasítovaných elementů a zároveň aby byla síť dostatečně jemná.

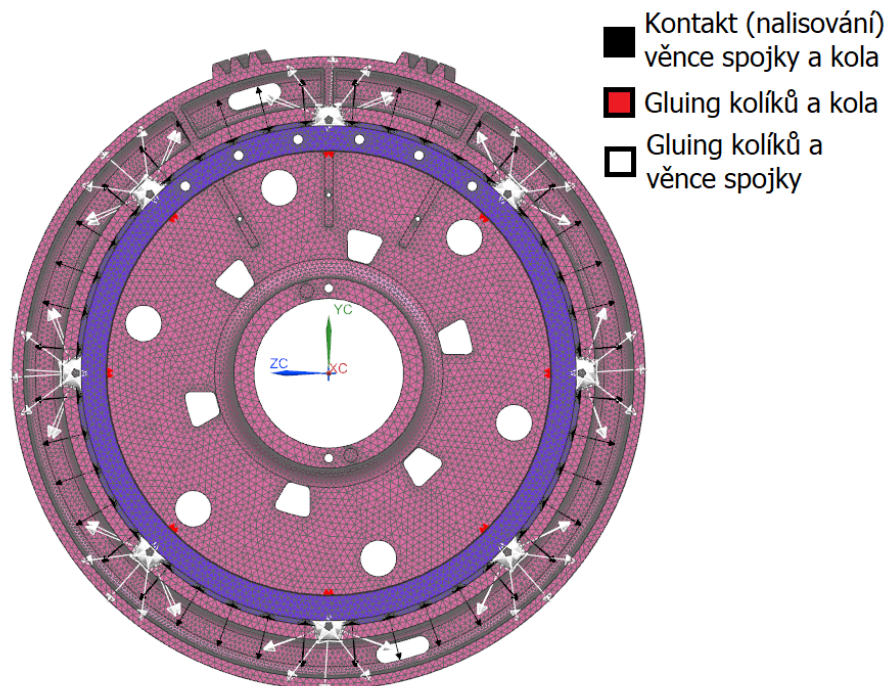


Obrázek 37: Sít' odlitku

V další fázi byly propojeny všechny části mezi sebou (viz obrázek 39). Kolíky byly spojeny s otvory věnce spojky a kola pomocí funkce Surface-to-Surface gluing. Pro spojení věnce spojky a kola byla použita funkce Surface-to-Surface kontakt. Byla zde nastavena hodnota přesahu, která vychází z daného uložení, které bylo odečteno z výkresů – H7/k7. Jednotlivé úchytky byly odečteny z normy ČSN EN ISO 286-2. Hodnota největšího možného přesahu je (shodně s hodnotou největší vůle) 0,210 mm, nejmenší hodnota přesahu (a vůle) je 0 mm, viz. obrázek 38. Průměrná hodnota přesahu – 0,105 mm byla zadána do hodnoty offsetu v nastavení kontaktu.

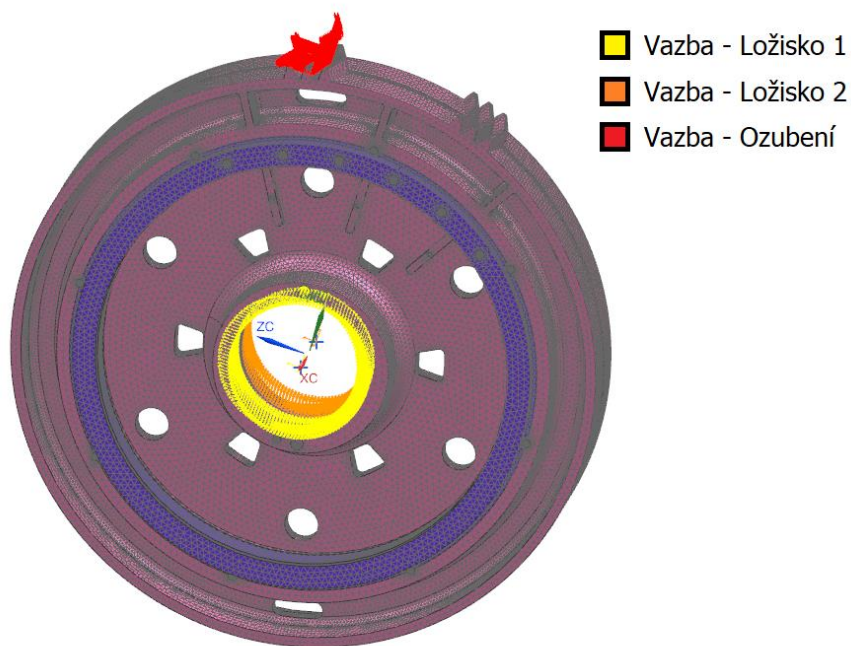


Obrázek 38: Přechodné uložení kola a věnce spojky



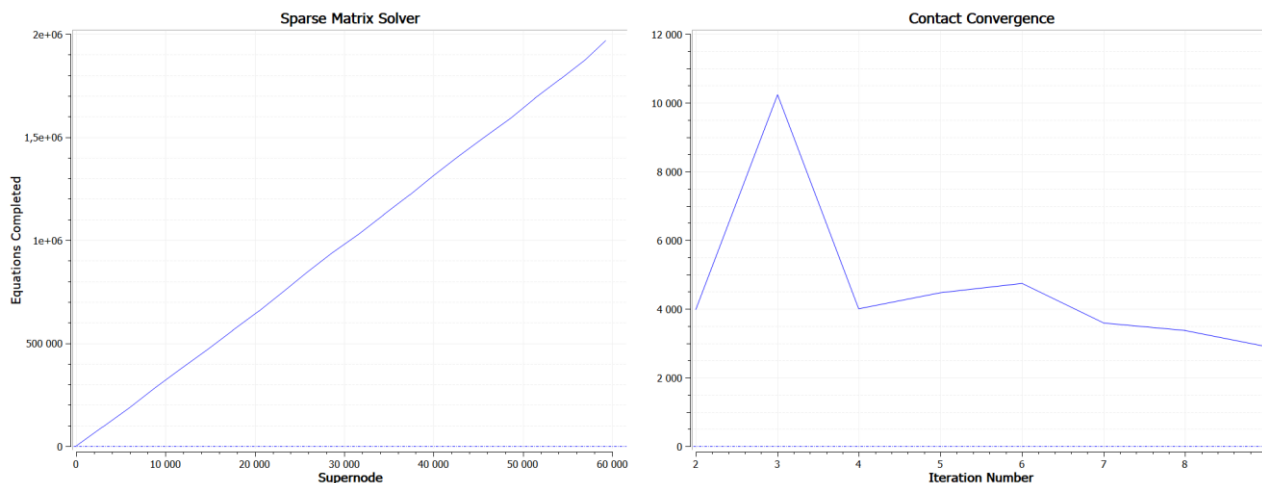
Obrázek 39: Propojení jednotlivých dílů odlitku

Dále byly použity vazby v místě ložisek (viz obrázek 40 žlutě a oranžově), kde byly zakázány všechny posuvy. V místě styku zubů byla vytvořena ploška, na které byly zakázány posuvy v radiálním a tečném směru (znázorněno červeně). Před spuštěním výpočtu byl zadán krouticí moment stanovený v kapitole 4.1.



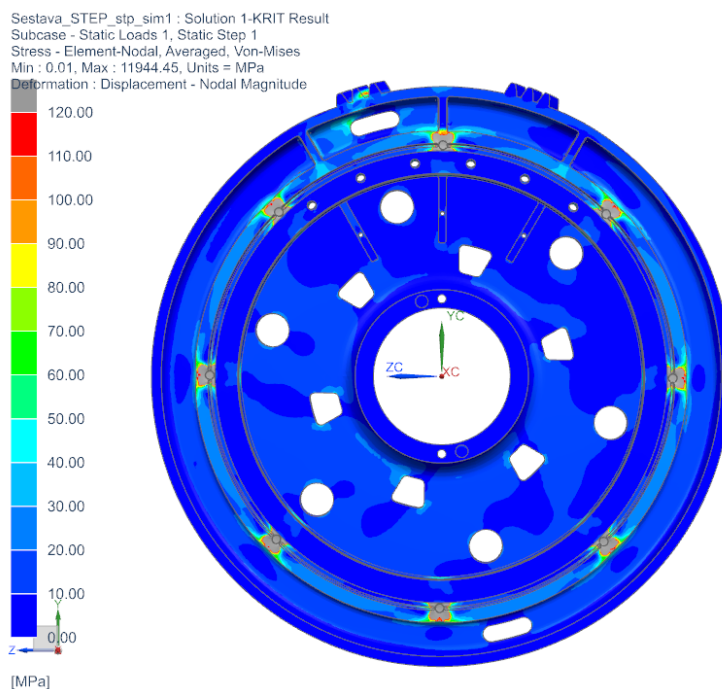
Obrázek 40: Vazby odlitku

Počet vnějších iterací (MAXS) a počet vnitřních iterací (MAXF) byl nastaven na 12. Report počtu rovnic a konvergence kontaktu je vidět na obrázku 41. Jak lze vidět v grafu konvergence kontaktu, výpočet neproběhl zcela správně, jelikož nekonvergoval k nule.



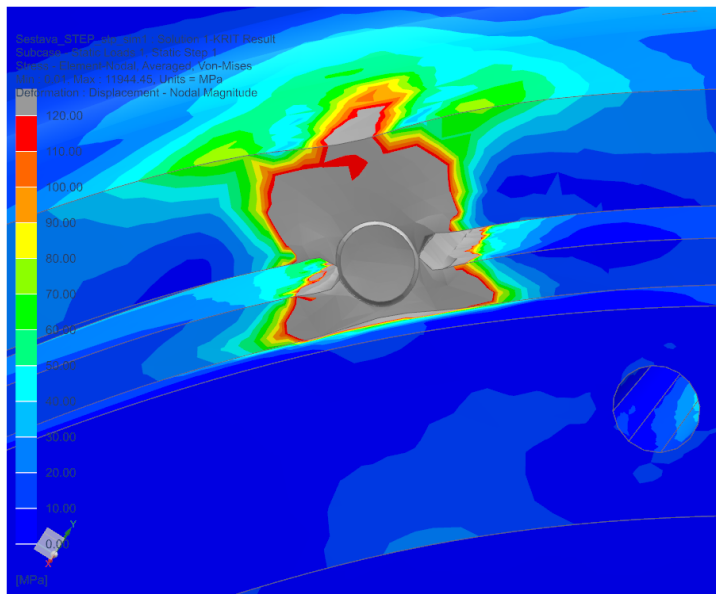
Obrázek 41: Report počtů rovnic a konvergence kontaktu odlitku

Konečné výsledky redukovaného napětí Von-Mises v jednotlivých uzlech pro záběr zubů v kritické rovině lze vidět na obrázku 42. Maximální zobrazované hodnoty jsou zobrazeny červeně a jsou nastaveny maximálně na 120 MPa. Vyšší napětí byla zešedivěna. Jak lze vidět a předpokládat, nejvyšší napětí jsou v okolí kolíků, v místě dotyku zubů a v okolí oválného otvoru na jeho levé straně, odkud se z ozubení přenáší zatížení na kolík umístěný nejbližší vlevo (jelikož je krouticí moment orientován po směru hodinových ručiček). Jak bylo předpokládáno v kapitole 5.5 Výpočet svarů, okolí náboje kola je zatěžováno minimálně, protože se moment přenáší od ozubení přes kolík na věnec spojky, nikoliv směrem k náboji.



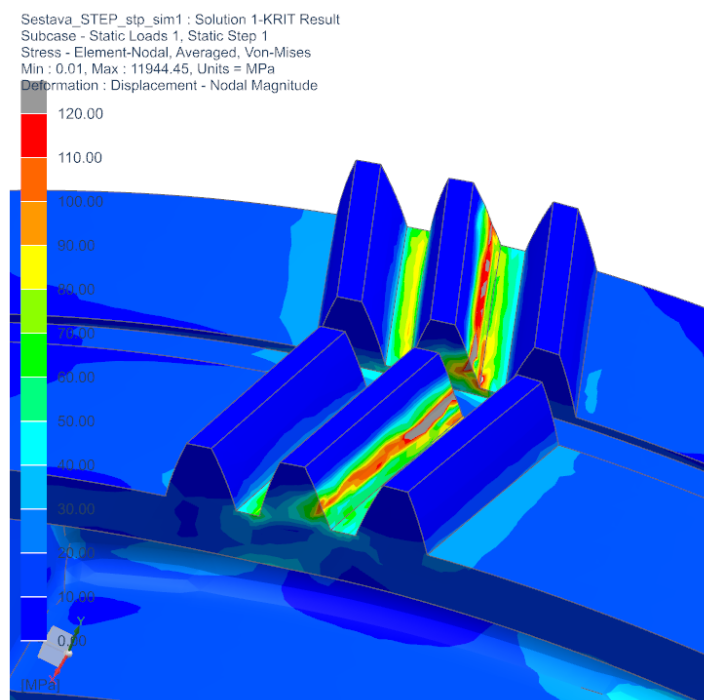
Obrázek 42: Výsledky odlitku

Jak lze vidět na detailu kolíku na obrázku 43, spojení kolíku s věncem spojky a kolem není ideální. Jednak v okolí vycházejí nesmyslně vysoká napětí a také deformace neodpovídá skutečnému zatěžování.



Obrázek 43: Detail zatížení kolíků odlitku

Z animace zatěžování není také ideální použití zákazů posuvů v radiálním a tečném směru na vytvořené plošce na ozubení v místě dotyků zubů. Pro lepší výsledky bude vytvořen model pastorku, který bude v záběru s ozubeným kolem. Detail zatížení ozubení je vidět na obrázku 44.

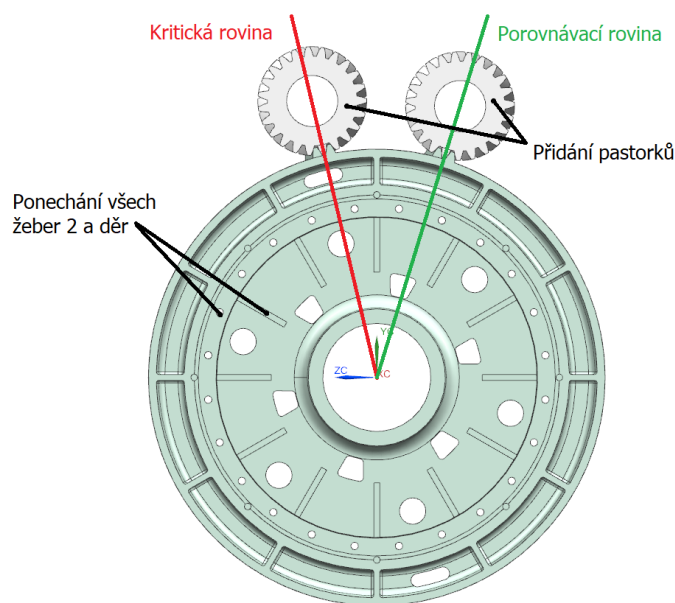


Obrázek 44: Detail zatížení ozubení odlitku

Pozn.: Výsledky pro záběr zubů v porovnávací rovině jsou téměř identické, s rozdílem menšího zatížení oválného otvoru na jeho levé straně. Proto nejsou v této kapitole zmíněny.

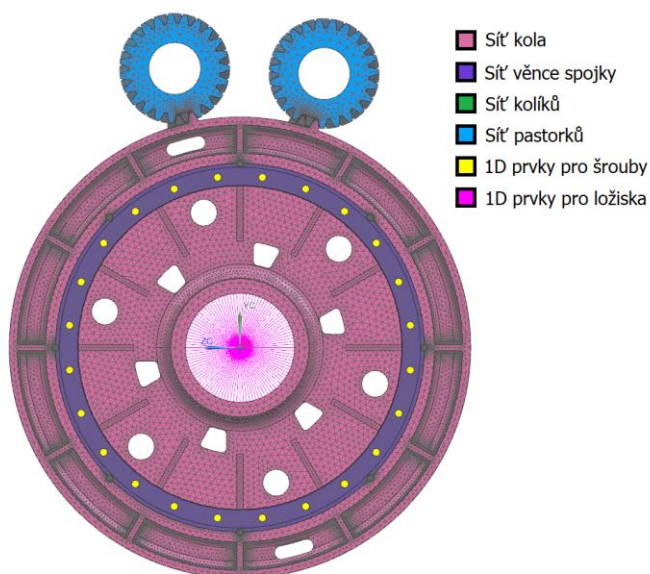
6.2 Optimalizace výpočtu odlitku kola

Na základě výsledků z kapitoly 6.1 byly provedeny úpravy v modelu pro zpřesnění výpočtu. Do vstupního modelu byly přidány pastorky zabírající s odlitkem ozubeného kola v místě dotyku roztečných kružnic pro reálnější simulaci záběru v kritické i porovnávací rovině. V idealizovaném dílu byly ponechány žebra 2 a díry pro šrouby po celém obvodu kola. Idealizovaný díl odlitku po optimalizaci je na obrázku 45.



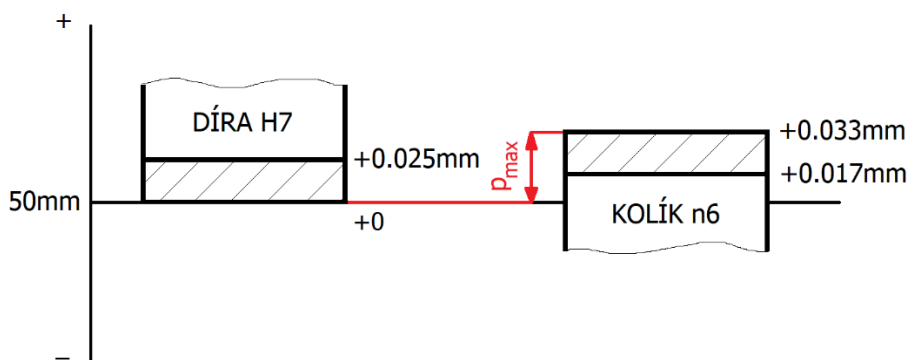
Obrázek 45: Idealizovaný díl odlitku po optimalizaci

U věnce spojky bylo upraveno zasítování, kde byla snížena velikost elementů ze 40 mm na 30 mm a dále u kolíků, kde byla snížena velikost elementů z 20 mm na 5 mm. U pastorků byla přidána síť o velikosti 50 mm, která byla v oblasti záběru zubů zjemněna pomocí funkce Mesh Control. Do všech otvorů pro šrouby byly přidány 1D prvky typu RBE3. Tyto prvky byly přidány i v místě ložisek, viz obrázek 46.

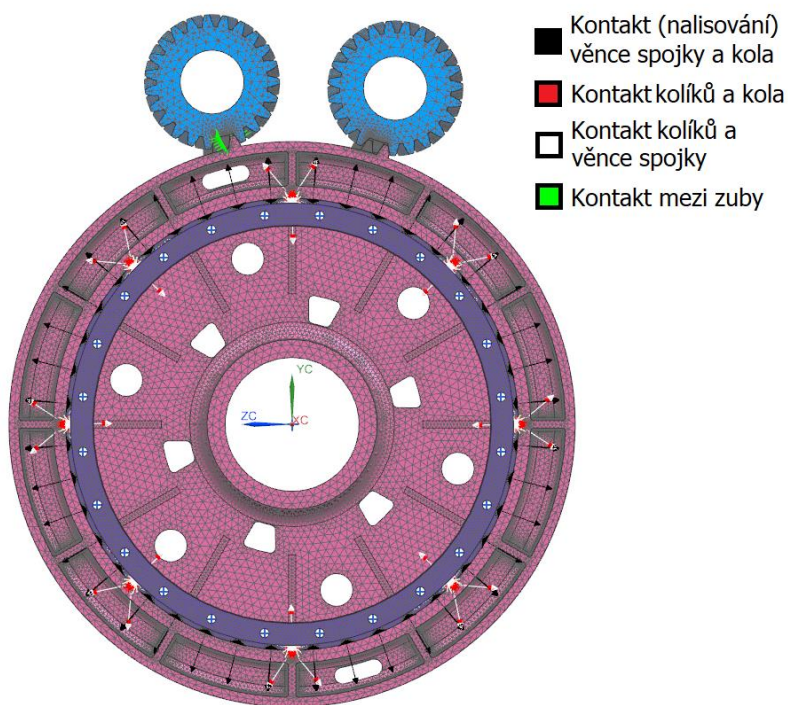


Obrázek 46: Síť odlitku po optimalizaci

Další změnou bylo propojení kolíků s věncem spojky a kolem. Místo Surface-to-Surface gluing byla použita funkce Surface-to-Surface contact. I zde byla nastavena hodnota přesahu, která vychází z daného uložení, které bylo odečteno z výkresů – H7/n6. Jednotlivé úchytky byly odečteny z normy ČSN EN ISO 286-2. Hodnota největšího přesahu p_{max} je 0,033 mm, viz obrázek 47. Polovina této hodnoty byla zadána do hodnoty offsetu v nastavení kontaktu. Nakonec byla funkce Surface-to-Surface contact použita i na spoluzabírající zuby, v tomto případě bez offsetu. Nové propojení jednotlivých dílů je vidět na obrázku 48.

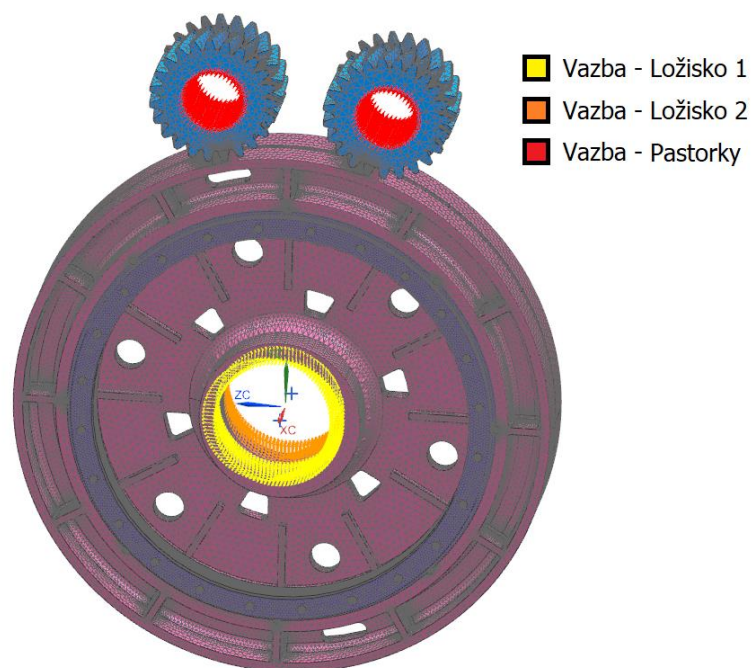


Obrázek 47: Přechodné uložení kola a věnce spojky



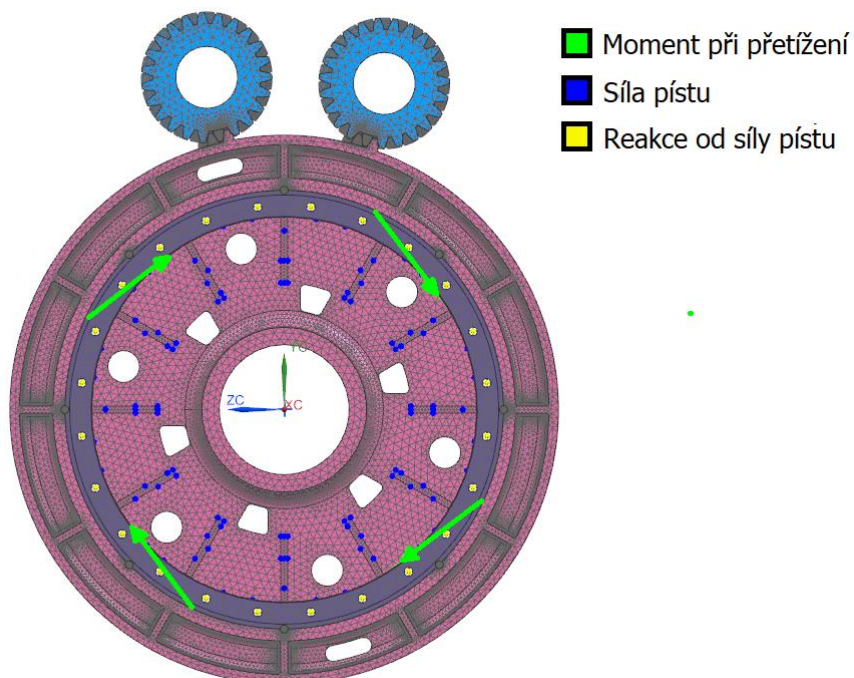
Obrázek 48: Propojení jednotlivých dílů odlitku po optimalizaci

Místo použití vazby na plošce zubu byla použita vazba v díře pastorku, kde byly zakázány všechny posuvy a rotace, viz obrázek 49.



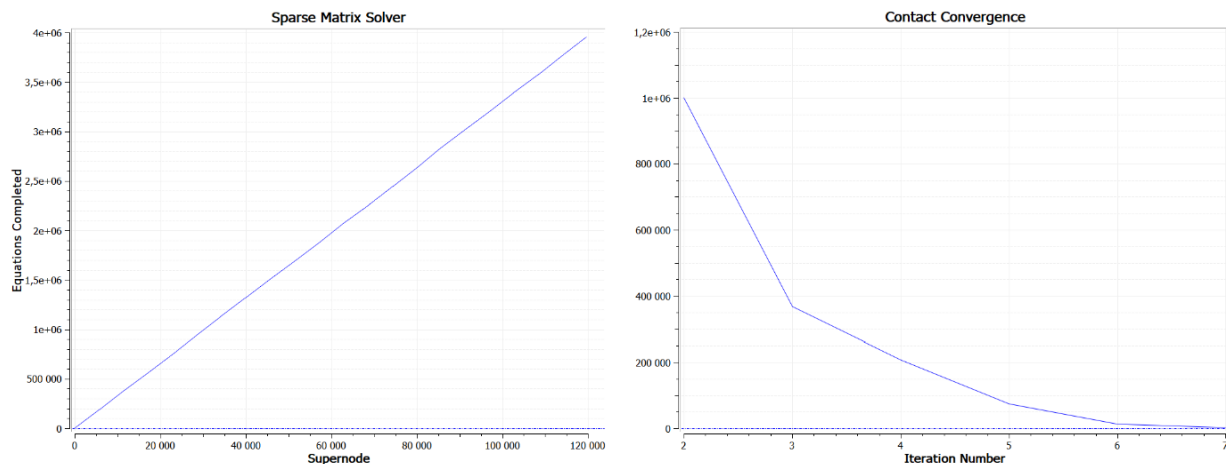
Obrázek 49: Vazby odlitku po optimalizaci

Kromě zátěžného momentu byla přidána síla pístu působící do dosedací plochy krajní lamely. Opačně orientovaná síla (reakce od síly pístu) byla přidána do středu všech děr pro šrouby. Velikost síly pístu byla zadána konzultantem práce. Zatížení je vidět na obrázku 50.



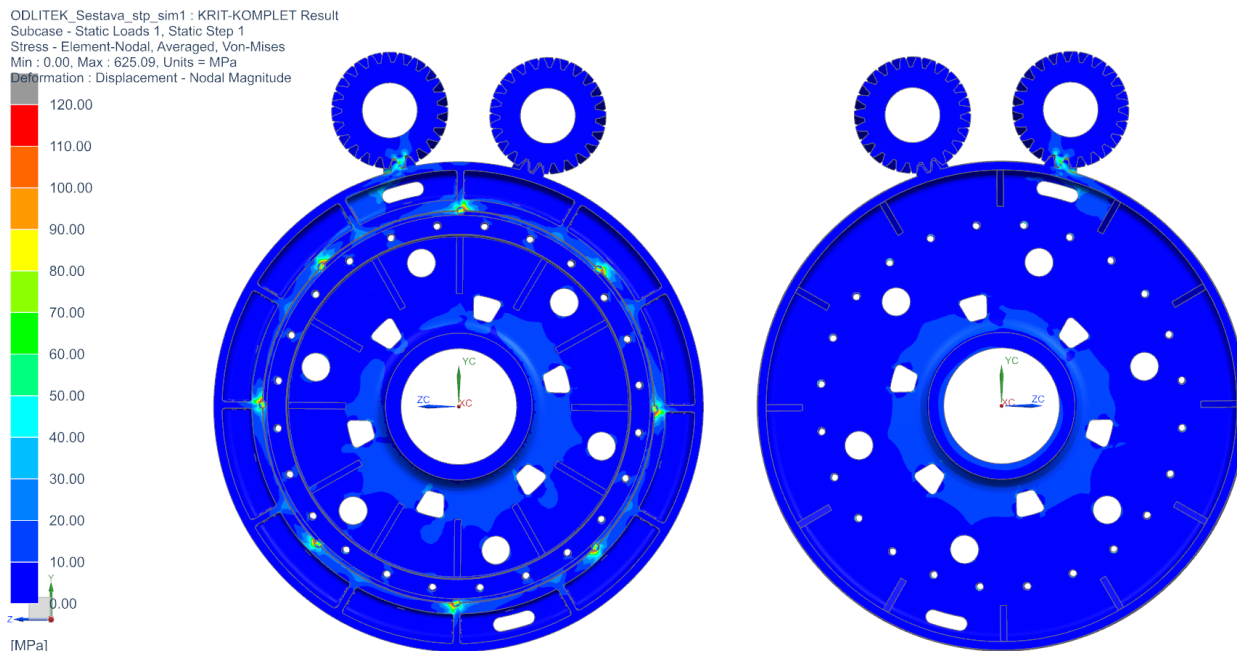
Obrázek 50: Definice zatížení odlitku po optimalizaci

Počet vnějších iterací (MAXS) a vnitřních iterací (MAXF) byl zvýšen z 12 na 20. Z obrázku 51 je patrné, že počet řešených rovnic oproti hrubému výpočtu byl zvýšen dvojnásobně. Zvýšením počtu vnitřních a vnějších iterací dopomohlo ke správné konvergenci do nuly, která nastala již v sedmém cyklu.



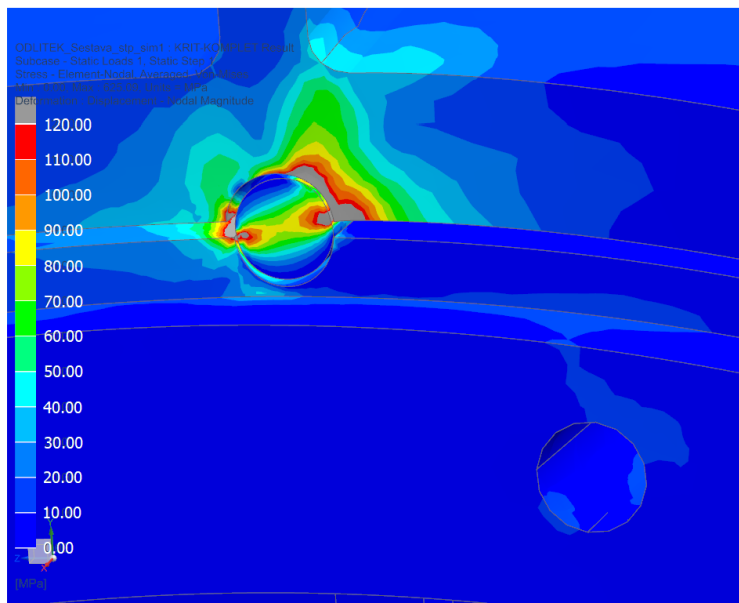
Obrázek 51: Report počtů rovnic a konvergence kontaktu odlitku po optimalizaci

Konečné výsledky redukovaného napětí Von-Mises v jednotlivých uzlech pro záběr zubů v kritické rovině je vidět na obrázku 52. Maximální zobrazované hodnoty jsou zobrazeny červeně a jsou nastaveny maximálně na 120 MPa. Vyšší napětí byla zešedivěna.

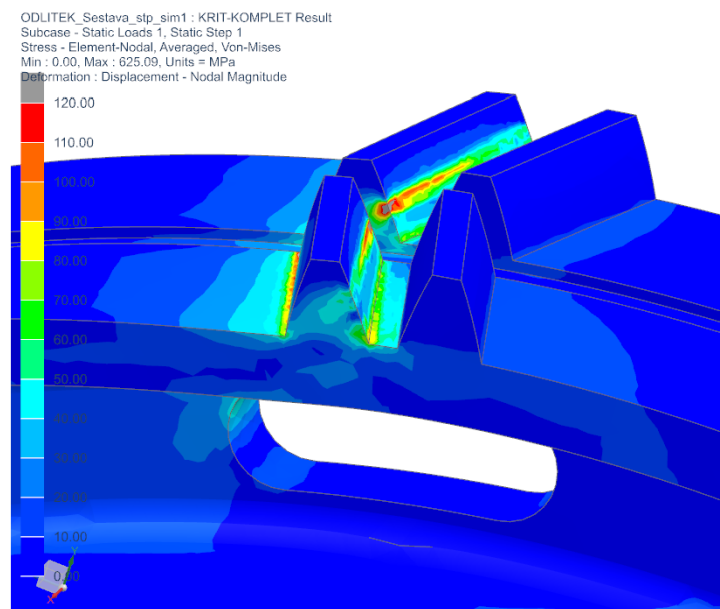


Obrázek 52: Výsledky odlitku po optimalizaci

Změnou spojení kolíků s věncem spojky a kolem z gluingu na kontakt a přidáním pastorků do kritické a porovnávací roviny namísto definování vazeb na plošce zubu bylo dosaženo stavu odpovídajícímu skutečnému zatěžování. Napětí v okolí záběru zubů je rovnoměrněji rozloženo a u kolíků nejsou tak vysoké extrémy, jako tomu bylo u hrubého výpočtu. Průběh napětí na kolíku a jeho okolí je vidět obrázku 53, průběh napětí v okolí ozubení je vidět na obrázku 54.



Obrázek 53: Detail zatížení kolíků odlitku po optimalizaci



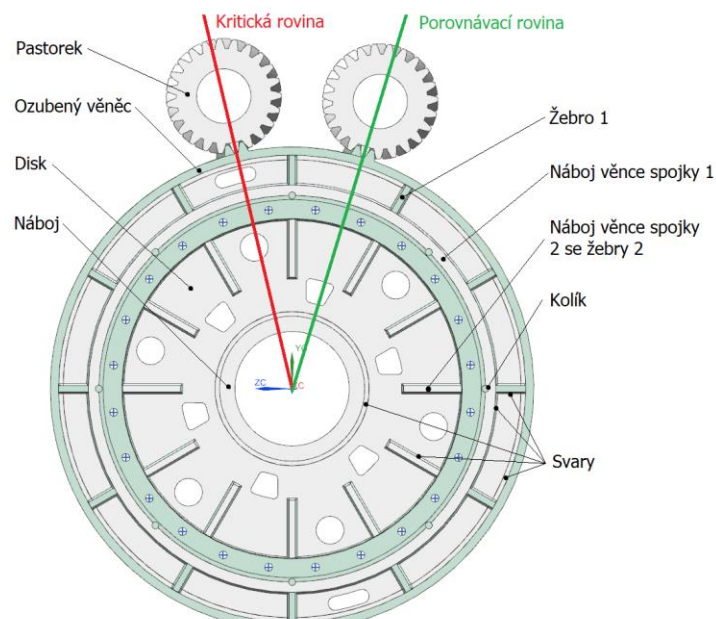
Obrázek 54: Detail zatížení ozubení odlitku napřesno

Výsledky průběhů napětí a animace zatěžování a následné deformace optimalizovaného odlitku reflektují skutečný stav. Tyto výsledky budou sloužit jako základ pro porovnání se simulací svařence.

Pozn.: Výsledky pro záběr zubů v porovnávací rovině jsou téměř identické, s rozdílem menšího zatížení oválného otvoru na jeho levé straně. Proto nejsou v této kapitole zmíněny.

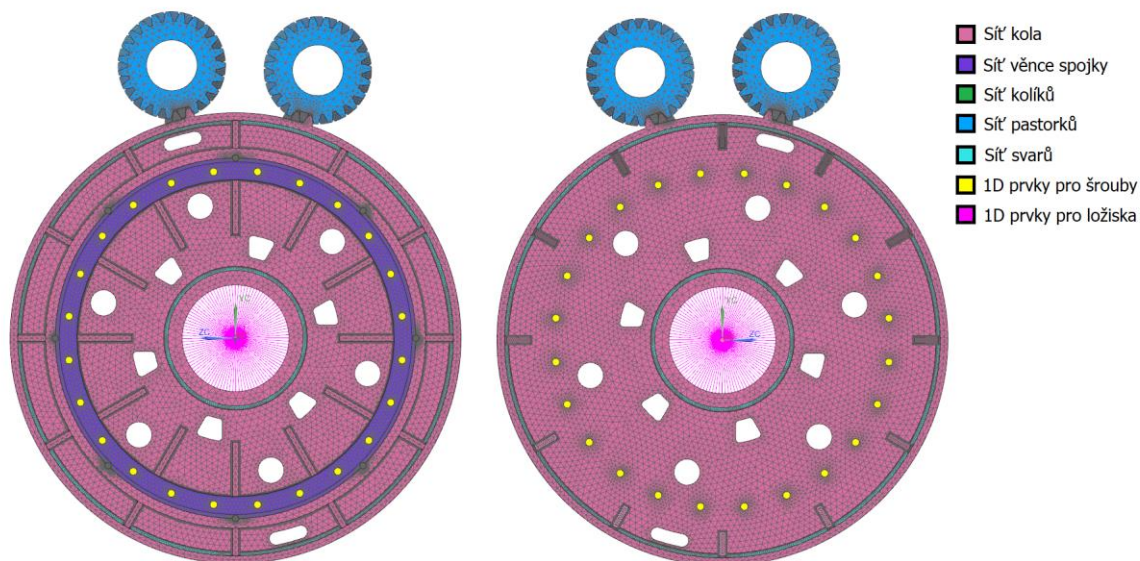
6.3 Výpočet svařence kola

Na základě zvolené optimální varianty byl v Inventoru vytvořen nový model složený z částí z obrázku 24 doplněným o modely věnce spojky a jednotlivých kolíků. Na modelech disku a náboje věnce spojky 2 byly zhotoveny úkosity pro svařování včetně vytvoření modelů jednotlivých svarů podle obrázku 32. Pro tuto sestavu byl v NX vytvořen idealizovaný díl, kde byly provedeny další úpravy, například odstranění ozubení mimo kritické a porovnávací roviny, viz obrázek 55.



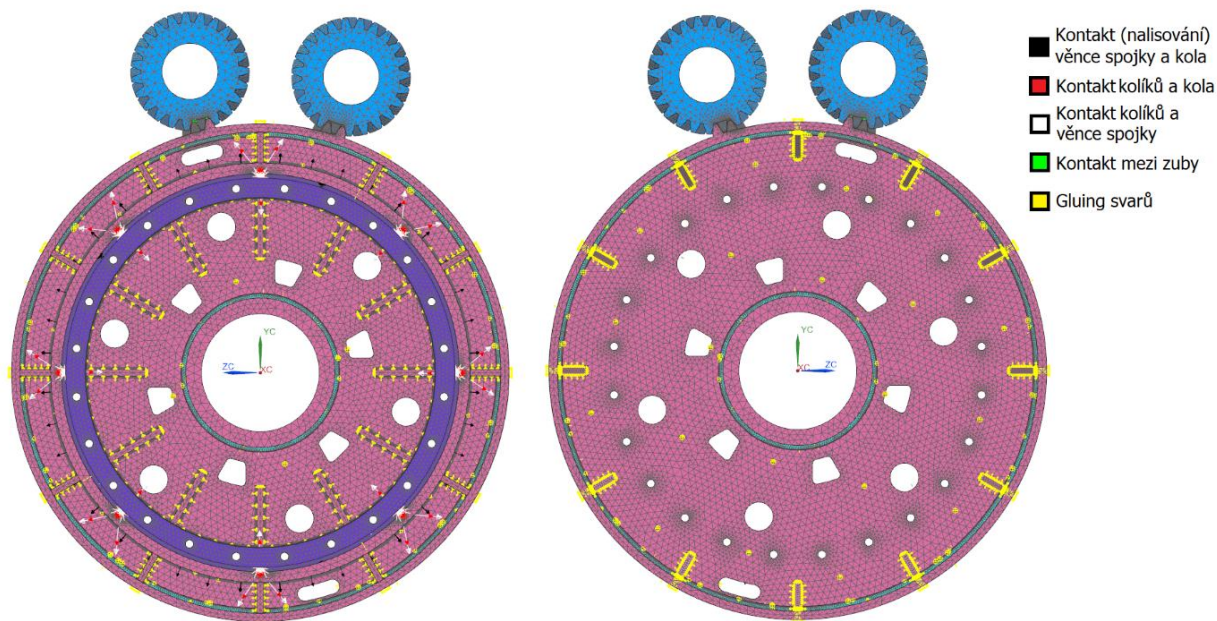
Obrázek 55: Idealizovaný díl svařence

Na obrázku 56 lze vidět zasíťování svařence. Velikost sítě jednotlivých dílů byla volena shodně s finální podobou sítě odlitku. Rozdíl je pouze v daleko jemnější síti u jednotlivých svarů. Ostatní úpravy (1D prvky, zjemnění sítě v okolí kolíků a dotyku zubů) byly rovněž ponechány stejné jako u optimalizovaného odlitku.



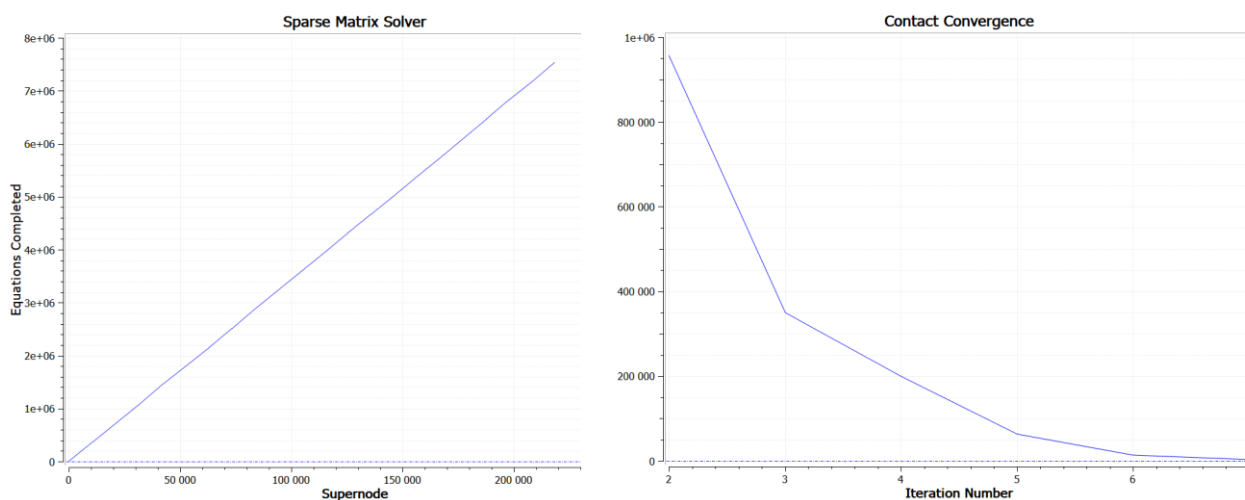
Obrázek 56: Sít' svařence

Propojení pastorků s kolem, nalisování kolíků a také nalisování věnce spojky pomocí funkce Surface-to-Surface contact zůstalo nezměněno (včetně příslušných offsetů dle daných uložení). Jednotlivé díly svařence byly propojeny pomocí vymodelovaných svarů pomocí funkce Surface-to-Surface gluing. Vizualizace je na obrázku 57.



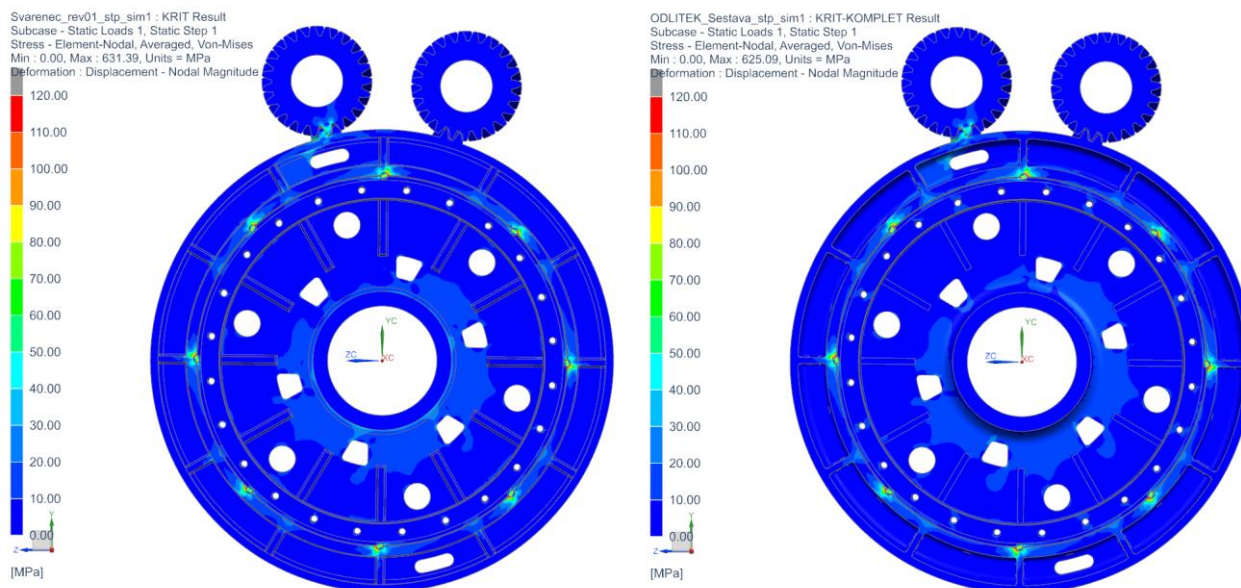
Obrázek 57: Propojení jednotlivých dílů svařence

Vazby i zatížení zůstalo stejné jako u odlitku (viz obrázky 49 a 50), stejně jako nastavení počtu vnějších a vnitřních iterací. Počet řešených rovnic je dvojnásobný oproti optimalizovanému výpočtu odlitku. Iterace dokonvergovala k nule opět v 7 cyklu (viz obrázek 58), výpočet tedy proběhl v pořádku.



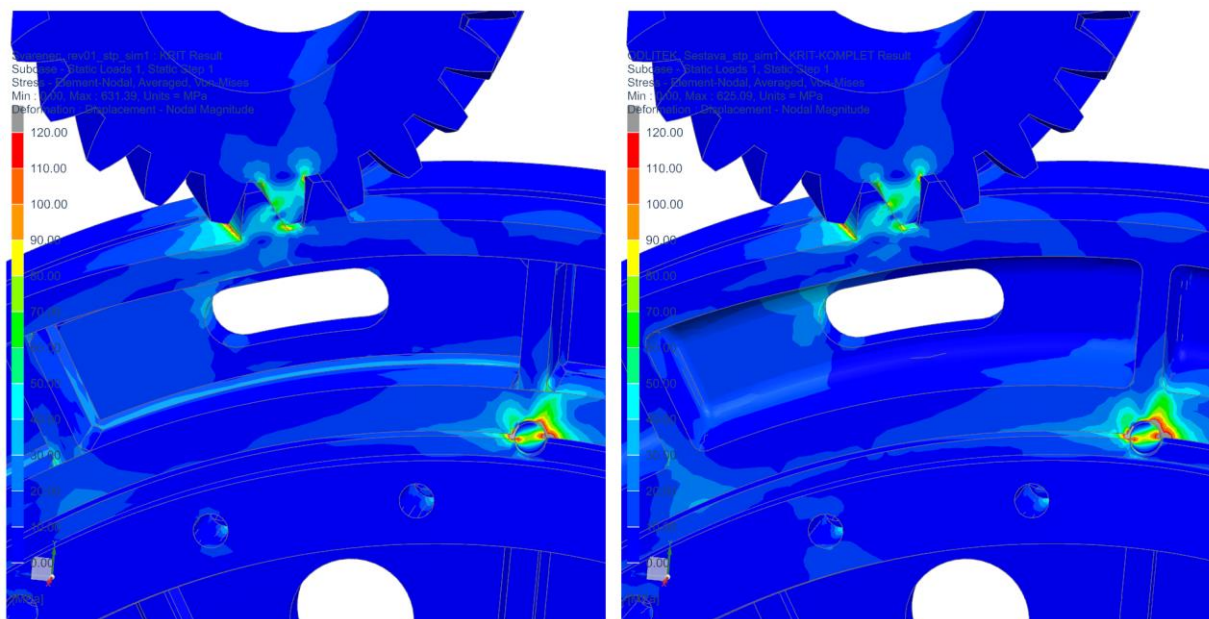
Obrázek 58: Report počtů rovnic a konvergence kontaktu svařence

Na obrázku 59 lze vidět průběh redukovaného napětí Von-Mises v jednotlivých uzlech svařence (vlevo) a optimalizovaného odlitku (vpravo).



Obrázek 59: Porovnání svařence a odlitku

Na obrázku 60 je vidět detail zatížení v okolí kolíku a v okolí záběru zubů soukolí svařence (vlevo) a optimalizovaného odlitku (vpravo).



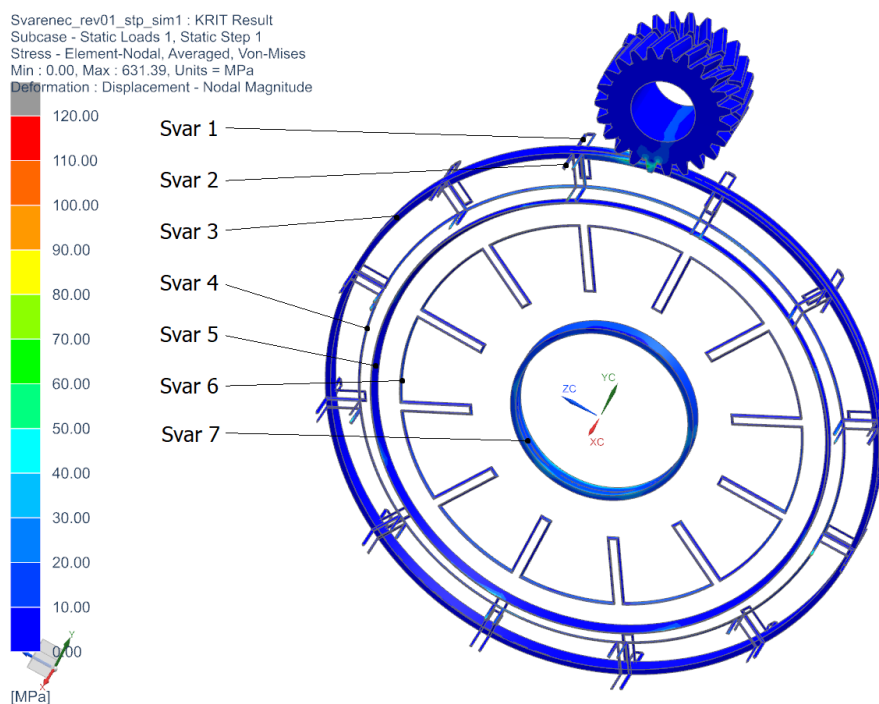
Obrázek 60: Detail zatížení kolíků a ozubení svařence a odlitku

Jak lze vidět na obrázcích 59 a 60, průběhy napětí a jejich velikosti jsou si velice podobné, čímž bylo dosaženo hlavního cíle této práce.

Pozn.: Výsledky pro záběr zubů v porovnávací rovině jsou téměř identické, s rozdílem menšího zatížení oválného otvoru na jeho levé straně. Proto nejsou v této kapitole zmíněny.

6.3.1 Analýza svarů

Na obrázku 61 je vidět rozložení napětí u jednotlivých svarů. Svary byly očíslovány následovně: Svar 1 pro zavaření žebér 3, svar 2 pro svaření žebér 1, svar 3 pro svaření disku a ozubeného věnce, svar 4 pro svaření vnějšího průměru náboje pro věnec spojky, svar 5 pro svaření náboje věnců spojky 1 a 2, svar 6 pro svaření vnitřního průměru náboje věnce spojky a svar 7 pro svaření náboje a disku.



Obrázek 61: Analýza svarů

Výsledky z obrázku 61 byly zahrnuty do tabulky 11.

Tabulka 11: Analýza svarů

Označení	Typ svaru	Velikost	Rozptyl 10 max. napětí
Svar 1	Koutový	a10	26.5 - 22.8 MPa
Svar 2	Koutový	a10	78.0 - 63.7 MPa
Svar 3	Oboustranný 1/2V	Plný průvar	74.9 - 69.5 MPa
Svar 4	Koutový	a10	35.1 - 33.8 MPa
Svar 5	1/2V	Plný průvar	300+ MPa
Svar 6	Koutový	a10	38.5 - 33.6 MPa
Svar 7	Oboustranný 1/2V	Plný průvar	53.8 - 51.9 MPa

Všechny svary kromě svaru 5 vykazují bezpečný rozptyl napětí. U svaru 5 vycházejí lokálně velmi vysoká napětí pouze v místech uložení kolíků. Takto vysoké hodnoty napětí jsou ovlivněny okrajovými podmínkami a je tedy možné je zanedbat.

Jak bylo správně předpokládáno u svarů 3 a 7, tedy u svarů mezi ozubeným věncem a diskem a mezi nábojem a diskem, použití koutového svaru je zde nadbytečné a tento kombinovaný svar by byl velice předimenzovaný, viz závěr kapitoly 5.5 Výpočet svarů.

Závěr

V této diplomové práci byl zpracován návrh svařence ozubeného kola pro firmu Šmeral Brno a.s. V úvodní kapitole byla představena firma Šmeral Brno a zpracovaná řešerše vybraných tvářecích strojů z jejich portfolia. V další části jsou podrobně zpracovány tvářecí stroje řady LMZ, a dále konkrétněji lis LMZ 4000, pro který bylo svařované ozubené kolo navrženo. Na vlastních schématech byl vysvětlen princip funkce lisu a přenosu kroutícího momentu.

V další části byl vytvořen variantní návrh svařence. Vycházelo se ze stávajícího řešení ozubeného kola řešeného jako odlitek, pro který byl vytvořen model v Inventoru. Celkem byly navrženy a popsány čtyři varianty a na základě vícekritériální metody rozhodování byl vybrán optimální návrh skládající se z ozubeného věnce, náboje pro věnec spojky 1 a 2, disku, náboje a dvou typů žeber. Pro optimální návrh byly navrženy přídatky na obrábění a technologie výroby pro jednotlivé díly svařence. Závěrem kapitoly bylo nastíněné ekonomické zhodnocení, které kvůli výrobnímu a obchodnímu tajemství bylo zpracováno pouze okrajově.

Dále byl stanoven zátěžný moment potřebný pro dosažení jmenovité síly lisu. Ten byl stanoven z geometrie výstředníkového mechanismu a známé síly lisu. Do výpočtu byly zahrnuty celkem tři pasivní odpory, výsledná hodnota momentu vyšla 2,41 MNm. Následně bylo zpracováno posouzení provozuschopnosti, kde bylo provedeno vyhodnocení únosnosti boků zubů v dotyku a únosnosti zubů v ohybu. Vyhodnocovacím kritériem byla zvolena bezpečnost. Hodnota součinitele bezpečnosti proti vzniku únavového poškození boků zubů vyšla 0,57. Tato nízká hodnota téměř jistě zaručuje, že u kola bude docházet k pittingu. Nicméně je tato hodnota považována za vyhovující a je nutné klást vyšší nároky na kontrolu ozubení v průběhu jeho funkce a jeho případné korekci. Součinitel bezpečnosti proti vzniku únavového lomu byl spočten na vyhovující hodnotu 2,54.

V další kapitole byl proveden návrh technologie svařování, kde byly doporučeny vhodné metody svařování. Pro takto rozměrné součásti byla nakonec vybrána metoda svařování pod tavidlem pomocí svařovacího robota Motoman AR3120. Součástí kapitoly je návrh svarových ploch (úkosů) pro tupé svary. Mezi náboj a disk a dále mezi disk a ozubený věnec byl vybrán nesymetrický oboustranný $\frac{1}{2}V$ svar pro zajištění plného provaření v celé tloušťce disku. Pro svaření nábojů věnce spojky 1 a 2 byl vybrán jednostranný $\frac{1}{2}V$ svar. Dále byla stanovena teplota předehřevu na 250 °C. Pro kontrolu povrchových diskontinuit navržených svarů bylo doporučeno vizuální a kapilární zkoušení. Pro kontrolu vnitřních diskontinuit bylo doporučeno zkoušení ultrazvukem. Závěrem této kapitoly byla provedena analýza potřeby koutových svarů u disku (v kombinaci s tupým svarem), kde bylo zjištěno, že je jejich použití z pevnostního hlediska nepotřebné.

Na závěr práce byly vypracovány dva pevnostní návrhy pomocí metody konečných prvků v NX. V první fázi bylo spočteno stávající řešení v podobě odlitku, pro které se provedla optimalizace. Optimalizovaný výpočet odlitku se následně porovnal s výpočtem svařence, kde průběhy a velikost napětí jsou si velmi podobné. Napětí v jednotlivých svarech vycházejí kolem bezpečných 20-50 MPa, u dvou svarů lokálně necelých, stále bezpečných, 80 MPa. Z těchto důvodů lze konstatovat, že navržené svařované ozubené kolo spolehlivě přenesou potřebné zatížení.

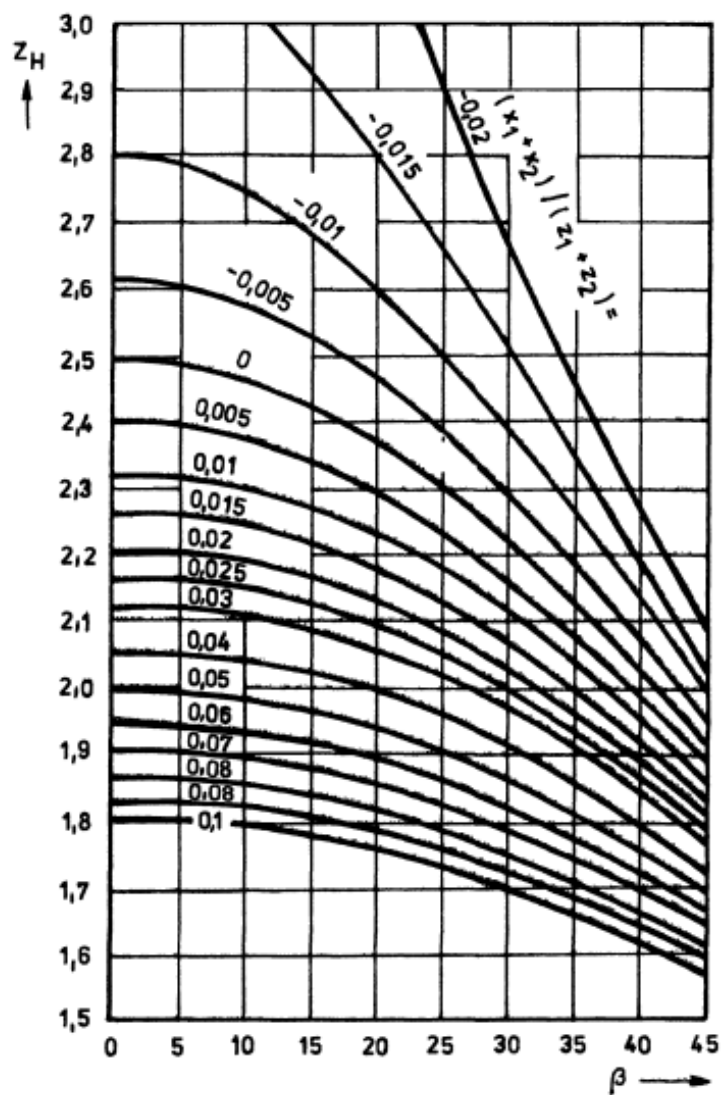
Navržené konstrukční i technologické řešení svařence ozubeného kola pro lis LMZ 4000 splňuje všechna kritéria zadaná konzultantem práce. Součástí práce je výrobní výkres svařence ozubeného kola a dílčí výrobní výkresy jednotlivých dílů. Pro výkresy byl použit Solid Edge.

Reference

1. Šmeral Brno a.s. Tvářecí stroje. *Šmeral*. [Online] <https://www.smeral.cz/>.
2. —. Katalog LMZ ŠMERAL 1000-6500. *Šmeral*. [Online] 2019. <https://www.smeral.cz/cs/downloads/1/ke-stazeni-katalogy>.
3. The seamless rolled ring forging process. *Steel Forge*. [Online] <https://steelforge.com/seamless-rolled-ring-process/>.
4. FeRRALLOY. What is the Seamless Rolled Ring Forging Process. *FeRRALLOY*. [Online] 2016. <https://www.ferralloy.com/post/seamless-rolled-ring-forging-process>.
5. BOHEMIA RINGS s.r.o. Tepelné tváření. *Bohemia rings*. [Online] <https://bohemiaring.cz/index.php/tepelne-tvareni/>.
6. Ring forging. *The library of manufacturing*. [Online] https://www.thelibraryofmanufacturing.com/ring_forging.html.
7. TRIANGOLO spol. s.r.o. Kování. *Triangolo*. [Online] <https://triangolo.cz/vyroba/kovani/>.
8. CZECH PRECISION FORGE a.s. Volné kování. *cpforge*. [Online] http://www.cpforge.com/uploads/files/Open-die_Forgings_General_Dimensions.pdf.
9. ViralMachinery. Exciting Steel Bending Machine Working & Huge Metal Plate Rolling Methods. *Youtube*. [Online] 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=2VU9eD5T0OU&t=438s>.
10. KOMA - Industry s.r.o. Zakružovací stroj BDUWO 150/4. *KOMA Industry*. [Online] <https://www.komaindustry.cz/reference/reference-fluidni-systemy/25-zakruzovaci-stroj-bduwo-150-4>.
11. Zhang, Jiaolong. Cross-section of the analyzed tunnel ring consisting of six segments. *Research Gate*. [Online] https://www.researchgate.net/figure/Cross-section-of-the-analyzed-tunnel-ring-consisting-of-six-segments_fig2_329625838.
12. Ltd, Selmach Machinery. Ajan CNC Plasma piercing. *Youtube*. [Online] 2022. <https://www.youtube.com/watch?v=KLXeCi4WcwY>.
13. ČSN 01 4686 - Pevnostní výpočet čelních a kuželových ozubených kol. Praha : Úřad pro technickou normalizaci a měření, 1989.
14. Yaskawa Electric Corporation. AR3120, Long Reach, Thru-Arm Robot . *Motoman*. [Online] <https://www.motoman.com/en-us/products/robots/industrial/welding-cutting/ar/ar3120>.
15. Koutný, Jiří. Svařování pod tavidlem (SAW). *Svar Bazar*. [Online] <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2009010801>.
16. —. MIG nebo MAG? Jaký je rozdíl? *Svar Bazar*. [Online] <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2007101501>.
17. —. Výpočet teploty předehřevu. *Svar Bazar*. [Online] <https://www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=predehrev>.
18. ČSN EN ISO 9692-1 - Svařování a příbuzné procesy. Kladno : Úřad pro technickou normalizaci a měření, 2014.
19. ČSN EN ISO 17635 - Nedestruktivní zkoušení svarů. Brno : Úřad pro technickou normalizaci a metrologii, 2018.
20. ČSN EN 1993-1-8 - Navrhování ocelových konstrukcí. Praha : Úřad pro technickou normalizaci a měření, 2013.

PŘÍLOHA 1: Tabulky a grafy z normy ČSN 01 4686-1/5

Součinitel tvaru spoluzabírajících zubů Z_H :



Součinitel vnějších dynamických sil K_A :

Zatěžování převodovky hnacím strojem	Zatěžování převodovky hnaným (pracovním) strojem			
	plynulé	s malou nerovnoměrností	se střední nerovnoměrností	s velkou nerovnoměrností
plynulé	1,0	1,25	1,5	1,75
s malou nerovnoměrností	1,1	1,35	1,6	1,85
se střední nerovnoměrností	1,25	1,50	1,75	2,0
s velkou nerovnoměrností	1,5	1,75	2,0	2,25

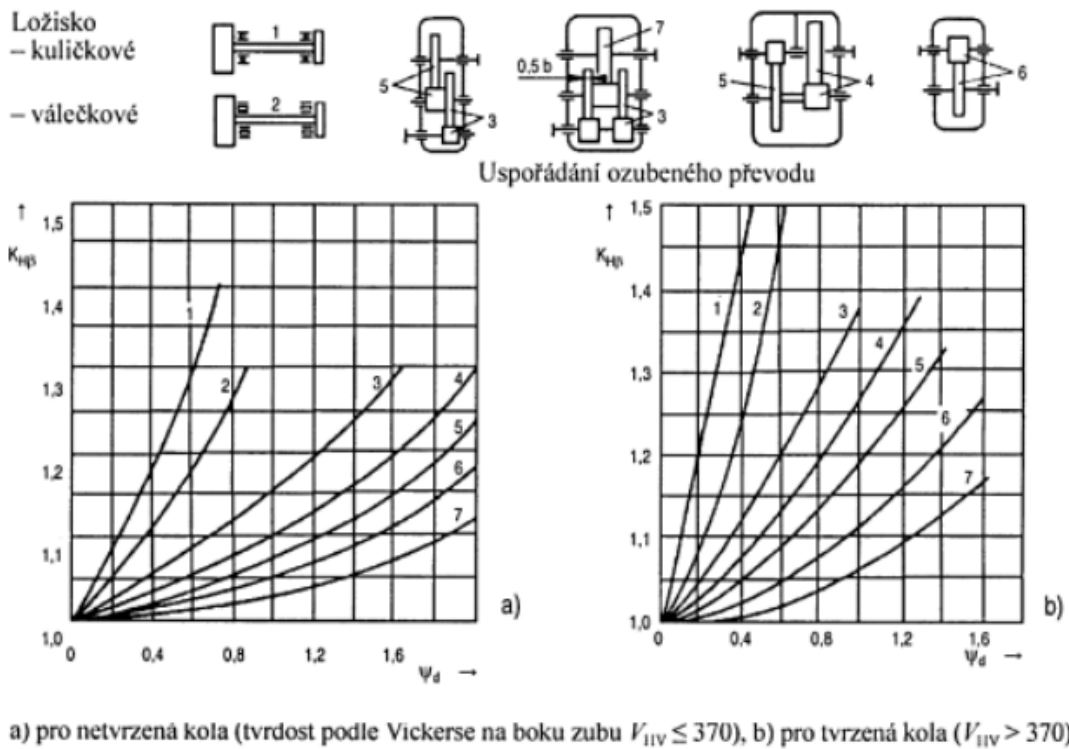
Pomocné koeficienty K_P a K_Q :

Stupeň přesnosti podle ČSN 01 4682	K_P		K_Q		$\left(\frac{z_1 \cdot v}{100} \cdot \sqrt{\frac{u^2}{1+u^2}}\right)$ mezní	
	Ozubení přímé	Ozubení šikmé $\varepsilon_\beta \geq 1$	Ozubení přímé	Ozubení šikmé $\varepsilon_\beta \geq 1$	Ozubení přímé	Ozubení šikmé $\varepsilon_\beta \geq 1$
3	2,15	1,91	0,0193	0,0087	10	8
4	3,91	3,48			10	8
5	7,51	6,68			10	8
6	14,94	13,30			10	8
7	26,81	23,87			10	8
8	39,07	34,79			7	5,7
9	52,85	47,06			5	4,3
10	76,60	68,21			3,6	3
11	102,64	91,40			2,3	2
12	146,31	130,28			1,5	1,3

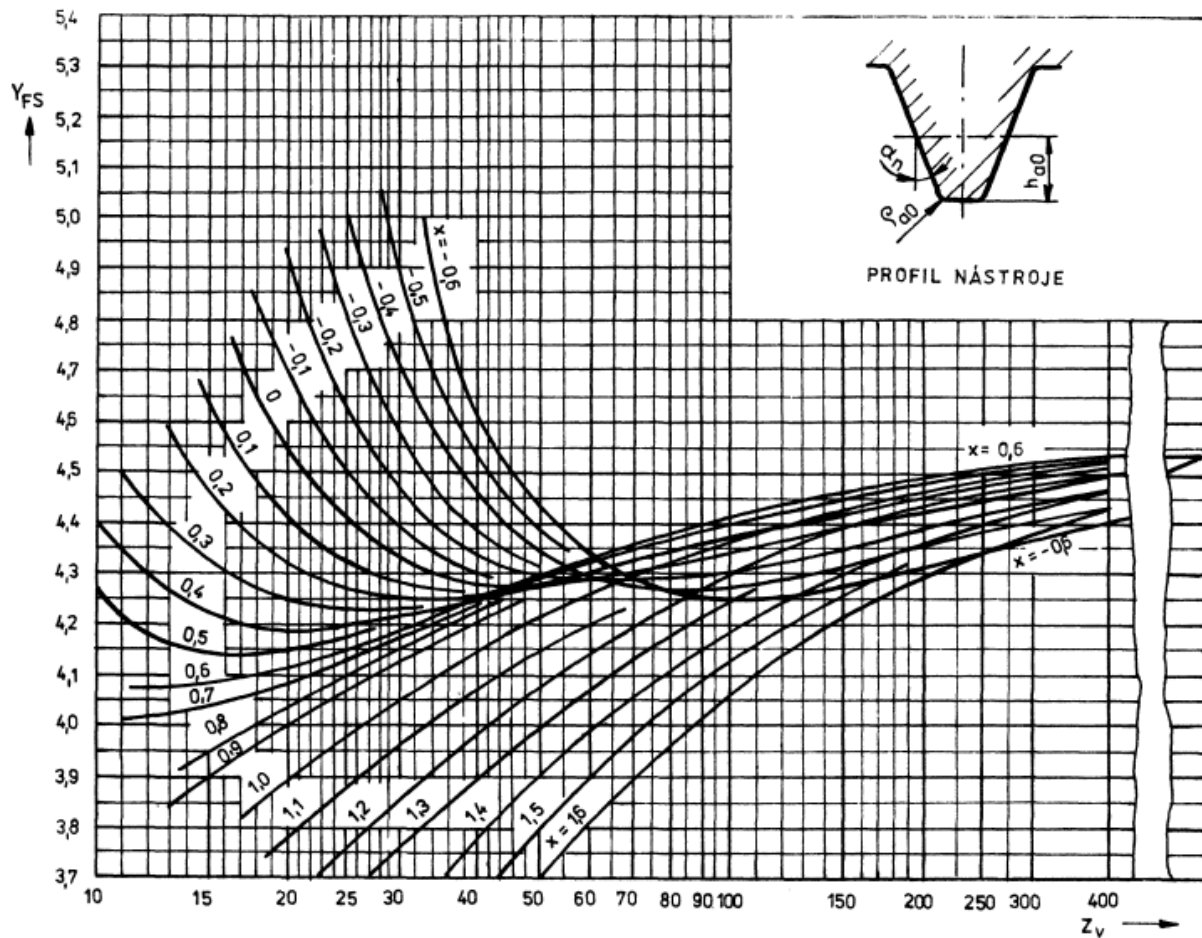
Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů $K_{H\alpha}$:

Měrné zatížení $F_1/(b_u K_A)$			$> 100 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$						$\leq 100 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$	
Stupeň přesnosti podle ČSN ISO 1328-1 (014682)			6 (5)	7 (6)	8 (7)	9 (8)	10 (9)	11 (10)	12 (11 až 12)	≥ 6 $\geq (5)$
Kola cementovaná, nitridovaná, karbonitridovaná nebo povrchově kalená	přímé ozubení	K_{Ils}	1,0		1,1	1,2	$1/Z_c^2 \geq 1,2$			
		$K_{F\alpha}$	1,0		1,1	1,2	$1/Y_c^2 \geq 1,2$			
	šikmé ozubení	K_{Ils}	1,0	1,1	1,2	1,4	$\varepsilon_\alpha / \cos^2 \beta_b \geq 1,4$			
		$K_{F\alpha}$	1,0	1,1	1,2	1,4	$\varepsilon_\alpha / \cos^2 \beta_b \geq 1,4$			
Kola netvrzená	přímé ozubení	K_{Ils}	1,0		1,1	1,2	$1/Z_c^2 \geq 1,2$			
		$K_{F\alpha}$	1,0		1,1	1,2	$1/Y_c^2 \geq 1,2$			
	šikmé ozubení	K_{Ils}	1,0	1,1	1,2	1,4	$\varepsilon_\alpha / \cos^2 \beta_b \geq 1,4$			
		$K_{F\alpha}$	1,0	1,1	1,2	1,4	$\varepsilon_\alpha / \cos^2 \beta_b \geq 1,4$			

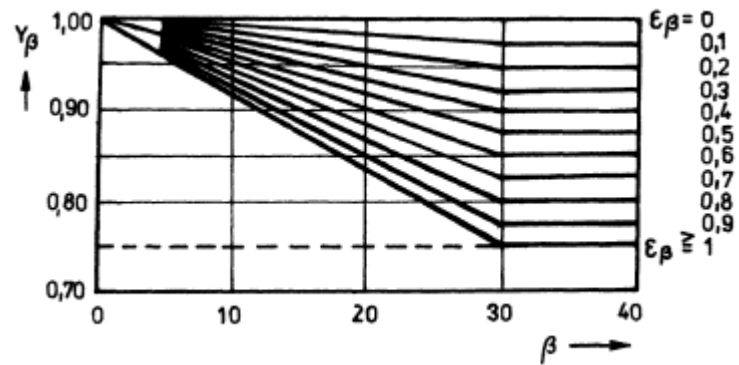
Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce $K_{H\beta}$:



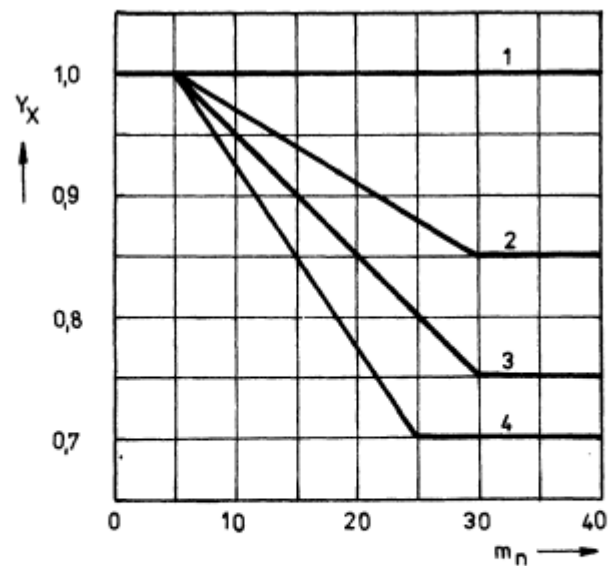
Součinitel tvaru zubu a koncentrace napětí Y_{FS} :



Součinitel sklonu zubu Y_β :

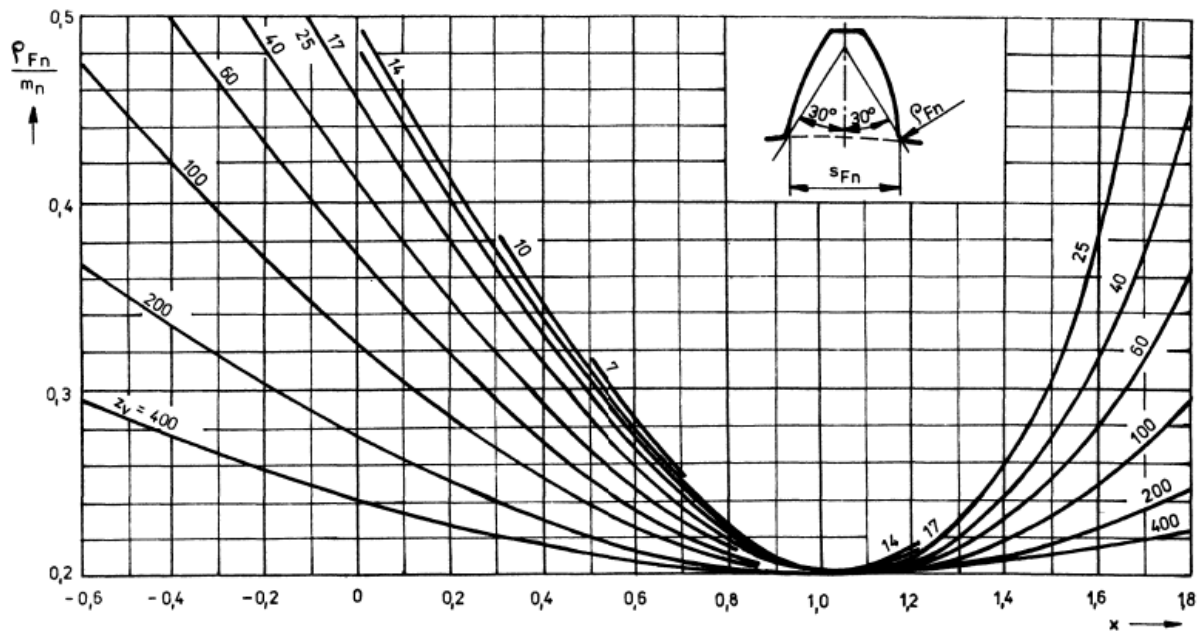


Součinitel velikosti Y_X :

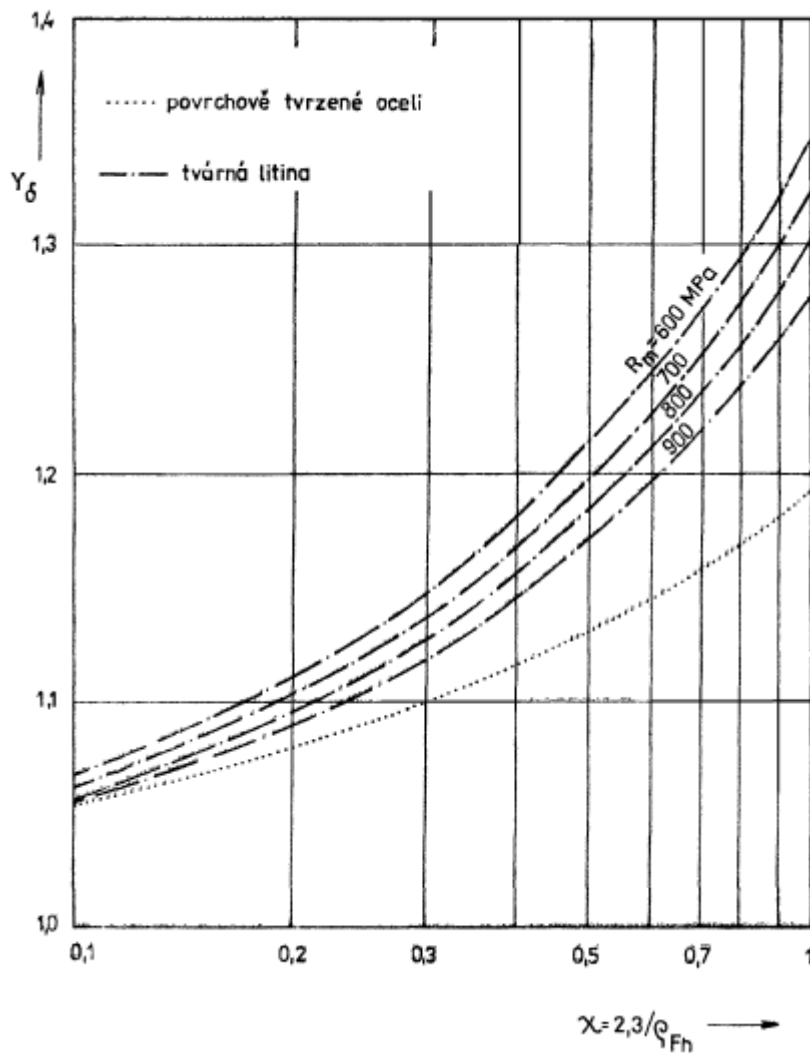


- 1 všechny materiály při největším zatížení
- 2 oceli povrchově netvrzené, např. konstrukční ocel, zušlechtěná ocel, litá ocel, tvárná litina (perlitická, bainitická)
- 3 oceli povrchově tvrzené, např. cementované, nitridované, nitrocementované, povrchově kalené, karbonitridované
- 4 tvárná litina (femitická)

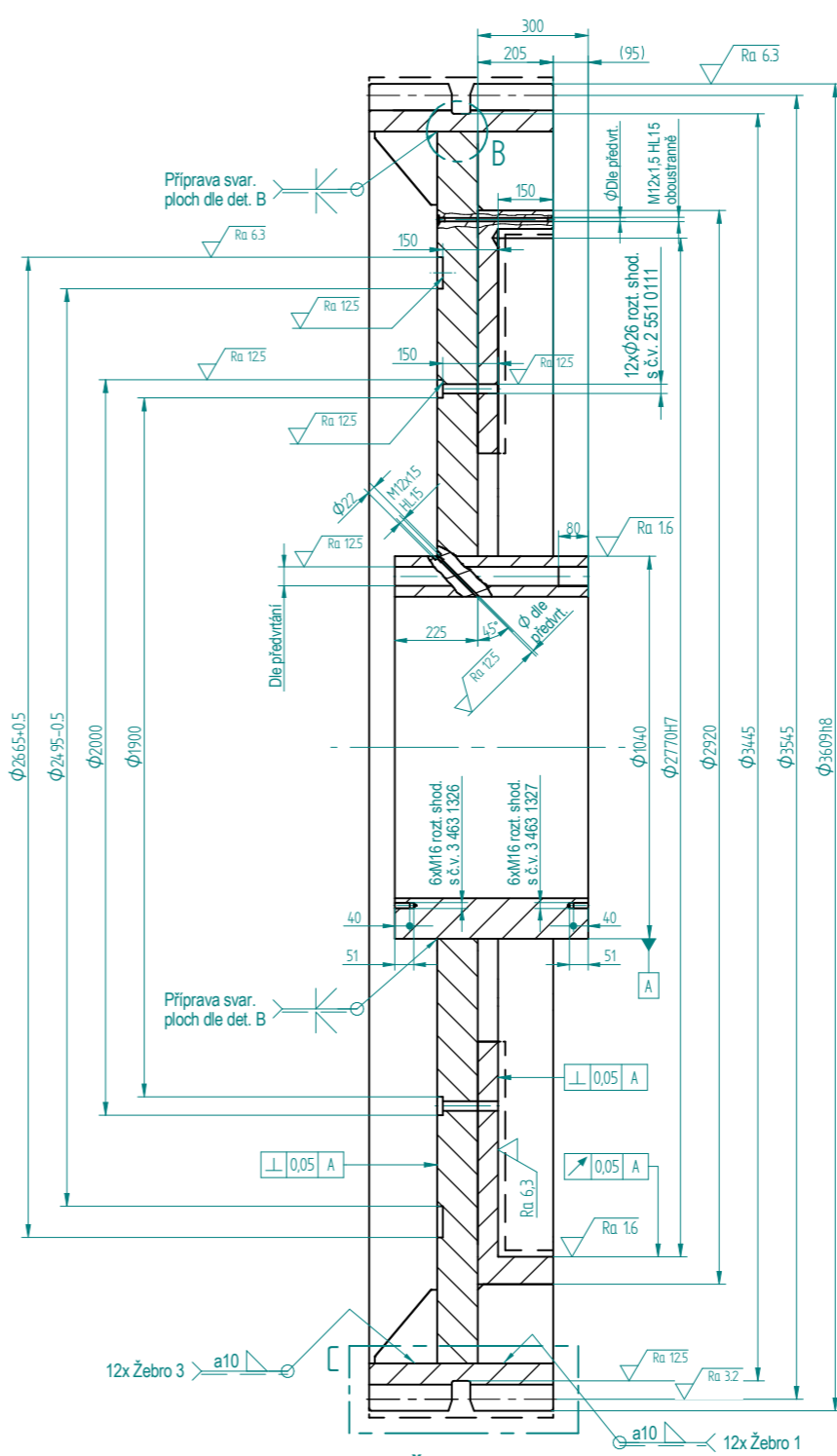
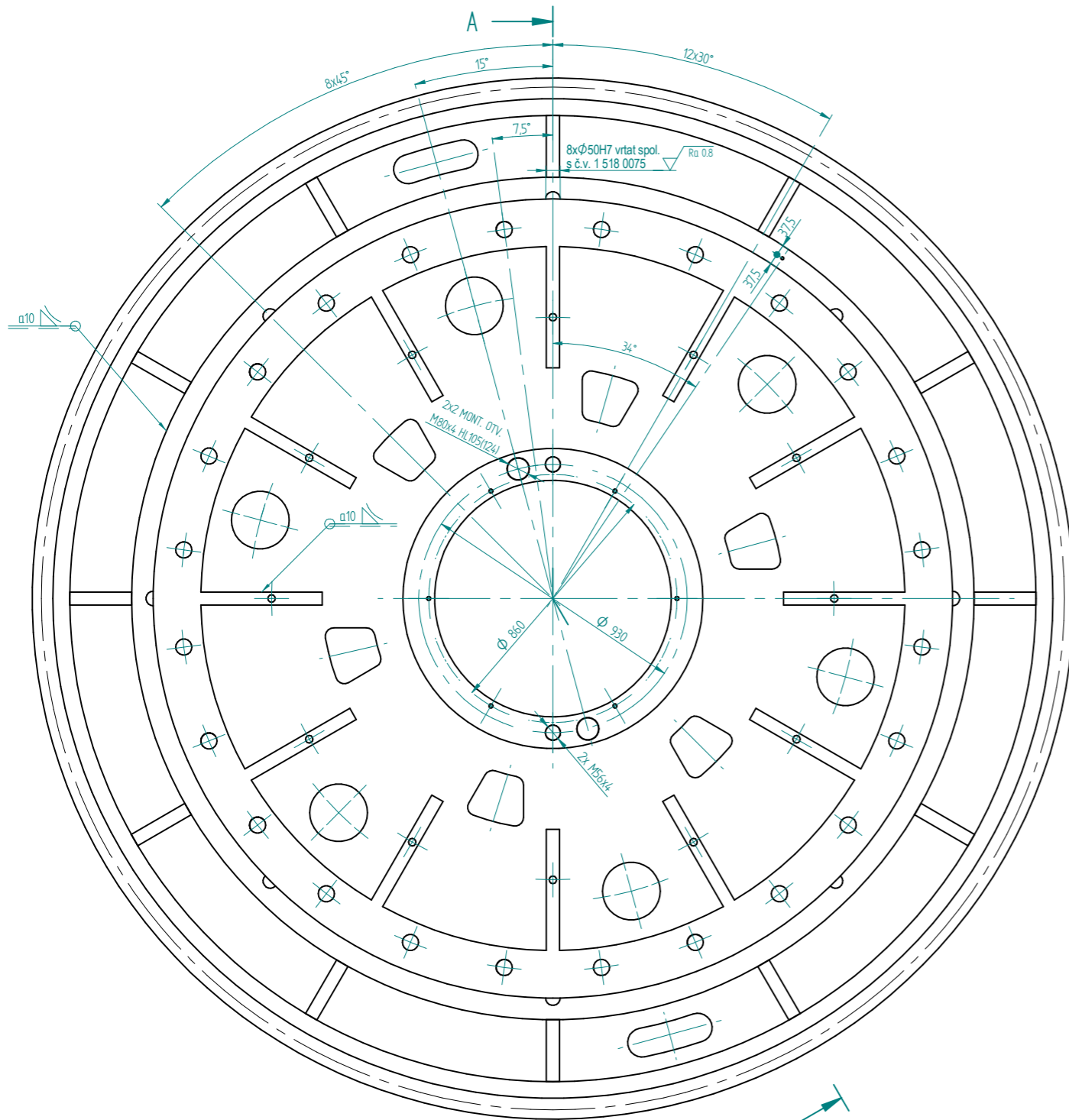
Poloměr křivosti podělený o hodnotu normálového modulu $\frac{\rho_{Fn}}{m_n}$:



Součinitel vrubové citlivosti Y_δ :

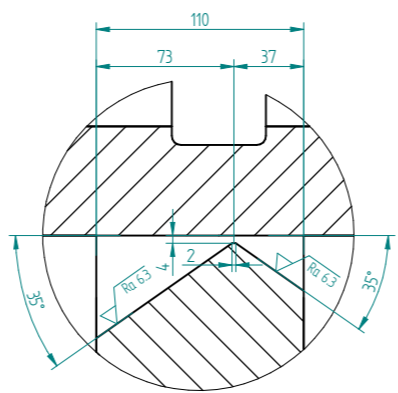
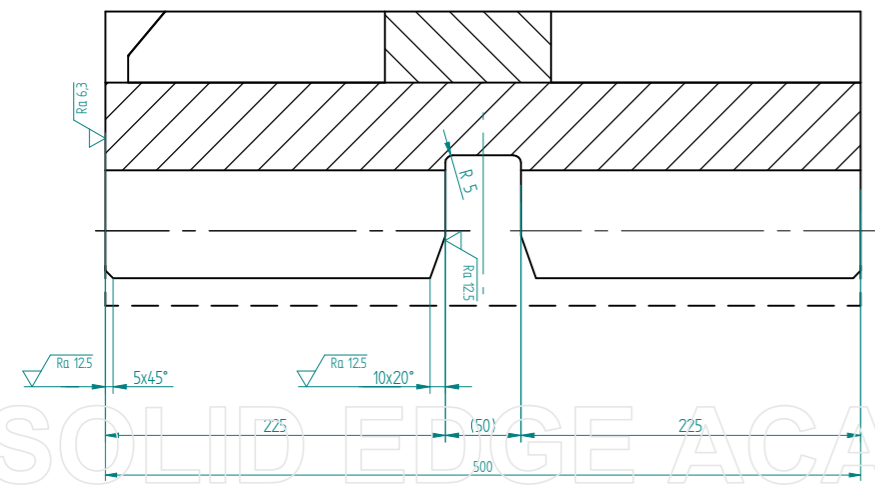


PŘÍLOHA 2: Výrobní výkresová dokumentace



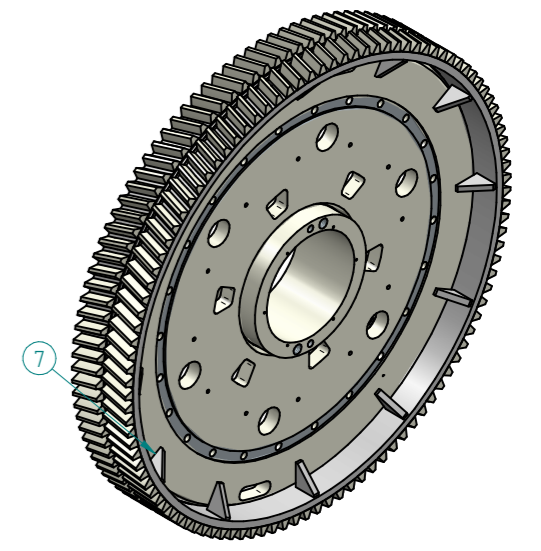
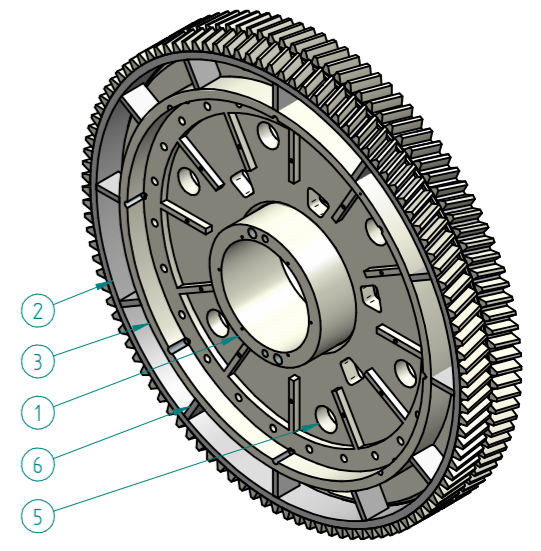
ŘEZ A-A

DETAIL C



DETAIL B - PŘÍPRAVA SVAROVÝCH PLOCH NESOUMĚRNÉHO 1/2V SVARU

Modul	m	32	
Modul čelní	mt	33,129	
Počet zubů	z	107	
Normální základní profil	-	ČSN 01 4607	
Úhel sklonu boční křivky zubů	β	15°	
Smysl stoupání boční křivky zubu	-	PRAVÝ i LEVÝ	
Stupeň přesnosti	-	6d	
Jednotkové posunutí	x	0	
Průměr roztečné kružnice	D	3545	
Průměr základní kružnice	Db	3317	
Základní profil	Úhel záběru	α	20°
	Výška hlavy zubů	w	1
	Hlavová vůle	ca	0,25
Spoluzabírající kolo	Číslo výkresu	-	25 140 300
	Počet zubů	z	23
	Vzdálenost os a její mezní úchytky	a	2153,5

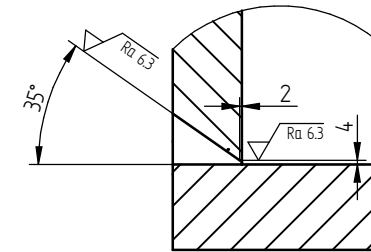
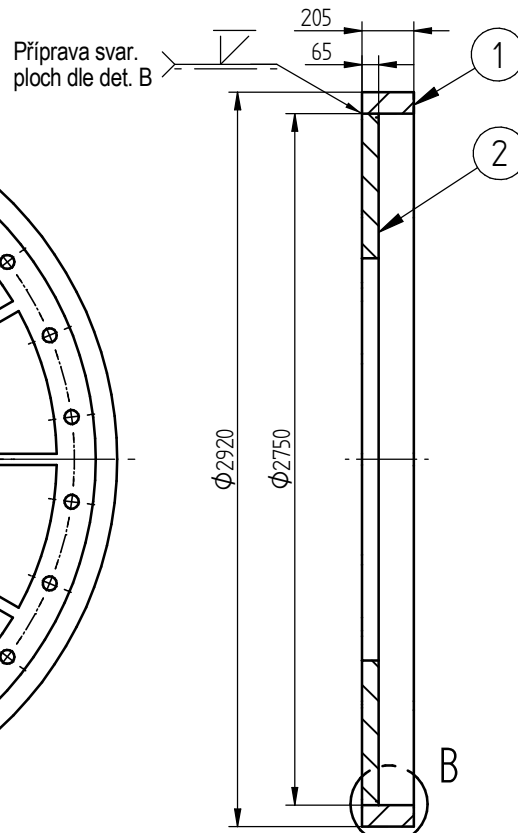
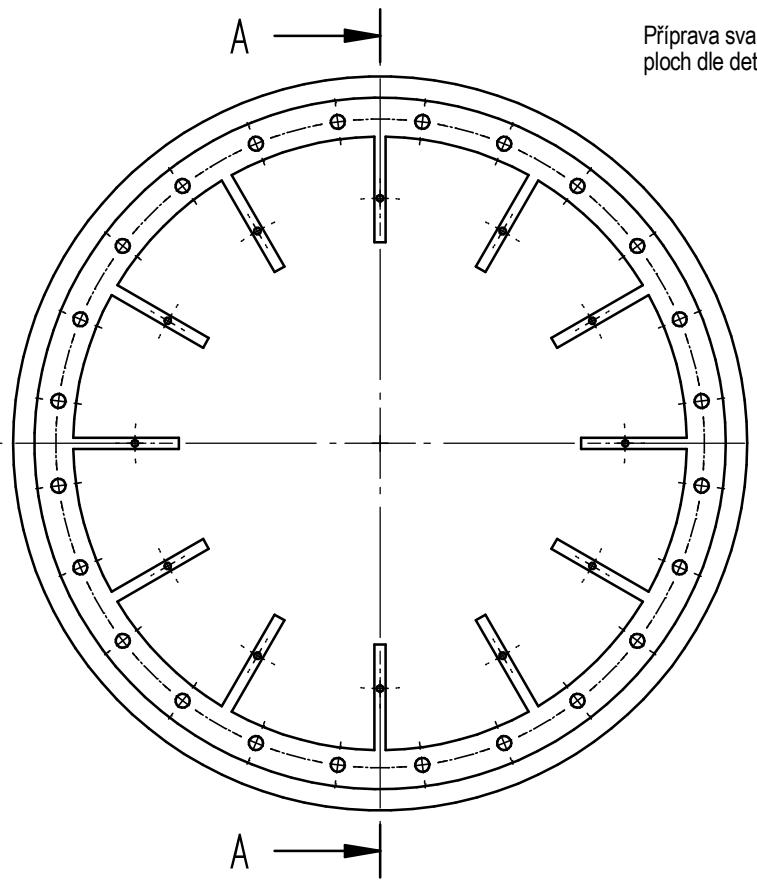


Po svaření žihat na odstranění vnitřního pnutí ✓ (✓)

6	ŽEBRO 3	S355J2	N-DP00001-06	12	Nakupovaný díl
5	ŽEBRO 1	S355J2	N-DP00001-05	12	Nakupovaný díl
4	DISK	S355J2	N-DP00001-04	1	Nakupovaný díl
3	NÁBOJ VĚNCE SPOJKY	S355J2	VD-DP00001-03	1	
2	OZUBENÝ VĚNEC	S355J2	VD-DP00001-02	1	
1	NÁBOJ	S355J2	VD-DP00001-01	1	

Pozice	Název	Materiál	Číslo dokumentu	KS	Poznámka
	Svařené ozubené kolo lisu LMZ 4000		VD-DP00001		

FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI
 KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ
 David Kovařík
 13.04.2023
 ISO 16016
 VD-DP00001
 1/1



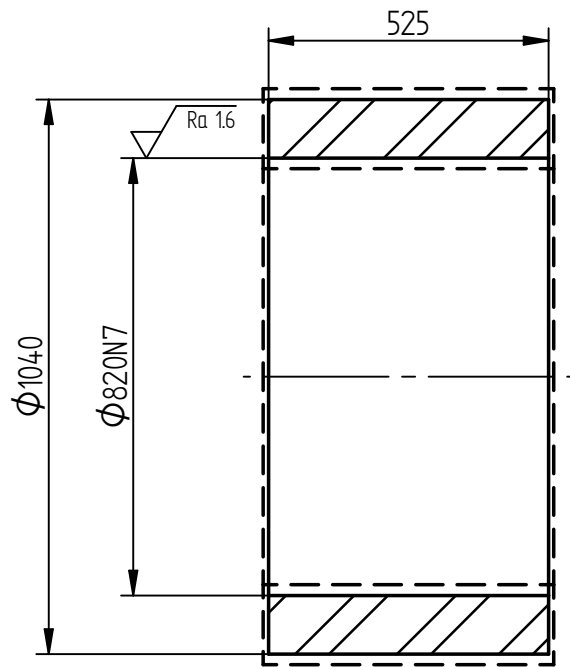
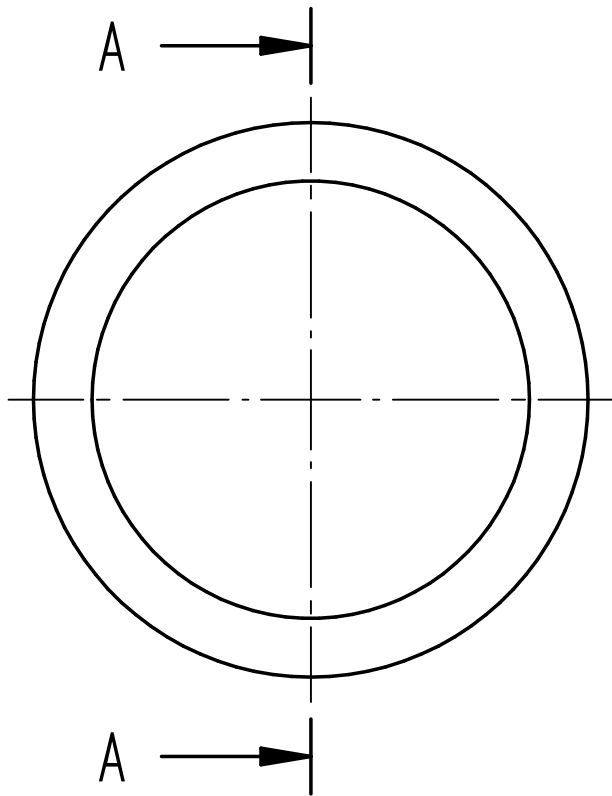
DETAIL B - PŘÍPRAVA SVAROVÉHO SPOJE JEDNOSTRANNÉHO 1/2V SVARU

ŘEZ A-A
(DÍRY V ŽEBRU SKRYTY)

✓ (✓)

Pozice	Název	Číslo výkresu	Materiál	KS	Poznámka
1	NÁBOJ VĚNCE SPOJKY 1	N-DP00001-03-01	S355J2	1	Nakupovaný díl
2	NÁBOJ VĚNCE SPOJKY 2	N-DP00001-03-02	S355J2	1	Nakupovaný díl

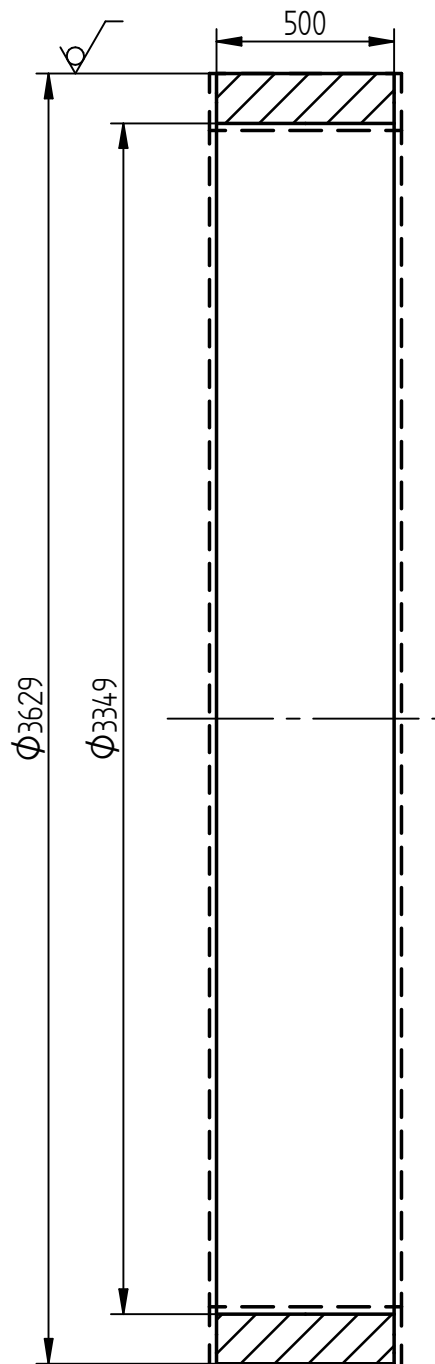
PROMĚTÁNÍ	MĚŘÍTKO	PŘESNOST ISO 2768 - mK	HMOTNOST	INDEX	PRŮMĚR
	1:20	TOLEROVÁNÍ ISO 8015	1712 kg		
 FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERSITY V PLZNI KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ		MATERIAL ROZMĚR - POLOTOVAR KRESLIL David Kovařík DATUM 18.04.23 ČÍSLO VÝKRESU SESTAVY VD-DP00001 TECH.REFERENT DATUM ČÍSLO SEZNAMU POLOZEK SCHVÁLIL DATUM NÁZEV NÁBOJ VĚNCE SPOJKY ISO 16016 TYP DOKUMENTU VD ČÍSLO VÝKRESU VD-DP00001-03 LISTŮLIST 1/1			



ŘEZ A-A
Zobrazeno s přídávky

$\sqrt{Ra 6.3}$ (✓)

PROMĚTÁNÍ 	MĚŘITKO 1:20	PŘESNOST ISO 2768 - mK TOLEROVÁNÍ ISO 8015	HMOTNOST 1285 kg	INDEX	ZMĚNA
 FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERSITY V PLZNI KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ		MATERIAL S355JR	ROZMĚR - POLOTOVAR VÝVALEK Ø1060-535, tl. 130		
		KRESLIL David Kovařík	DATUM 18.04.23	ČÍSLO VYKRESU SESTAVY VD-DP00001	
		TECH.REFERENT	DATUM	ČÍSLO SEZNAMU POLOŽEK	
		SCHVÁLIL	DATUM	TYP DOKUMENTU VD	
		NÁZEV NÁBOJ		ISO 16016	ČÍSLO VYKRESU VD-DP00001-01
			LISTŮ/LIST 1/1		



ZOBRAZENO V ŘEZU
Zobrazeno s přídávky

$\sqrt{Ra\ 6.3}$ (✓)

PROMÍTÁNÍ 	MÉRITKO 1:20	PŘESNOST ISO 2768 - mK TOLEROVÁNÍ ISO 8015	HMOTNOST 6023 kg	INDEX	ZMĚNA
 FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERSITY V PLZNI KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ	MATERIAL S355JR	ROZMĚR - POLOTOVAR ZKRUŽ. PLECH Ø3629-520, tl.150			
	KRESLIL David Kovařík	DATUM 18.04.23	ČÍSLO VYKRESU SESTAVY VD-DP00001		
	TECH.REFERENT	DATUM	ČÍSLO SEZNAMU POLOŽEK		
	SCHVÁLIL	DATUM			
	NÁZEV OZUBENÝ VĚNEC	ISO 16016	TYP DOKUMENTU VD	ČÍSLO VYKRESU VD-DP00001-02	
				LISTŮ/LIST 1/1	