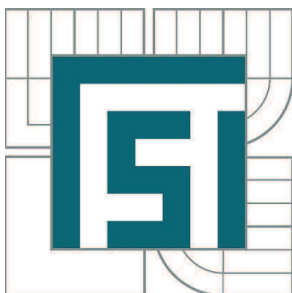


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

PEVNOSTNÍ VÝPOČET MLÝNU PRO DRCENÍ UHLÍ

MILL STRESS CALCULATION FOR COAL CRUSHING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. VLASTIMIL ŠEVČÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RICHARD NEKVASIL, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Vlastimil Ševčík

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Pevnostní výpočet mlýnu pro drcení uhlí

v anglickém jazyce:

Mill stress calculation for coal crushing

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o pevnostní výpočet skříně mlýna na drcení uhlí, které jsou běžně používány v elektrárnách. Jedná se o konstrukční vytvořenou svařením plechů různých tloušťek stěn.

Cíle diplomové práce:

1. Seznámení se s řešenou problematikou.
2. Vytvoření výpočtového modelu skříně mlýna včetně kola.
3. Provedení napěťové analýzy pomocí MKP.
4. Navržení úpravy konstrukce mlýna.

Seznam odborné literatury:

- [1] Kadrnožka J.: Tepelné elektrárny a teplárny, SNTL, Praha 1982.
- [2] ČSN EN 1993 – Navrhování ocelových konstrukcí.
- [3] Křupka, V.: Výpočet válcových tenkostěnných kovových nádob a potrubí, SNTL, Praha 1967.
- [4] Megson, T. H. G.: Structural and Stress Analysis, Butterworth-Heinemann, Oxford 2000.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Richard Nekvasil, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 22.11.2013

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem, provedením a vyhodnocením napěťové a deformační analýzy hlavních částí ventilátorového mlýna na drcení uhlí. Rešeršní část popisuje problematiku a rozdělení mlýnů na drcení uhlí. V konstrukční části je řešen návrh a provedení analýzy spirální skříně a mlecího kola ventilátorového mlýna.

KLÍČOVÁ SLOVA

Ventilátorový mlýn na drcení uhlí, spirální skříň, mlecí kolo, ANSYS Workbench.

ABSTRACT

This master's thesis deals with construction concept, execution and final evaluation of the stress-strain analysis of the main parts of the coal crushing fan mill. The main thesis part describes the general issue and different types of coal crushing fan mill. Construction part of the thesis is focused on optimal design evaluation and strength analysis of spiral body case as well as fan mill grinding wheel.

KEYWORDS

The fan mill for coal crushing, spiral body, beater wheel, ANSYS Workbench.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠEVČÍK, V. *Pevnostní výpočet mlýnu pro drcení uhlí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Richard Nekvasil, Ph.D.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně za pomoci vedoucího diplomové práce Ing. Richarda Nekvasila, PhD. A zároveň prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil autorská práva (ve smyslu zákona č.121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

V Brně, dne

.....
Vlastimil Ševčík



PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé práce panu Ing. Richardovi Nekvasilovi, PhD. za odborné vedení. A dále bych chtěl poděkovat svým blízkým za podporu při studiu.



OBSAH

OBSAH	11
1 ÚVOD	13
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1 PROCES VÝROBY ELEKTRICKÉ ENERGIE	14
2.2 ZAŘÍZENÍ PRO PŘÍPRAVU PALIVA KE SPÁLENÍ	15
2.2.1 Příprava uhelného prášku	15
2.2.2 Sušení uhlí	16
2.2.3 Mlecí okruhy mlýnice	16
2.2.4 Základní prvky mlecích okruhů	17
2.3 VENTILÁTOROVÝ MLÝN	20
2.3.1 Konstrukce ventilátorového mlýna	20
2.3.2 Sušení uhlí	22
2.3.3 Charakteristika ventilátorového mlýna	23
2.3.4 Pohon ventilátorového mlýna	26
3 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA	28
4 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE	29
5 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ	30
5.1 ANALÝZA PROBLÉMU	30
5.2 TVORBA 3D MODELU	30
5.3 DEFORMAČNÍ A NAPĚŤOVÁ ANALÝZA SPIRÁLNÍ SKŘÍNĚ A MLECÍHO KOLA VM	30
5.4 TVORBA VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE	30
6 STATICKÉ POSOUZENÍ SPIRÁLNÍ SKŘÍNĚ VENTILÁTOROVÉHO MLÝNA	31
6.1 VSTUPNÍ HODNOTY	31
6.2 ZÁTĚŽNÉ STAVY	31
6.3 GEOMETICKÝ MODEL SPIRÁLNÍ SKŘÍNĚ	32
6.4 VÝPOČTOVÝ MODEL SPIRÁLNÍ SKŘÍNĚ	33
6.5 POSTUP VÝPOČTU	34
6.6 ANALÝZA ZATĚŽNÉHO STAVU č. 1	34
6.6.1 Okrajové podmínky a uvažované zatížení	34
6.6.2 Deformace spirální skříně	35
6.6.3 Napjatost spirální skříně	38
6.6.4 Posouzení spirální skříně na prostou pevnost	39
6.7 ANALÝZA ZATĚŽNÉHO STAVU č. 2	42
6.7.1 Okrajové podmínky a uvažované zatížení	42
6.7.2 Deformace spirální skříně	42
6.7.3 Napjatost spirální skříně	44
6.7.4 Posouzení spirální skříně na prostou pevnost	46
6.8 TVORBA VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE SPIRÁLNÍ SKŘÍNĚ	46
7 ANALÝZA DYNAMICKY ZATÍŽENÉHO MLECÍHO KOLA	47
7.1 VSTUPNÍ HODNOTY	48
7.2 ZÁTĚŽNÉ STAVY	49
7.3 GEOMETRICKÝ MODEL MLECÍHO KOLA	49
7.4 VÝPOČTOVÝ MODEL MLECÍHO KOLA	50

7.5 POSTUP VÝPOČTU	51
7.6 MODÁLNÍ ANALÝZA	51
7.6.1 Okrajové podmínky a uvažované zatížení	52
7.6.2 Popis vlastních frekvencí	52
7.7 ANALÝZA PROVOZNIHO STAVU MLECÍHO KOLA	53
7.7.1 Okrajové podmínky a uvažované zatížení	53
7.7.2 Deformace mlecího kola při provozním zatížení	54
7.7.3 Napjatost mlecího kola	55
7.7.4 Posouzení mlecího kola na prostou pevnost	57
7.8 TVORBA VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE MLECÍHO KOLA	57
8 ZÁVĚR (KONSTRUKČNÍ, TECHNOLOGICKÝ A EKONOMICKÝ ROZBOR ŘEŠENÍ)	58
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	60
10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	62
11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	64
12 SEZNAM TABULEK	66
13 SEZNAM PŘÍLOH	67

1 ÚVOD

Cílem této diplomové práce je konstrukční návrh, provedení a vyhodnocení výsledků deformační a napěťové analýzy hlavních částí ventilátového mlýna (VM). Konstrukční návrh spirální skříně a mlecího kola bude proveden pro zadané parametry dle poskytnutého výkresu sestavení obdobného řešení VM. Analýza bude provedena pomocí metody konečných prvků s využitím výpočtového programu ANSYS Workbench. Výsledky analýzy budou hodnoceny dle normy ČSN EN 1993 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí [2].

teploty kolem 550 °C. Pod tlakem 18 MPa je vedena parovodem do vysokotlaké skříně turbíny, kde prochází v mezilopátkovém prostoru rotoru a jejich otáčením koná práci, která je pak převedena v alternátoru na střídavý elektrický proud. Na jedné společné hřídeli jsou zvlášť umístěny lopatky vysokotlaké části a nízkotlaké části. Do nízkotlaké části turbíny se pára dostane po opuštění vysokotlaké části a jejím mezipřehřátí. V nízkotlaké části pára předá zbytek své energie a na výstupu z turbíny se sráží v kondenzátoru. Po úpravě zkondenzované vody (odplynění) se vrací pod tlakem zpět do kotle. Zkondenzovaná voda se chladí rozstřikováním v chladicích věžích. Část vody se v tomto procesu odpaří, proto musí být neustále doplňována.

Spaliny z kotle projdou přes rotační ohřivač, který jim odebere zbylou část tepla. Poté jsou kouřové plyny odsávány přes filtry a vedeny přibližně při teplotě 150°C do komína.

2.2 ZAŘÍZENÍ PRO PŘÍPRAVU PALIVA KE SPÁLENÍ

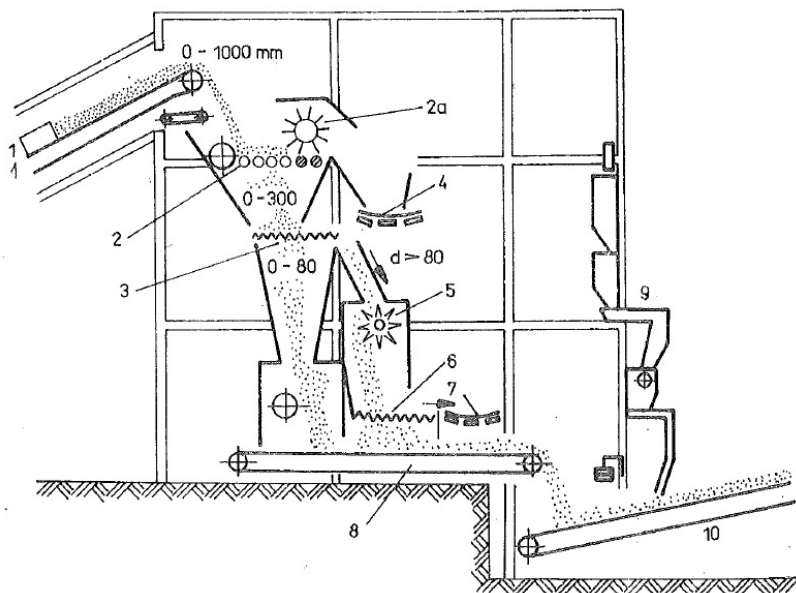
2.2

2.2.1 Příprava uhelného prášku

2.2.1

Uhelný prášek se vyrábí v technologickém zařízení, které se nazývá mlecí stanice (Obr. 2-2). Aby bylo mletí spolehlivé a bezpečné, musí být palivo při větší vlhkosti předsušeno. Základní děje při přípravě uhelného prášku, jsou tedy sušení a mletí.

Mlecí stanice se skládá z několika zařízení, která zajišťují dopravu surového uhlí, přívod sušicího média, mletí uhlí, zařízení pro třídění a odlučování prášku, zařízení která zabezpečují bezpečný provoz mlýnice atd. Jednotlivá zařízení jsou za sebou zapojena v určitém sledu a tvoří tak jednotkové operace.



Obr. 2-2 Schéma mlecí stanice [5]

kde:

1 – detektor kovových předmětů

2 – válcový drtič

6 – válcový rošt

7 – pásový dopravník

2a – odstraňovač dřeva
3 – válcový rošt
4 – pásový dopravník
5 – tlukadlový drtič

8 – sběrací pás
9 – zásobník drceného paliva
10 – dopravník

Vytěžené uhlí je pomocí dopravníku dopravováno do drtící stanice. Nejprve jsou magneticky vyloučeny kovové části (1), které by mohly poškodit drtiče nebo mlýn. V první části jsou též odstraněny kameny, dřeviny, které se do uhlí dostaly při těžbě (2a). V prvním stupni je palivo drceno na částice menší jak 300 mm (2). V druhé části jsou vytříděna zrna o velikosti 0-80 mm (3), větší částice jsou dále drceny (5). Předměty, které nelze rozdrtit, jsou vyloučeny (4, 7). Výsledný produkt je pomocí dopravníků (8, 10) dopravován buď do zásobníků drceného uhlí, nebo přímo do zásobníku mlýna. Na konci drtící stanice jsou umístěny zařízení pro vzorkování uhlí. Znalost výhřevnosti paliva dodaného do elektrárny je neméně důležitá jako znalost množství uhlí.

2.2.2 Sušení uhlí

2.2.2

Palivo se suší z následujících důvodů:

- zlepšení melitelnosti
- zajištění spolehlivosti a bezpečnosti dopravy uhelného prášku
- skladování prášku
- zlepšení stabilizace zapalování a hoření uhelného prášku

Sušení uhlí probíhá buď v mlýnu, nebo se při velké vlhkosti předsouší a v mlýnu se sušení dokončí. Suché uhlí s povrchovou vlhkostí do 8 % se suší během mletí v samotném mlýně horkým vzduchem nebo kouřovými plyny. Značně suché médium s povrchovou vlhkostí 15-20 % je třeba před vstupem do mlýna předsoušet. K předsoušení uhlí se používají sušící zařízení – sušičky, které mohou být pneumatické, vzestupné, sestupné nebo pádové.

Volba sušícího média má velmi podstatný vliv na podmínky bezpečnosti. Výbušnost uhelného prášku je podmíněna jeho rozvířením a koncentrací, obsahem kyslíku a tepelnou iniciací. Maximální hodnoty koncentrací kyslíku v nosném médiu jsou uvedeny v normě ČSN 07 4009 [7]. Pro snížení koncentrace kyslíku pod požadovanou mez se k sušícímu médiu přidává inertizující plyn.

2.2.3 Mlecí okruhy mlýnice

2.2.3

Mletí je operace, při které se působením vnějších sil zmenšuje velikost částice. Mlecí okruhy mlýnice lze rozdělit do dvou základních skupin.

- s přímým foukáním uhelného prášku do ohniště
- se zásobníkem prášku (uzavřené, otevřené)

Mlecí okruh s přímým foukáním uhelného prášku může být buď přetlakový, nebo podtlakový. U přetlakového způsobu je sušicím médiem vzduch, který zajišťuje dopravu prášku. Dopravu vzduchu zajišťuje ventilátor. Nevýhodou tohoto okruhu je unikání uhelného prášku do prostoru mlýnice. V podtlakovém mlecím okruhu obstarává dopravu sušícího média mlýnicový ventilátor. Jako sušící médium se využívají spaliny nebo vzduch. Výhodou je zamezení unikání prášku, nevýhodou je opotřebení mlýnicového ventilátoru uhelným práškem.

U mlecích okruhů se zásobníkem uhelného prášku je dopravováno surové uhlí přes sušičku do mlýna a z něho sušicím médiem přes třídiče do zásobníku uhelného prášku.

„Výhodou mlecích okruhů se zásobníkem prášku je, že kotel je možno provozovat určitou dobu i po odstavení mlýnice, kotel má lepší dynamické vlastnosti a měrná mlecí práce je menší.“ [5]

2.2.4 Základní prvky mlecích okruhů

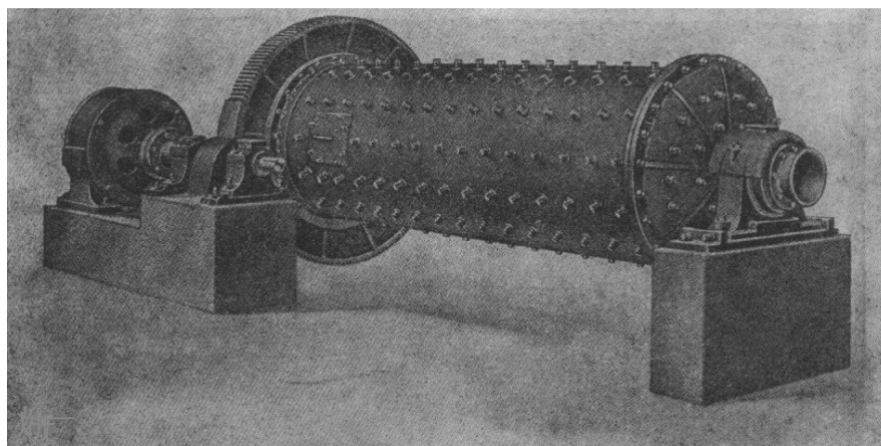
2.2.4

2.2.4.1 Mlýny

Typ mlýna se volí podle druhu uhlí a jeho vlastnostech jako je jeho vlhkost, popelnatost a obsah prchavých látek. Dále se při volbě mlýnu přihlíží ke koncepčním a investičním možnostem, k nákladům na údržbu a opotřebení jednotlivých částí mlýnu.

Trubnatý mlýn

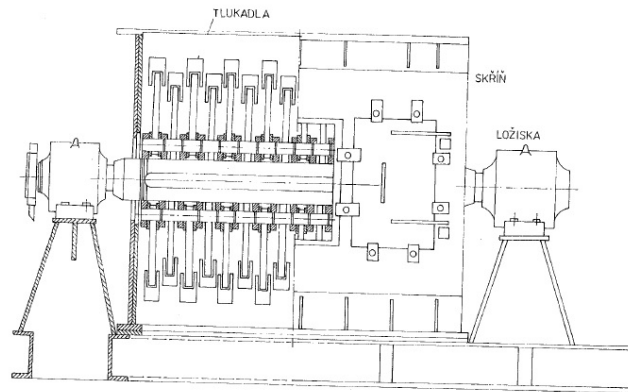
Trubnatý mlýn se používá především pro jeho dobré provozní vlastnosti, jako jsou velký mlecí výkon, spolehlivost a hospodárnost, nízké opotřebení mlecích částí. Před trubnatým mlýnem se většinou umísťuje pádová sušička. Nad mlýnem je uspořádán třídič. Jako sušícího média se používá horný vzduch nebo kouřové plyny z kotle. Trubnatý mlýn se používá i pro černé uhlí s velkou vlhkostí. Pro hnědé uhlí se trubnatý mlýn nepoužívá z bezpečnostních důvodů.



Obr. 2-3 Trubnatý mlýn [18]

Tlukadlový mlýn

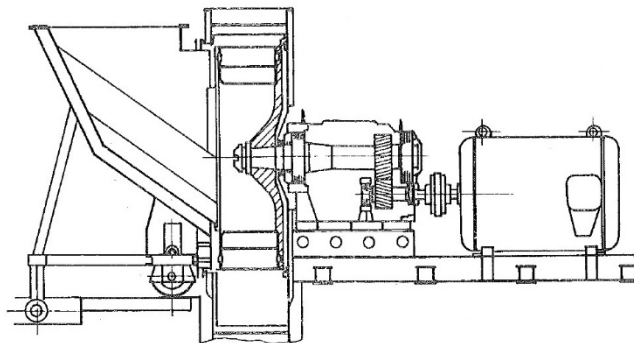
Tlukadlový mlýn mele jednak úderem tlukadel, jednak odrazem od pancéřování skříně mlýnu. Tento typ mlýnu lze použít pro všechny druhy uhlí. Pro hnědé uhlí se používá až do vlhkosti 35 % a popelnatosti až 30 %.



Obr. 2-4 Tlukadlový mlýn [5]

Ventilátorový mlýn

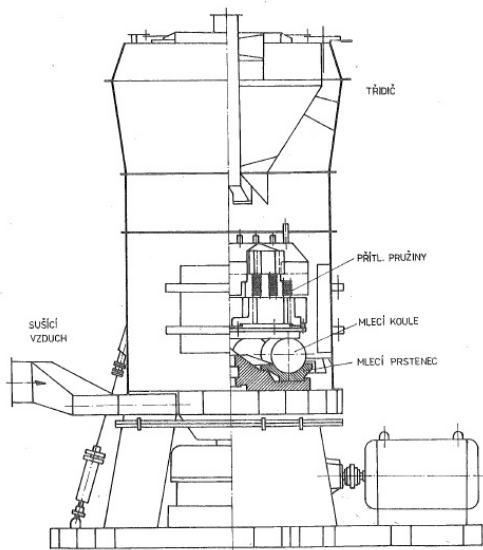
Ventilátorový mlýn se používá jako samonasávací pro přímé foukání, pro mletí vlhkého uhlí s obsahem vody nad 40 % a dobrou melitelností. Nehodí se k mletí černého uhlí z důvodu abrazy mlecích částí. Výhodou ventilátorového mlýna je jednoduchost a nenáročná obsluha.



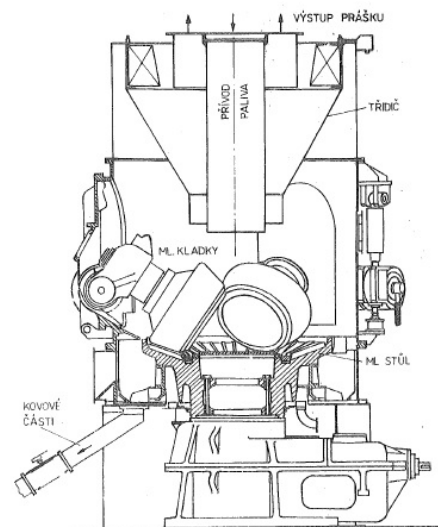
Obr. 2-5 Ventilátorový mlýn [5]

Kroužkový a kladkový mlýn

Kroužkový nebo kladkový mlýn je vhodný pro mletí paliv s malým obsahem vody, protože u nich nelze významněji palivo sušit. U kroužkového mlýna jsou mlecím elementem ocelové koule, valčí se v drážce mezi prstenci. U kladkového mlýna jsou mlecím elementem kladky odvalující se po otáčejícím se talíři. Palivo se mele tlakem vyvolaným tíhou koulí. Výhodou je nízká měrná mlecí práce a malý obestavěný prostor.



Obr. 2-6 Kroužkový mlýn [5]



Obr. 2-7 Kladkový mlýn [5]

2.2.4.2 Zásobníky surového uhlí

Zásobníky surového uhlí mají zajistit dodávku paliva do kotle například i při krátkodobé poruše zauhlovacího zařízení. Eventuálně vytvořit rezervu paliva, aby se nemuselo zauhlovat při nočním provozu.

Zásobníky jsou v provedení ocelové nebo železobetonové. Pro správnou funkci zásobníku je důležitý jejich tvar.

2.2.4.3 Zásobníky uhelného prášku

Zásobníky uhelného prášku se v mlýnicích umísťují mezi zásobníky surového uhlí. Jejich obsah bývá dimenzován na 2 až 3 provozu při jmenovitém výkonu kotlů. Zásobník musí být navržen tak, aby prášek plynule odcházel díky vlastní tíze prášku. Vnitřní stěny musí být proto hladké. U železobetonového provedení zásobníku jsou proto vyloženy plechem.

Z bezpečnostního důvodu musí být práškové zásobníky opatřeny pojistnými ventily. Mezi další příslušenství zásobníků patří zařízení pro měření a kontrolu teploty prášku a hasicím zařízením.

2.2.4.4 Podavače surového uhlí

Podavače souží k podávání surového uhlí ze zásobníku do mlýna v potřebném množství. Používají se tyto podavače:

- talířové podavače
- pásové podavače
- řetězové podavače
- deskové podavače
- bubnové podavače

Nejpoužívanější jsou řetězové podavače tzv. redlery. Pro lepidlo se používají pryžové pásové podavače. Podavače surového uhlí se dimenzují s 20 % rezervou na jmenovitý výkon mlýnice.

2.2.4.5 Podavače uhelného prášku

Pro podávání uhelného prášku se používají komůrkové a šroubové podavače. Podavače uhelného prášku se dimenzují s 50 % rezervou na jmenovitý výkon mlýnice.

2.2.4.6 Práškové potrubí

Práškovým potrubím se dopravuje uhelný prášek k hořákům. Je požadováno, aby byl uhelný prášek rovnoměrně rozptýlen po celém průřezu hořáku. Nežádoucí jevy jsou špatné promísení prášku s nosným médiem, odstředování prášku v ohybech, usazování v potrubí následkem malé rychlosti. Při teplotě nosného média do 120 °C má být rychlost v potrubí 25-28 m·s⁻¹. Pouze u mlýnic s přímým foukáním se při nižším výkonu přípouští snížení rychlosti až na 18 m·s⁻¹.

Práškové potrubí má být co nejkratší a nesmí mít vodorovné úseky. Práškovody se konstruují ze zesílených ocelových trubek a jsou většinou svařované. Jednotlivé části práškovodu, které se často vyměňují (z důvodu abraze) jsou připojeny přírubami.

2.3 VENTILÁTOROVÝ MLÝN

2.3

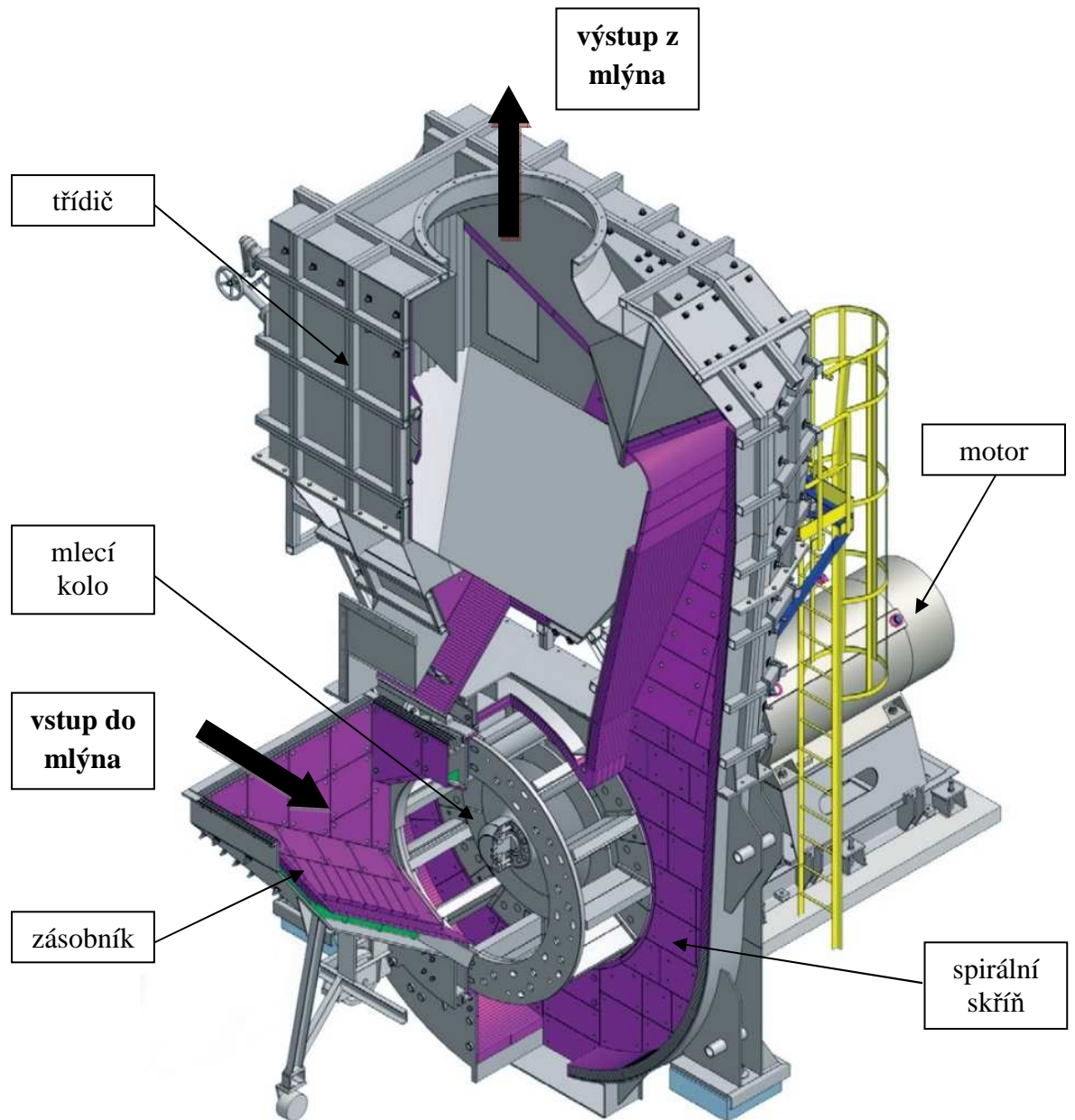
Ventilátorový mlýn je jedním ze zařízení pro mletí paliva. Ventilátorový mlýn musí pomlít palivo na požadovanou jemnost a odpařit přebytečnou vlhkost z paliva. Užívá se jako samonasávací mlýn pro přímé foukání do hořáků a plní současně dvě funkce: mlecí a ventilační.

Mletím uhlí ve ventilátorovém mlýnu se snažíme dosáhnout doporučené velikosti částic, z důvodu vytvoření co největšího povrchu pro styk s kyslíkem při hoření. Je však nutné zajistit, aby částice netvořily agregáty a kyslík měl možnost se dostat k celkovému povrchu částic. Dostatečné množství vzduchu pak vytvoří fluidní vrstvu, kdy se již částice nedotýkají a tím se dosáhne optimálního spalování.

2.3.1 Konstrukce ventilátorového mlýna

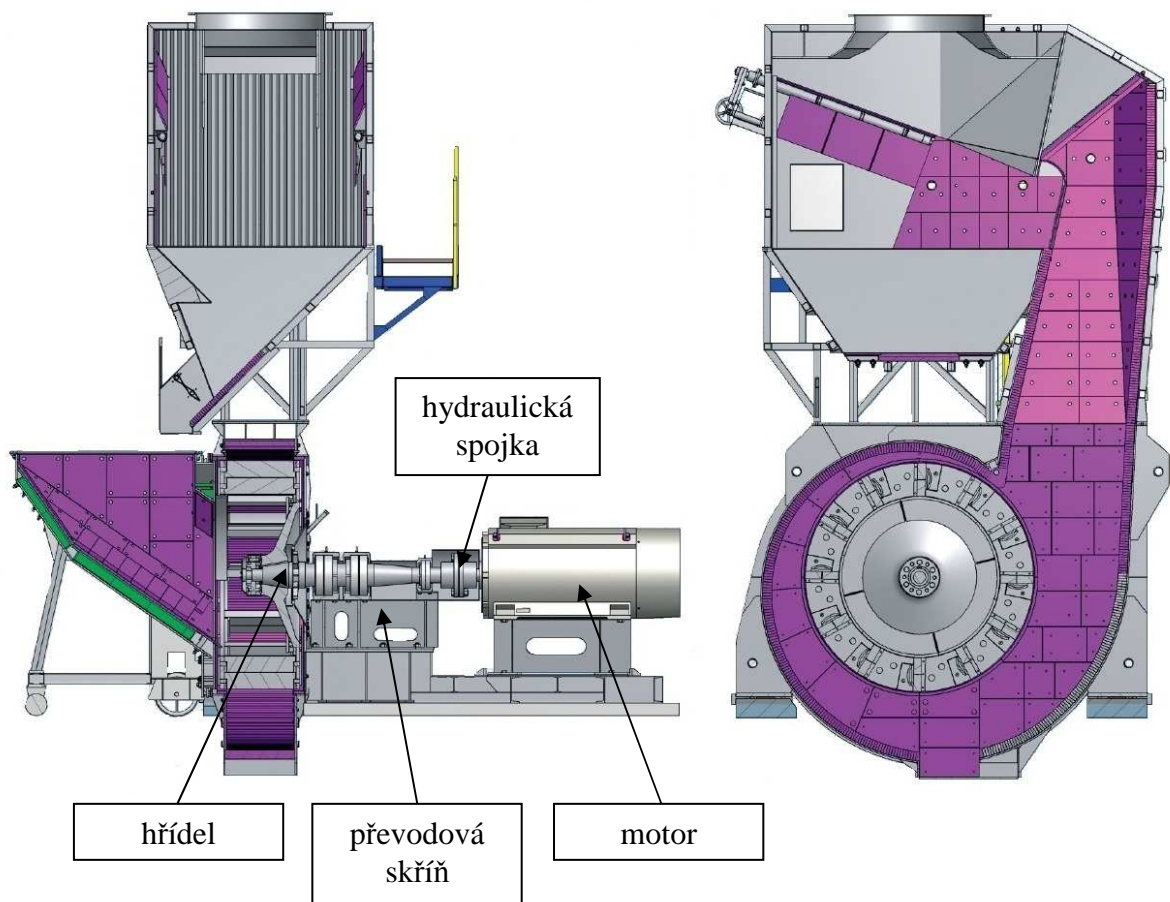
2.3.1

Z důvodu vysoké teploty sušících spalin (900 – 1000 °C) musí být šachta odběru spalin izolována. Izolace se provádí pomocí šamotových cihel. Ve spodní části šachty, kde je přivedeno palivo se šachta vykládá tvrdým, otěruvzdorným materiálem. Při konstrukci šachty je nutné dbát na celkovou hmotnost šachty (řádově 100 tun) a na teplotní dilatace. Připojení šachty na mlýn musí být tedy řešeno pomocí kompenzátoru délkové roztažnosti.



Obr. 2-8 3D model ventilátorového mlýna [19]

Palivo vstupuje do mlecího kola axiálně. Vlivem setrvačných sil dojde k vystředění zrn a nárazu zrn na mlecí desku mlecího kola. K mletí dochází jednak při srážce zrn s mlecími deskami jednak při nárazu na opancěrování spirální skříň. Intenzita mletí tedy závisí na síle nárazu a na četnosti srážek.



Obr. 2-9 Řez ventilátorovým mlýnem [19]

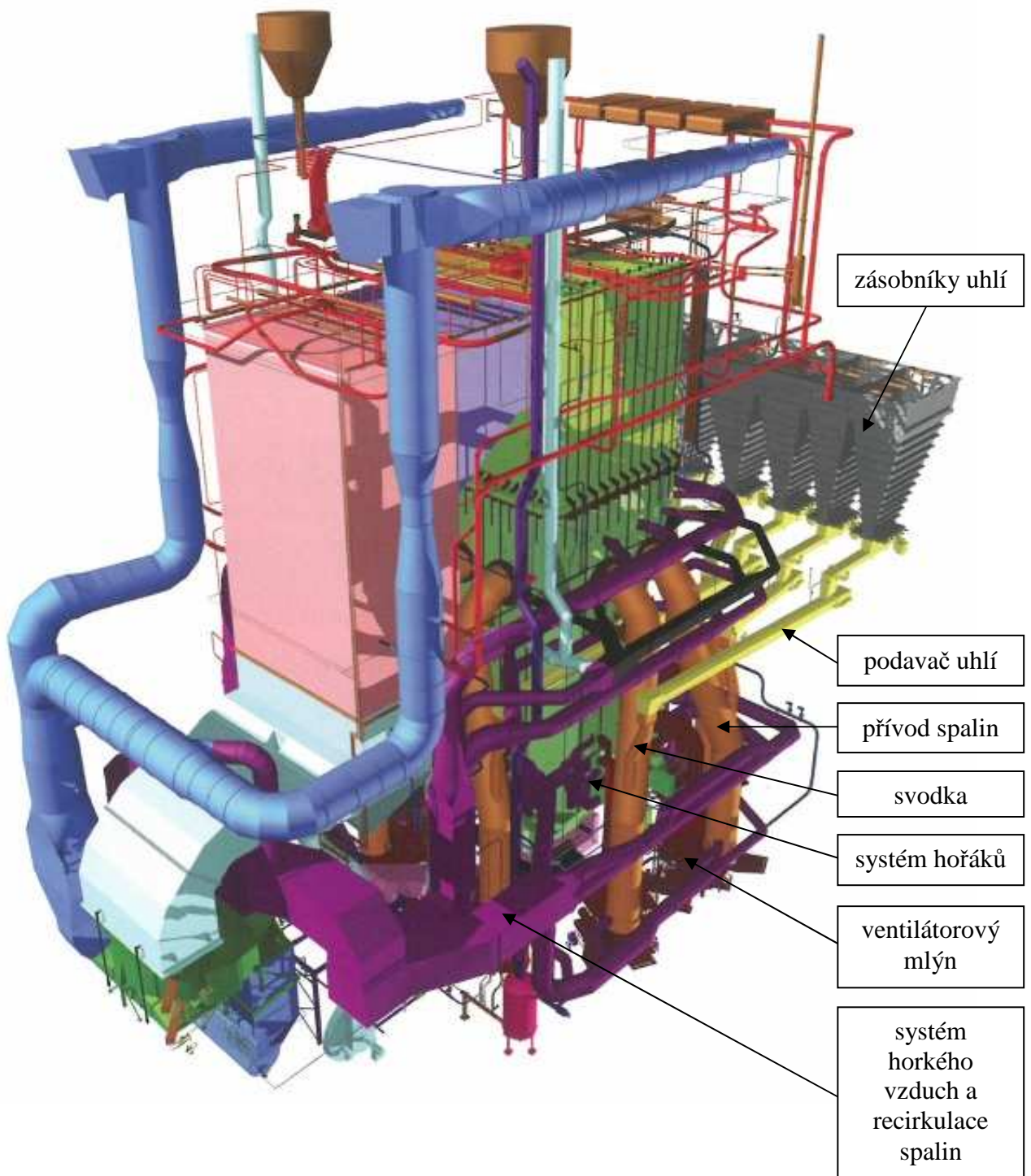
Výkonnost ventilátorového mlýna vztažená na plochu průměru mlecího kola roste s obvodovou rychlostí. S rostoucí měrou mlecí prací zároveň roste opotřebení mlecích desek a zkracuje se tak životnost mlecího kola. Proto se z hlediska životnosti uvažuje obvodová rychlost v rozsahu $80 - 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Opotřebení a životnost mlecích desek přímo závisí na mletém uhlí.

2.3.2 Sušení uhlí

2.3.2

Ventilátorové mlýny se umísťují do čela nebo rohů spalovací komory. Rozhodující pro umístění je odběrová šachta pro horké spaliny. Z pravidla se spaliny odebírají u konce ohniště, kde teplota spalin dosahuje $900 - 1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota spalin by měla být minimálně o $50 \text{ }^\circ\text{C}$ nižší než teplota měknutí popele. Do místa odběru spalin se přivádí i horký primární vzduch, který ovlivňuje koncentraci sušících spalin.

Rychlost proudění spalin v šachtě se volí kolem $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Vzhledem k otěru materiálu by rychlost neměla překročit hodnotu $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Vysušený uhelný prášek je následně vhnán práškovými hořáky do kotle.



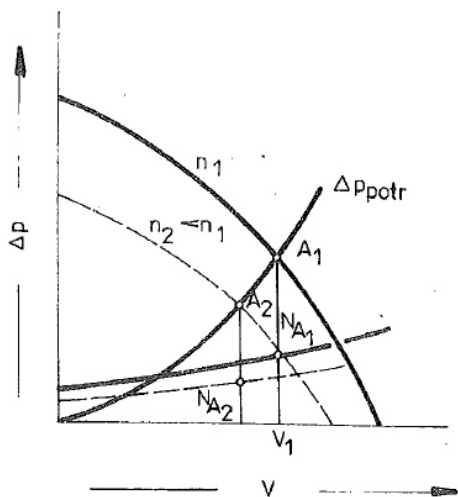
Obr. 2-10 Pohled na 3D vizualizaci kotle [11]

2.3.3 Charakteristika ventilátorového mlýna

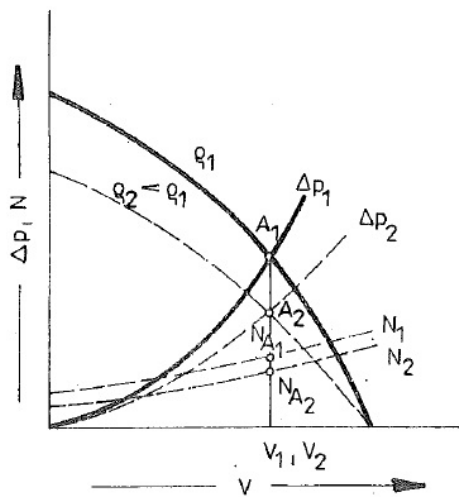
2.3.3

Ventilátorové kolo dává nízký tlak přibližně 1000 – 1500 Pa. Tento tlak však stačí pro vyvození dostatečného podtlaku pro odsání dostatečného množství spalin

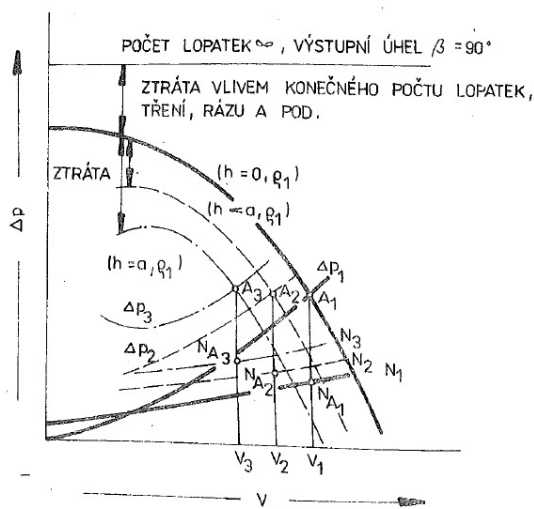
z ohniště. Charakteristiky ventilátorového mlýnu při změně otáček, změně měrné hmotnosti spalin a změně koncentrace prášku budou následující.



Obr. 2-11 Charakteristika mlýnu při změně otáček [5]



Obr. 2-12 Charakteristika mlýnu při změně měrné hmotnosti spalin [5]



Obr. 2-13 Charakteristika mlýnu při změně koncentrace prášku [5]

kde:

V	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	- objemový výkon
Δp	[Pa]	- tlaková diference, ztráta
N	[kW]	- výkon elektromotoru mlýna
n	$[ot \cdot min^{-1}]$	- provozní otáčky mlecího kola
h	$[kg \cdot kg^{-1} \cdot vz]$	- koncentrace prášku
A	[-]	- pracovní bod
ρ_p	$[kg \cdot m^{-3}]$	- měrná hmotnost plynného prostředí

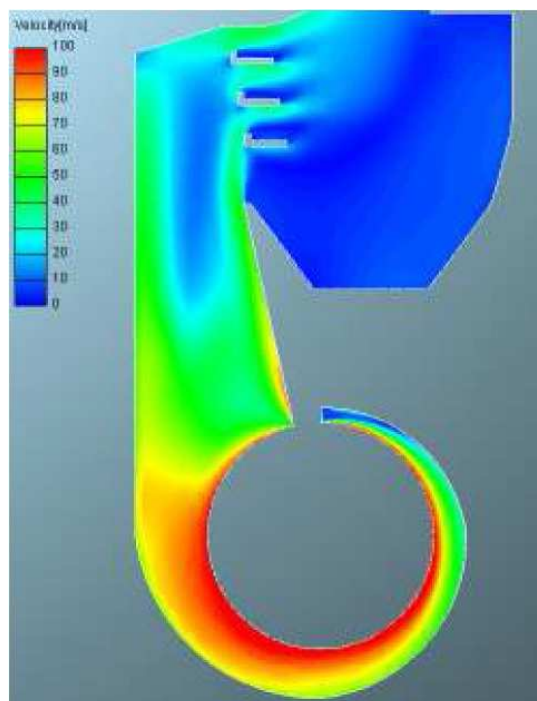
Při konstantních otáčkách je vazba mezi mlecím výkonem a objemovým výkonem jednoznačná, při snižování výkonu dochází k nárůstu ventilačního výkonu. Toto zvýšení výkonu má za následek přesoušení paliva, nárůst teploty za třídičem a vytváření agregátů. Současně klesá tlaková ztráta ventilátorového mlýna a vzrůstají rychlosti v práškovodech i hořácích. To má negativní důsledky na provoz. Je tedy nutné hledat opatření, aby se udržely vlastnosti prášku a teplota za třídičem zůstala na stálé úrovni.

Možnosti jak měnit u ventilátorového mlýna při dané výkonnosti objemový výkon, jsou dvě:

- změna odporové charakteristiky
- změna ventilační charakteristiky

Změna odporové charakteristiky má jen omezené možnosti. Plynulé škrcení v sání nebo výtlačku není prakticky realizovatelná. K zabudování regulačního orgánu v sání zabraňují vysoké teploty spalin a možnost nánosů, ve výtlačku uhelný prášek, který by škrtící orgán erodoval. Ve výtlačku je možné změnit Δp úpravou ústí hořáků nebo změnou délky a průřezu práškovodů, což jako regulační zásah není realizovatelné. Přestavení klapky třídiče má jen omezené možnosti vzhledem k nízkým rychlostem v třídiči. Jak je možné vidět na obrázku (Obr. 2-14).

Změna ventilační charakteristiky se realizuje jen u velkých jednotek $M_{ml} > 40 \text{ t.h}^{-1}$ změnou otáček.



Obr. 2-14 Rychlostní profil střední rovinou mlýna [15]

2.3.4 Pohon ventilátorového mlýna

Ventilátorový mlýn je zařízení s velkým momentem setrvačnosti, kdy rotuje velká hmotnost (rotující části až 9 000 kg) otáčkami přibližně $600 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Z těchto údajů je patrné, že jsou na pohon kladeny značné nároky jak po stránce mechanické tak je kladen důraz na spolehlivost.

Bez regulace otáček

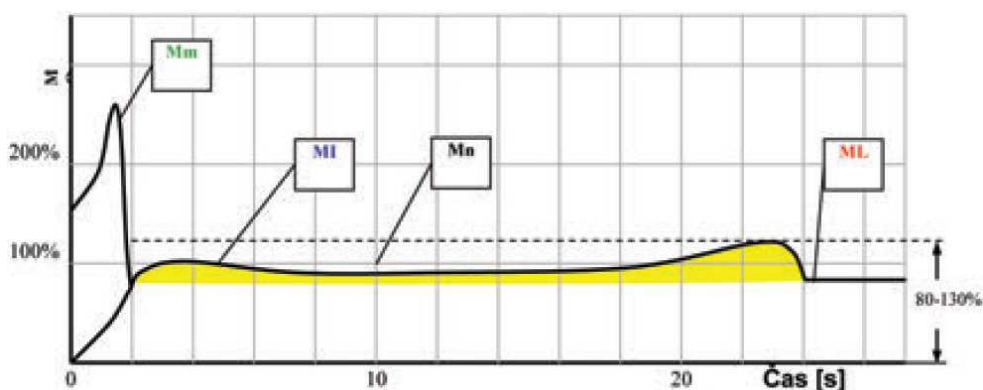
Pokud nejsou z pohledu uživatele kladeny požadavky na regulaci otáček, je složení pohonu následující:

- čelní převodovka s převodem asi 1,6, speciální výstupní hřídel v kónusovém tvaru, uložení dimenzováno na značné radiální zatížení
- elektromotor, výkon 700-800 kW, patkové provedení
- pružná spojka pro spojení elektromotoru s převodovkou

Nejčastěji se pohon ventilátorového mlýna bez potřeby regulace otáček provádí v uvedeném složení. Toto provedení je nejjednodušší a také nejlevnější. Při rozběhu takto velké setrvačné hmoty zde dochází k mechanickým problémům. Není zde řešen problém pozvolného najíždění mlýna na jmenovité otáčky.

Tento problém je z části vyřešením instalováním rozběhové hydraulické spojky, která se instaluje mezi elektromotor a převodovku. Tato hydrospojka zajistí to, že se elektromotor rozbíhá vždy bez zátěže. Až dosáhne svých jmenovitých otáček a momentových parametrů, začne se pozvolna otáček hydrospojka, která uvede po pohybu mechaniku ventilátorového mlýna. Vhodným návrhem spojky lze dosáhnout pozvolného rozběhu bez mechanických rázů.

Další potřebnou funkcí, kterou hydrospojka disponuje, je kvalitní momentová ochrana. Pokud by se některé nechtěné části (klády, kovové části) dostali do mlýna (2.2.1 Příprava uhlénoho prášku), mohlo by dojít k jeho zaseknutí (zamletí) při plných otáčkách. Rozběhová spojka zajistí to, že při zaseknutí oběžného kola mlýna se olejová vrstva utrhne a hydrospojka přestane přenášet krouticí moment ze strany elektromotoru. Zabrání tak destrukci mechanických částí elektromotoru. Jakou charakteristiku má hydraulická rozběhová spojka při rozběhu je možné vidět na Obr. 2-15.



Obr. 2-15 Rozběh a momentová charakteristika rozběhové hydraulické spojky [10]

kde:

M_I	[N·m]	- moment přenášený hydrospojku
M_L	[N·m]	- absorbovaný moment zařízením
M_m	[N·m]	- záběrový moment elektromotoru (jmenovitý moment při plné zátěži)

S regulací otáček

Pokud jsou z pohledu uživatele kladeny požadavky na regulaci otáček, je možné použít dva způsoby regulace otáček:

- regulovat otáčky elektromotoru prostřednictvím měniče frekvence
- regulovat otáčky ventilátorového mlýna prostřednictvím regulační hydraulické spojky

Při použití elektromotoru s frekvenčním měničem získáváme několik výhod. Je to především možnost regulace rychlosti a tedy výkonu ventilátorového mlýna. Regulace otáček pomocí elektromotoru s frekvenčním měničem je velice přesná. Další výhodou je plynulý rozběh motoru, kdy nedochází k mechanickým rázům, které by snižovali životnost celého zařízení.

„Dále je možné i na malé otáčky zajistit plný kroutící moment motoru, což umožňuje rychlejší rozběh v případě kritických stavů, kdy se do mlýna dostane příliš mnoho materiálu nebo dojde z nějakého důvodu k jeho zablokování a zavalení.“ [12]

Další výhodou je možnost snadné změny směru otáčení. Tato možnost se využije především při servisních a revizních pracích.



Obr. 2-16 Mlýn s asynchronním motorem řady SIMOTICS 1LA4 [12]



Obr. 2-17 Skříňový frekvenční měnič řady SINAMICS G150 [12]

3 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA

Tato diplomová práce řeší konstrukční návrh a deformační a napětíovou analýzu hlavních částí ventilátorového mlýna. Na základě vyhodnocení výsledků analýzy, budou doporučeny případné konstrukční úpravy. Pro řešení úkolu musí být zadány následující základní údaje a parametry:

Průměr mlecího kola	$D = 1\,000\text{ mm}$
Počet lopatek mlecího kola	$L = 12$
Provozní otáčky mlecího kola	$n = 503\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$
Provozní teplota	$T = 250\text{ °C}$
Provozní podtlak	$p_p = 0,001\text{ MPa}$
Abnormální přetlak	$p_e = 0,04\text{ MPa}$
Hmotnost třídiče	$m_t = 14\text{ tun}$

Na základě daných kritérií a parametrů bude provedena analýza a konstrukční návrh jednotlivých částí.

Při návrhu je nutné respektovat následující základní požadavky:

- splnění požadovaných parametrů
- technická proveditelnost
- bezpečná konstrukce z hlediska konstrukce, provozu i z hlediska údržby

4 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Hlavním cílem této diplomové práce je konstrukční návrh hlavních částí ventilátorového mlýna a následné provedení a vyhodnocení deformační a napěťové analýzy. Konkrétně spirální skříně a mlecího kola ventilátorového mlýna.

Pro možnost posouzení a vyhodnocení splnění cílů této práce jsou stanoveny tyto požadavky:

- dle předložené výkresové dokumentace vytvořit 3D návrh jednotlivých částí VM na požadované parametry
- vypracovat napěťovou a deformační analýzu pro skříně ventilátorového mlýna
- vypracovat napěťovou a deformační analýzu pro mlecí kolo ventilátorového mlýna
- provést případné návrhy na konstrukční úpravu daných částí
- vypracovat závěr s analýzou splnění cílů zadání
- vytvořit výkresovou dokumentaci navržené spirální skříně a mlecího kola ventilátorového mlýna

5 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

5

Konstrukční návrh a pevnostní analýza bude zahrnovat následující dílčí etapy a jednotlivé úkoly, které bude nutné v průběhu řešení jednotlivě realizovat.

5.1 ANALÝZA PROBLÉMU

5.1

- vstupní hodnoty – upřesnění vstupních hodnot
- vytvoření zadání zátěžných stavů ventilátorového mlýna

5.2 TVORBA 3D MODELU

5.2

- vytvoření 3D návrhu spirální skříně a mlecího kola dle předložené dokumentace

5.3 DEFORMAČNÍ A NAPĚŤOVÁ ANALÝZA SPIRÁLNÍ SKŘÍNĚ A MLECÍHO KOLA VM

5.3

- preprocessing (úkoly před spuštěním analýzy)
 - nastavení typu analýzy
 - definování kontaktních spojení
 - vytvoření sítě konečných prvků v dostatečné kvalitě
 - zadání zatížení a okrajových podmínek
- solution (řešení analýzy)
- post-processing (zpracování výsledků analýzy)
 - vykreslení deformací a napětí na modelu
 - linearizace napětí po předem vytvořené konstrukční přímce
 - kategorizace napětí a vyhodnocení dle normy
- případná modifikace modelu a opětovné provedení analýzy

5.4 TVORBA VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE

5.4

- vytvoření výkresové dokumentace skříně a mlecího kola ventilátorového mlýna

6 STATICKÉ POSOUZENÍ SPIRÁLNÍ SKŘÍNĚ VENTILÁTOROVÉHO MLÝNA

6

6.1 VSTUPNÍ HODNOTY

6.1

Fyzikální a materiálové vlastnosti spirální skříně

Podstatná většina částí spirální skříně je vyrobena z uhlíkové oceli P235GH, proto byly pro výpočet použity vlastnosti tohoto materiálu. V Tab. 6-1 jsou uvedeny fyzikální vlastnosti tohoto materiálu v závislosti na teplotě.

Fyzikální vlastnosti materiálu P235GH dle ČSN EN 10 028-2						
T [°C]	R _e [MPa]	R _m [MPa]	Z [%]	E [MPa]	α [K ⁻¹]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
20	235	360	45	206 000	11,1·10 ⁻⁶	54,5
100	214	355	44	201 000	11,1·10 ⁻⁶	52,7
200	182	350	43	191 000	12,1·10 ⁻⁶	50,2
250	167	350	43	186 000	12,6·10 ⁻⁶	-
300	153	330	43	181 000	12,9·10 ⁻⁶	47,3
400	133	157	43	175 000	13,5·10 ⁻⁶	44,6

Tab. 6-1 Fyzikální vlastnosti materiálu spirální skříně [8]

Materiálové vlastnosti pro napěťovou analýzu byly definovány dle hodnot z Tab. 6-1. Další uvažované materiálové charakteristiky jsou uvedeny v Tab. 6-2.

Výpočty byly řešeny v lineárním oboru za předpokladu platnosti Hookova zákona v celém rozsahu zatěžování.

Materiálové charakteristiky		
Hustota materiálu	ρ [kg·m ⁻³]	7 850
Poissonovo číslo	ν [-]	0,3

Tab. 6-2 Materiálové charakteristiky použité při výpočtu spirální skříně

6.2 ZÁTĚŽNÉ STAVY

6.2

V napěťové analýze statický zatížená spirální skříně VM byly provedeny analýzy následujících dvou zátěžných stavů:

Zátěžný stav č. 1

Prvním zátěžným stavem je provozní stav ventilátorového mlýna. Spirální skříň je v provozním stavu zatížena podtlakem $p_p = 0,001$ MPa a teplotou působícím v pracovním prostoru skříně, hmotností třídiče $m_t = 14$ tun a zatížením od vrat skříně. Celkovou hmotnost vrat skříně nese vlastní konstrukce vrat (pojízdná konzole), proto

je ve výpočtu uvažovaná pouze síla na prstenec vstupního otvoru (působení podtlaku).

Zátěžný stav č. 2

Druhým zátěžným stavem je abnormální stav, který může nastat například při najíždění zařízení na provozní stav, vlivem navazujícího zařízení nebo při mírné explozi mlecího prášku. V tomto stavu je mlýn zatížen přetlakem $p_e = 0,04$ MPa a teplotou působícím v pracovním prostoru skříně, hmotností třídiče $m_t = 14$ tun a zatížením od vrat skříně. Toto zatížení působí na závěsná oka, která jsou umístěna po obvodu prstence vstupního otvoru do mlecí skříně (působení vnitřního přtlaku).

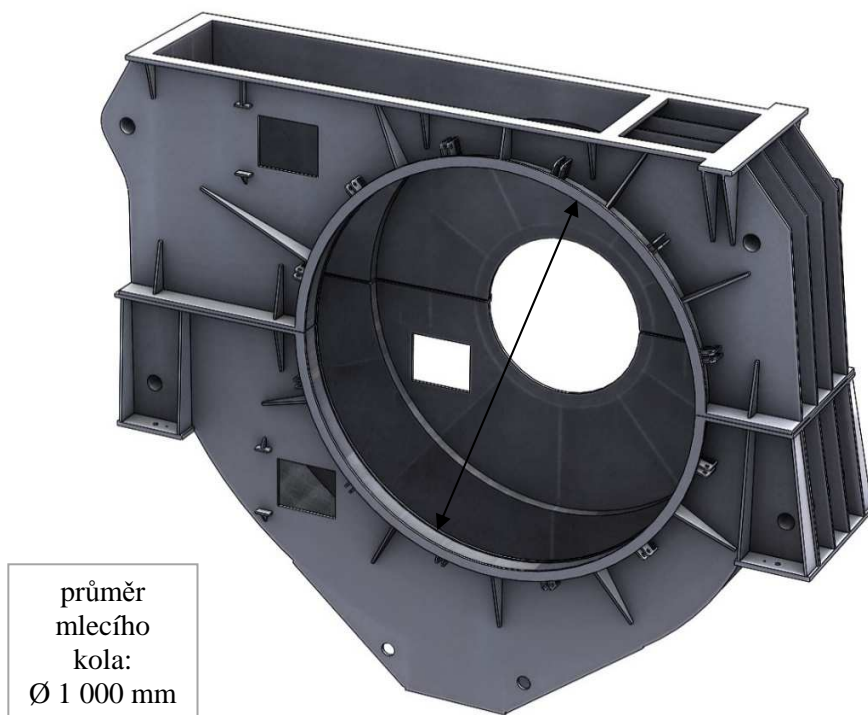
Výše uvedené zátěžné stavy budou hodnoceny zvlášť pro dvě možné situace:

- montáž zařízení, kdy je skříň VM zatížena teplotou 20 °C a následné najetí zařízení na provozní zatížení (dále uváděno jako montáž)
- provozní zatížení, kdy je skříň VM zatížena teplotou 250 °C (dále uváděno jako provoz)

6.3 GEOMETRICKÝ MODEL SPIRÁLNÍ SKŘÍŇE

6.3

Geometrie spirální skříně byla navržena na požadované parametry dle poskytnutého výkresu sestavení obdobného řešení VM. Model spirální skříně byl vytvořen v CAD programu SolidWorks 2013 SP3.0 (Obr. 6-1). Model byl po zjednodušení pro výpočet převeden do výpočtového programu ANSYS Workbench.



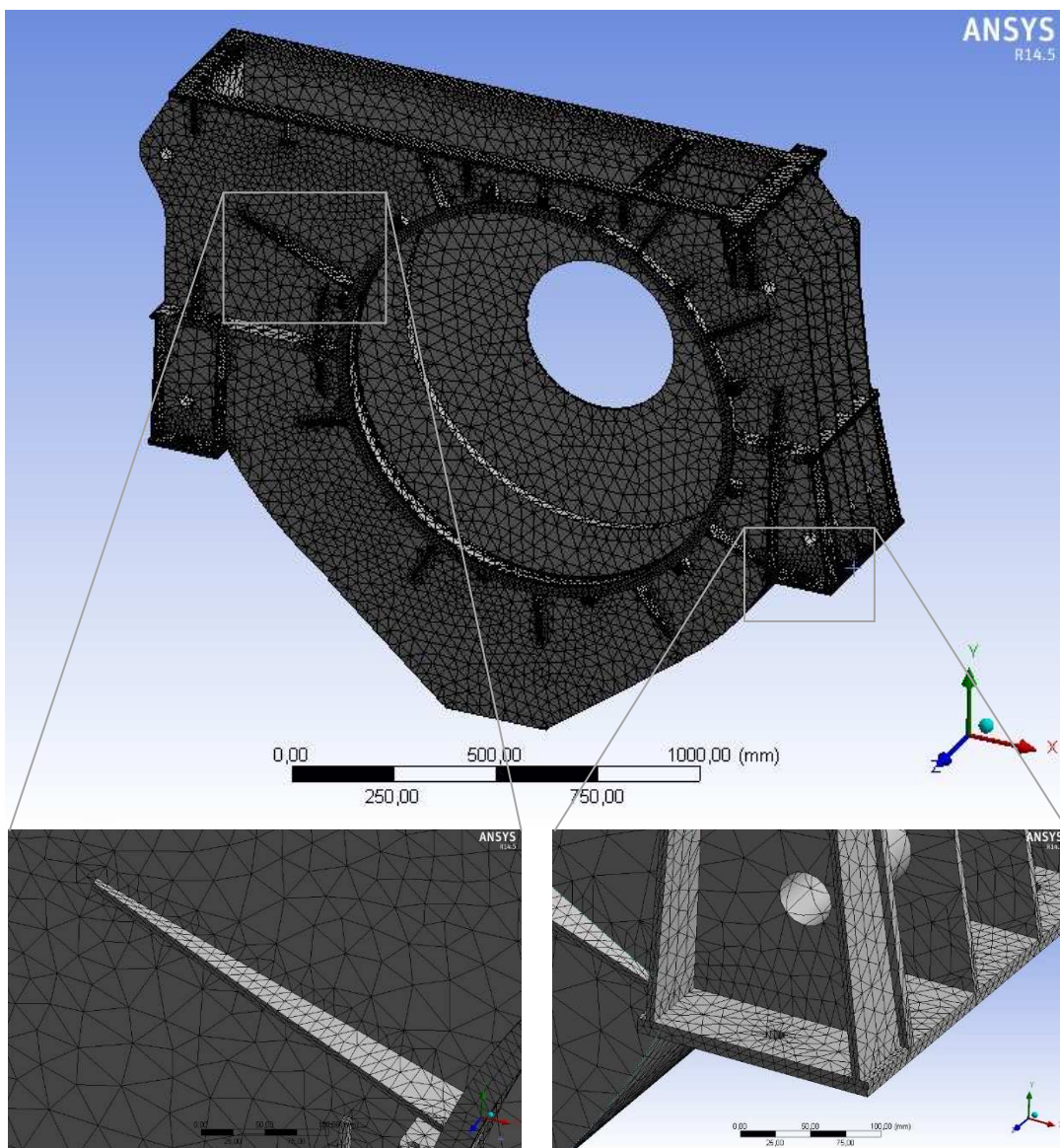
Obr. 6-1 Geometrický model spirální skříně

6.4 VÝPOČTOVÝ MODEL SPIRÁLNÍ SKŘÍNĚ

6.4

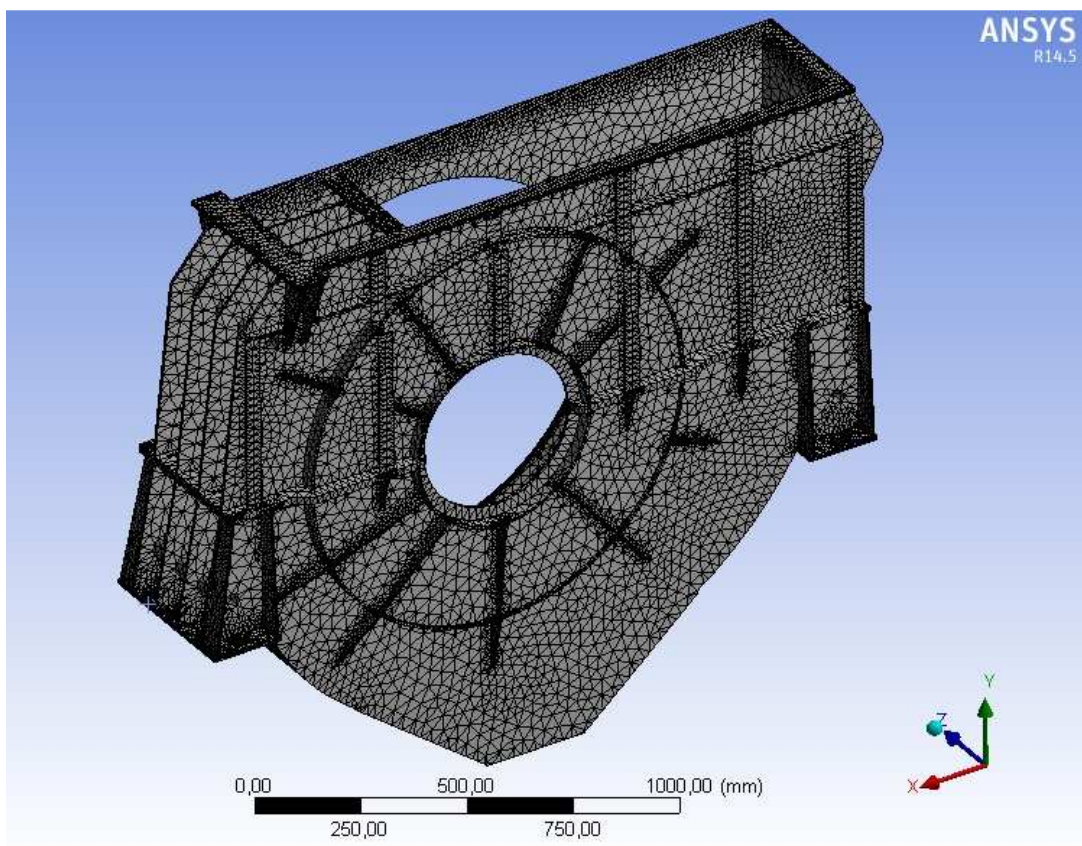
Geometrický model spirální skříně byl v programu ANSYS Workbench pokryt sítí konečných prvků. Pro pokrytí modelu byly použity desetiuzlové kvadratické elementy ve tvaru čtyřstěnu typu tetrahedrons [21]. V místech očekávaných gradientů napětí byla síť dostatečně zhuštěna.

Model spirální skříně se skládá ze 419 048 prvků a 235 984 uzlů. Pro kontrolu vytvořené sítě byly použity pokročilé metody sledující kvalitu sítě „Mesh Metrics“ a „Structural Error“. Výsledky obou metod jsou součástí přílohy č. 1. Tato síť je shodná pro oba zátěžné stavy uvedené v kapitole 6.2.



Obr. 6-2 Síť konečných prvků spirální skříně, zjemnění sítě – přední pohled

Geometrie spirální skříně mlýna je značně složitá a vzhledem k její asymetrii nelze výpočtový model dosti zjednodušit nebo při výpočtu použít symetrickou okrajovou podmínku.



Obr. 6-3 Síť konečných prvků spirální skříně – zadní pohled

6.5 POSTUP VÝPOČTU

6.5

V první fázi výpočtu bylo nutné provést teplotní analýzu modelu. V této samostatné analýze byl model skříně VM zatížen pouze pracovní teplotou 250 °C (ve výpočtu nastaven odpovídající modul pružnosti $E = 186\,000\text{ MPa}$). Výsledkem analýzy byl soubor, který byl načten jako okrajová podmínka při napěťových analýzách zatěžných stavů č. 1 a 2 – provozní zatížení. Ve výpočtech montážních stavů byl použit modul pružnosti pro teplotu 20 °C ($E = 206\,000\text{ MPa}$).

6.6 ANALÝZA ZATĚŽNÉHO STAVU Č. 1

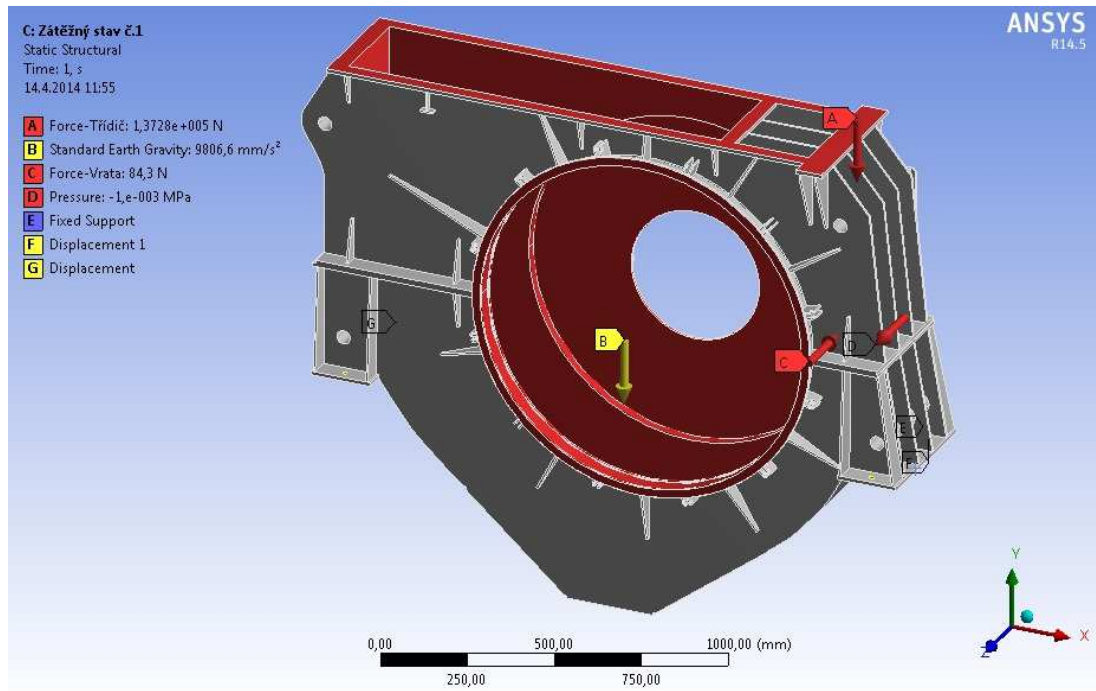
6.6

6.6.1 Okrajové podmínky a uvažované zatížení

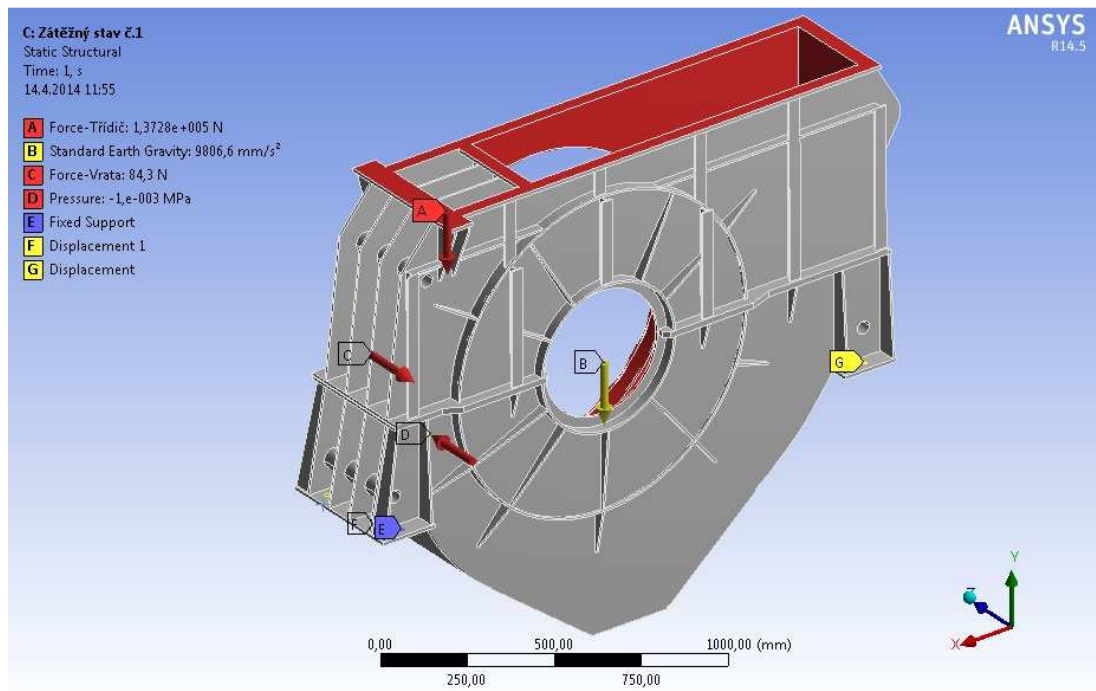
6.6.1

Pro analýzu napjatosti skříně VM byla uvažována zatížení vnitřním podtlakem, pracovní teplotou, působením gravitačního zrychlení, zatížením hmotností třídiče a vrat mlýna.

Za okrajové podmínky bylo zvoleno pevné uchycení pouze jedné patky skříně (levá patka z pohledu od převodovky) v místech díry pro šrouby, aby mohlo docházet k dilatacím způsobeným teplotním zatížením. Dále bylo zamezeno posuvu patek ve svislém směru.



Obr. 6-4 Okrajové podmínky, zátěžný stav č. 1 – přední pohled



Obr. 6-5 Okrajové podmínky, zátěžný stav č. 1 – zadní pohled

6.6.2 Deformace spirální skříně

6.6.2

V Tab. 6-3 jsou vypsány výsledná a jednotlivá přemístění (deformace) pro zátěžný stav č. 1.

Výsledné přemístění URES je dáno vztahem:

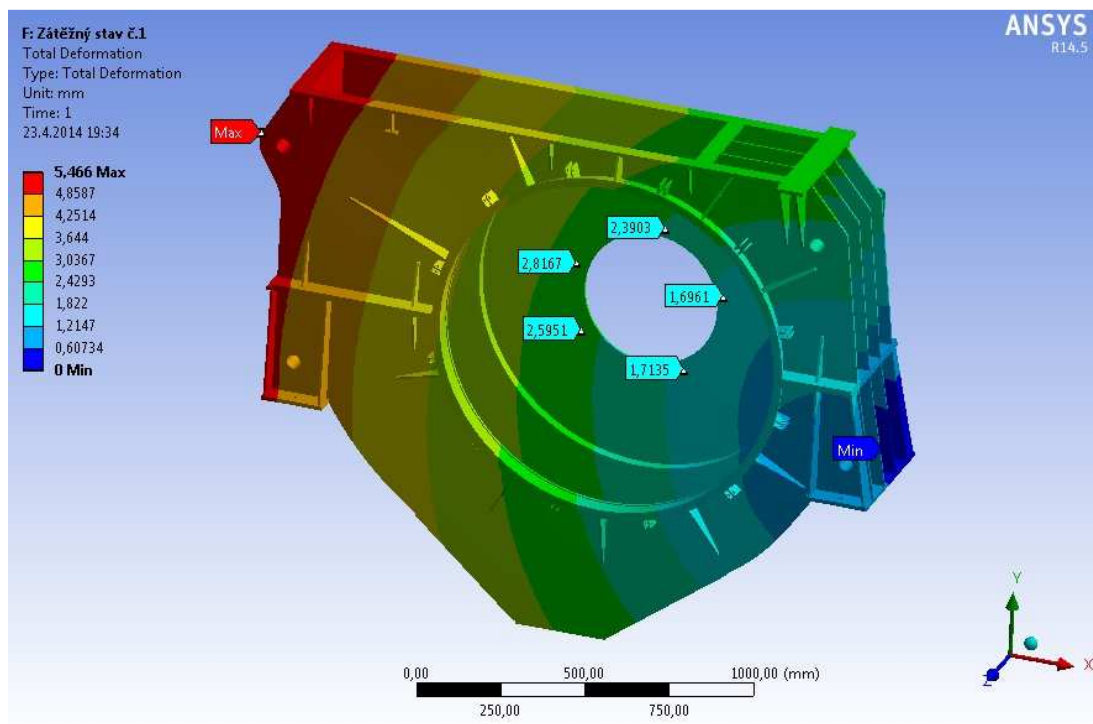
$$URES = \sqrt{UX^2 + UY^2 + UZ^2}, \quad (1)$$

kde UX , UY , UZ jsou složky přemístění do jednotlivých os souřadného systému. Tyto jednotlivá přemístění jsou vykresleny v příloze č. 1.

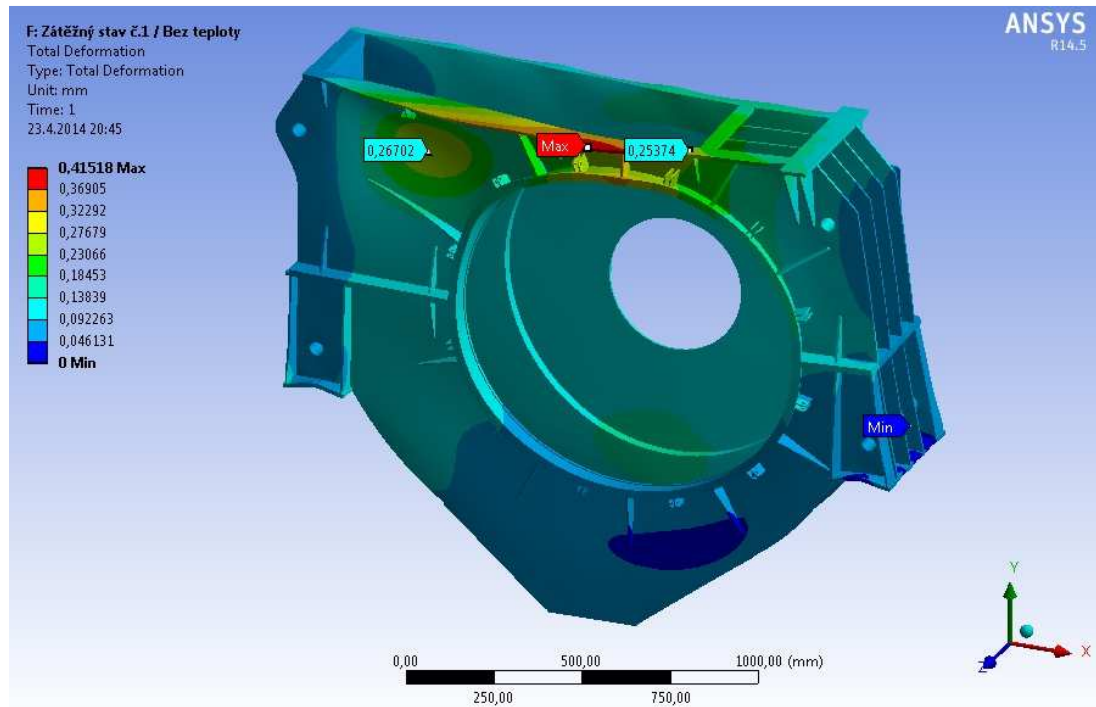
Zátěžný stav č. 1 - provoz			Zátěžný stav č. 1 - montáž		
Přemístění do jednotlivých os souř. systému			Přemístění do jednotlivých os souř. systému		
UX_{1-1}	[mm]	5,28	UX_{1-2}	[mm]	0,22
UY_{1-1}	[mm]	4,24	UY_{1-2}	[mm]	0,34
UZ_{1-1}	[mm]	1,45	UZ_{1-2}	[mm]	0,52
Max. přemístění v oblasti otvoru pro hřídel			Max. přemístění v oblasti otvoru pro hřídel		
$UMAX_{1-1}$	[mm]	2,82	$UMAX_{1-2}$	[mm]	0,12
Výsledné přemístění			Výsledné přemístění		
$URES_{1-1}$	[mm]	5,47	$URES_{1-2}$	[mm]	0,42

Tab. 6-3 Výsledná přemístění pro zátěžný stav č. 1

Na následujících obrázcích je vykresleno výsledné přemístění (deformace) spirální skříně při provozním stavu (Obr. 6-6) s maximální hodnotou přemístění $URES_{1-1} = 5,47$ mm a výsledné přemístění při montážním stavu (Obr. 6-7) s maximální hodnotou přemístění $URES_{1-2} = 0,42$ mm.



Obr. 6-6 Výsledné přemístění spirální skříně, zátěžný stav č. 1 – provoz



Obr. 6-7 Výsledné přemístění spirální skříně, zátěžný stav č. 1 – montáž

Z porovnání hodnoty $URES_{1-1}$ (přemístění při provozním zatížení) a hodnoty $URES_{1-2}$ (přemístění při montážním stavu) je patrné, že deformaci $URES_{1-1}$ primárně způsobuje teplotní zatížení 250 °C.

Při vyhodnocení výsledků přemístění (deformace) musí být splněna podmínka maximálního dovoleného přemístění v oblasti otvoru pro hřídel mlecího kola. Důvodem stanovení této podmínky je maximální vůle, kterou jsou schopny vykompenzovat těsnící členy umístěné na hřídeli.

$$[UMAX] \geq UMAX_{x-x} \quad (2)$$

kde:

[UMAX]	[mm]	- maximální dovolené přemístění, [UMAX] = 5 mm
$UMAX_{1-1}$	[mm]	- maximální přemístění spirální skříně v oblasti otvoru při provozním zatížení
$UMAX_{1-2}$	[mm]	- v maximální přemístění spirální skříně v oblasti otvoru při montážním stavu

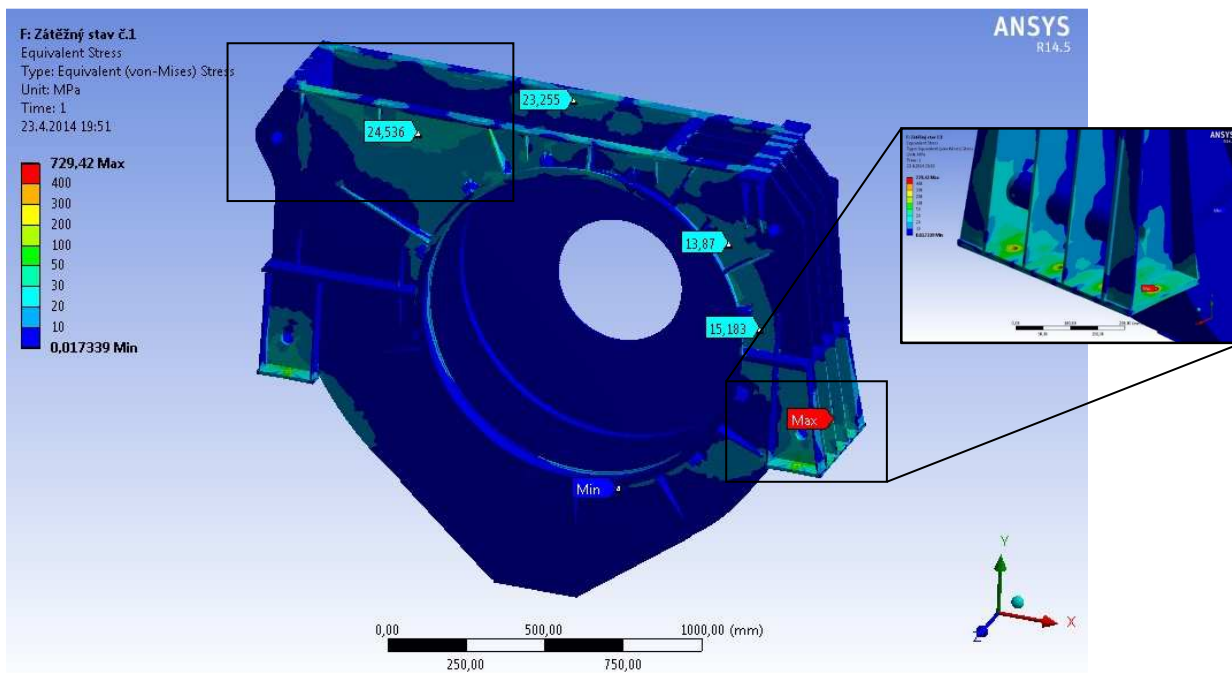
Z vykresleného celkového přemístění (Obr. 6-6 a Obr. 6-7) je patrné, že vzniklé deformace v oblasti otvoru pro hřídel jsou menší než 2,82 mm. Podmínka je tedy splněna.

6.6.3 Napjatost spirální skříně

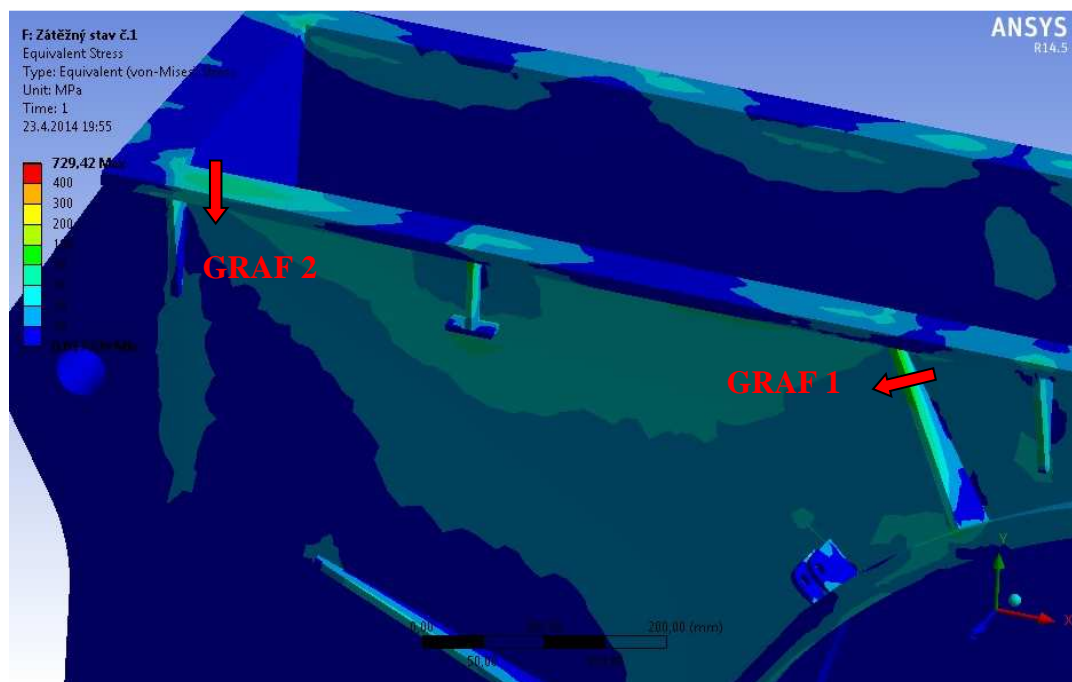
6.6.3

Rozložení napjatosti na spirální skříně při zátěžném stavu č. 1 je zobrazeno na Obr. 6-8 až Obr. 6-10.

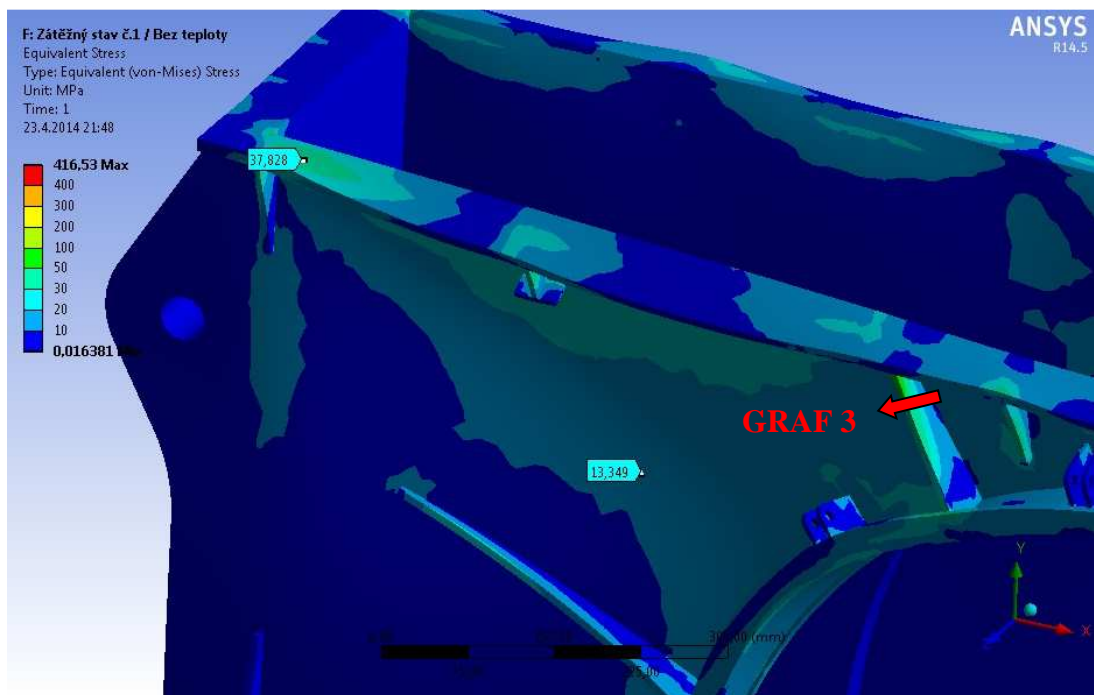
Dle normy ČSN EN 1993 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí [2] je napjatost na spirální skříně vykreslena pomocí energetické hypotézy pevnosti HMH (nazývané také hypotézou von Mises).



Obr. 6-8 Redukované napětí, zátěžný stav č. 1 – provoz



Obr. 6-9 Oblast pro linearizaci napětí, zátěžný stav č. 1 – provoz



Obr. 6-10 Oblast pro linearizaci napětí, zátěžný stav č. 1 – montáž

Jak je z obrázků patrné, nejvíce namáhaná místa jsou v oblasti otvorů pro kotevní šrouby (Obr. 6-8). Toto lokální špičkové napětí způsobuje zvolená zjednodušená okrajová podmínka uchycení VM. V reálném případě jsou patky skříně mlýna uchyceny s dostatečnou vůlí, která umožňuje radiální posuv, který je vyvolán v důsledku tepelných dilatací.

Pro posouzení na prostou pevnost byly vybrány dva nejvíce namáhané průřezy (Obr. 6-9) pro provozní zatížení a jeden namáhaný průřez (Obr. 6-10) pro montážní stav.

6.6.4 Posouzení spirální skříně na prostou pevnost

6.6.4

Posouzení spirální skříně na prostou pevnost, bylo provedeno dle normy Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí [2]. Pro posouzení dle kategorizace napětí je nutné uvažovat pro jednotlivé případy namáhání odlišné limitní hodnoty součinitele k .

Kontrola skříně na prostou pevnost byla provedena pro dvě možné situace:

- montáž zařízení, kdy je skříň VM zatížena teplotou 20°C a následně najetí zařízení na provozní stav
- provozní zatížení, kdy je skříň VM zatížena teplotou 250°C

Pro posouzení prosté pevnosti lze použít vztah:

$$\sigma_{red,max} \leq k [\sigma] \quad (3)$$

kde:

$\sigma_{red,max}$	[MPa]	- maximální redukované nominální napětí
k	[-]	- součinitel k = 1,0 pro membránové napětí k = 1,5 pro membránové + ohybové napětí
[σ]	[MPa]	- dovolené napětí

Pro výpočet dovoleného napětí lze použít vztah: [2]

$$[\sigma] = \frac{Re}{\gamma_M} \quad (4)$$

kde:

[σ]	[MPa]	- dovolené napětí
$R_{e/20}$	[MPa]	- mez kluzu materiálu při montážní teplotě, $R_{e/20} = 235$ MPa (viz. Tab. 6-1)
$R_{e/250}$	[MPa]	- mez kluzu materiálu při provozní teplotě, $R_{e/250} = 167$ MPa (viz. Tab. 6-1)
γ_{M0}	[-]	- součinitel bezpečnosti vůči mezi kluzu při montáži zařízení, $\gamma_{M0} = 1$ [2]
γ_{M1}	[-]	- součinitel bezpečnosti vůči mezi kluzu při provozním zatížení, $\gamma_{M1} = 1,1$ [2]

$R_{e/20}$	$R_{e/20}/\gamma_{M0}$	1,0 [σ]	1,5 [σ]
235	235	235	352,5

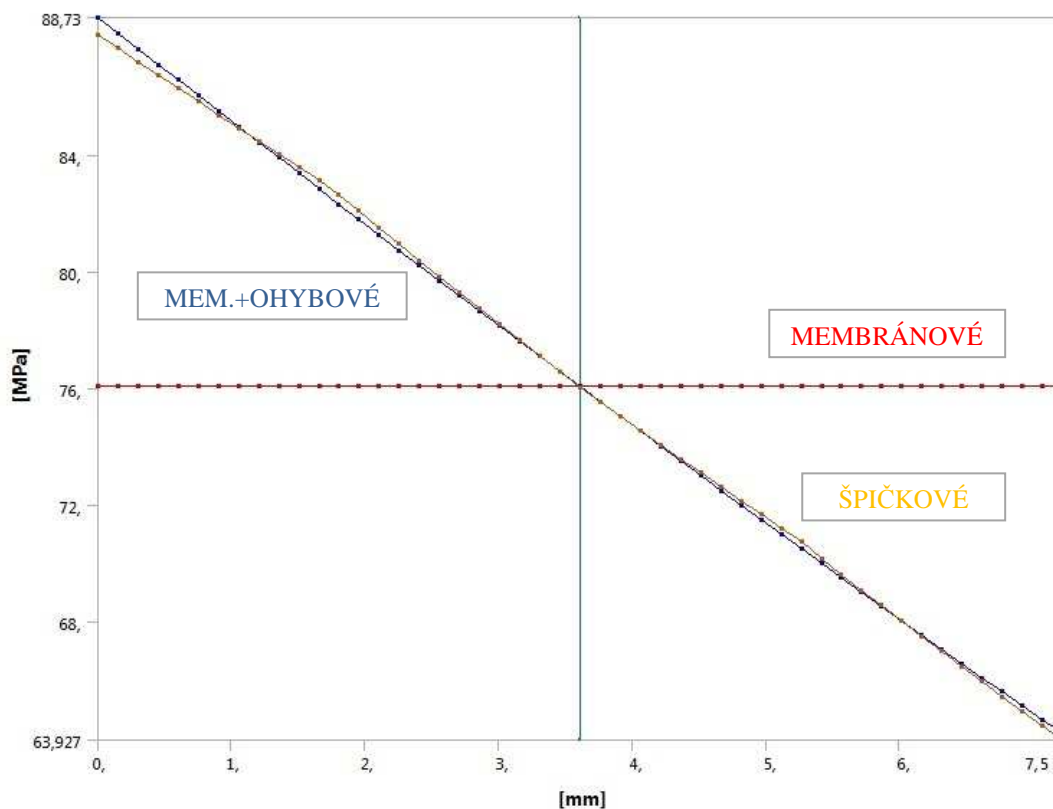
Tab. 6-4 Dovolené napětí při montáži zařízení

$R_{e/250}$	$R_{e/250}/\gamma_{M1}$	1,0 [σ]	1,5 [σ]
167	151,8	151,8	227,7

Tab. 6-5 Dovolené napětí při provozním zatížení

Linearizace napětí

Linearizace napětí proběhla po předem definované konstrukční přímce (Obr. 6-9 a Obr. 6-10), na které bylo celkové napětí rozloženo do primárních, sekundárních a špičkových složek napětí. Pro názornou ukázkou linearizace byl vybrán Graf 1 - Linearizace napětí na výztužném žeburu (Obr. 6-11). Zbylé grafy linearizace jsou součástí přílohy č. 1.



Obr. 6-11 Graf 1 – Linearizace napětí na výztužném žebro (viz. Obr. 6-9)

Hodnocení pevnosti spirální skříně při montážním stavu (zatížení teplotou 20 °C)

Oblast	σ_m [MPa]	1,0 [σ] [MPa]	Hodnocení
Žebro - Graf 3	76,07	235	Vyhovuje

Oblast	σ_{m+b} [MPa]	1,5 [σ] [MPa]	Hodnocení
Žebro - Graf 3	88,735	352,5	Vyhovuje

Tab. 6-6 Posouzení spirální skříně na prostou pevnost, zátěžný stav č. 1 - montáž

Hodnocení pevnosti spirální skříně při provozním zatížení (zatížení teplotou 250 °C)

Oblast	σ_m [MPa]	1,0 [σ] [MPa]	Hodnocení
Žebro - Graf 1	76,07	151,8	Vyhovuje
Deska - Graf 2	4,63	151,8	Vyhovuje

Oblast	σ_{m+b} [MPa]	1,5 [σ] [MPa]	Hodnocení
Žebro - Graf 1	88,73	227,7	Vyhovuje
Deska - Graf 2	39,975	227,7	Vyhovuje

Tab. 6-7 Posouzení spirální skříně na prostou pevnost, zátěžný stav č. 1 - provoz

kde:

1,0 [σ]	[MPa]	- dovolené napětí pro součinitel $k = 1,0$
1,5 [σ]	[MPa]	- dovolené napětí pro součinitel $k = 1,5$
σ_m	[MPa]	- membránové napětí
σ_{m+b}	[MPa]	- membránové + ohybové napětí

Limitní hodnota pro membránové napětí σ_m odpovídá mezi kluzu materiálu R_e . Pro membránové a ohybové složky napětí σ_{m+b} je dovolena lokální plastická deformace materiálu. Tyto lokální plastické deformace nevedou ke ztrátě integrity spirální skříně.

Z výsledků pevnostní analýzy vyplývá, že spirální skříň pro zátěžný stav č. 1 pevnostně vyhovuje a splňuje tak podmínky hodnocení ale normy ČSN EN 1993 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí [2].

6.7 ANALÝZA ZATĚŽNÉHO STAVU Č. 2

6.7

6.7.1 Okrajové podmínky a uvažované zatížení

6.7.1

Pro analýzu napjatosti skříně VM byla uvažována zatížení vnitřním přetlakem, pracovní teplotou, působením gravitačního zrychlení, zatížením hmotností třídiče a vrat mlýna.

Okrajové podmínky byly definovány stejně jako při analýze prvního zatěžovacího stavu popsaném v bodě 6.6.1.

6.7.2 Deformace spirální skříně

6.7.2

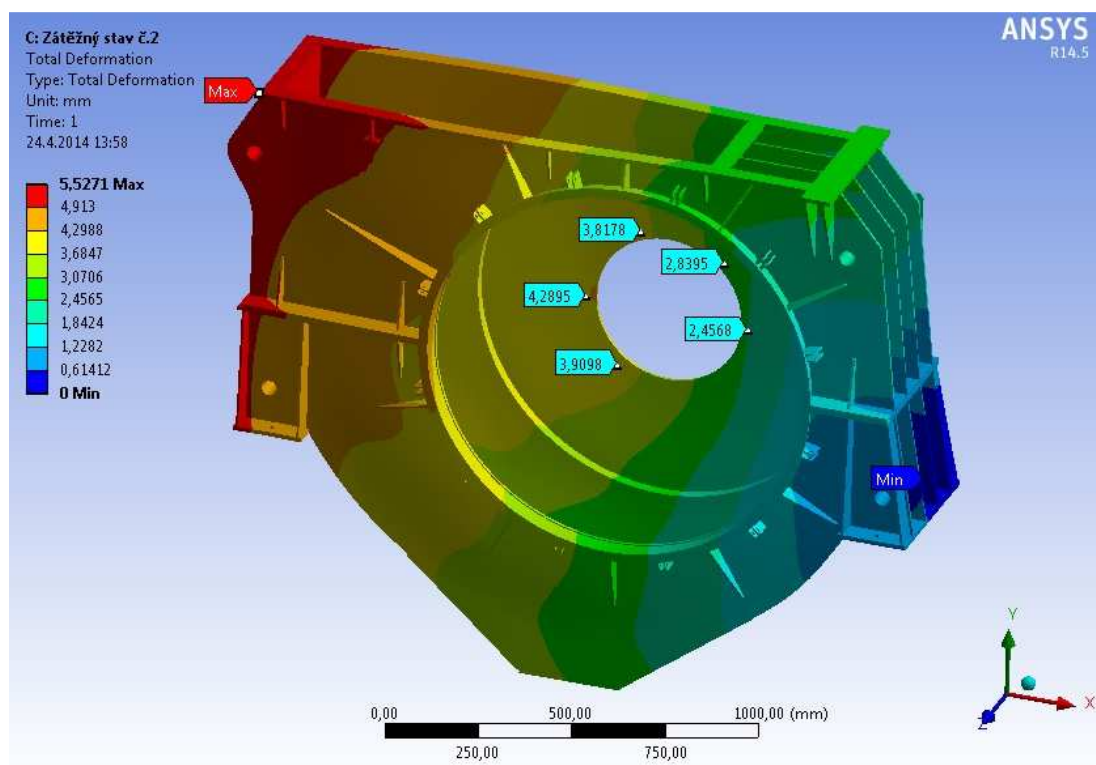
V Tab. 6-8 jsou vypsána výsledná a jednotlivá přemístění (deformace) pro zátěžný stav č. 2. Jednotlivá přemístění UX , UY , UZ jsou vykresleny v příloze č. 1.

Zátěžný stav č. 2 - provoz			Zátěžný stav č. 2 - montáž		
Přemístění do jednotlivých os souř. systému			Přemístění do jednotlivých os souř. systému		
UX_{2-1}	[mm]	5,31	UX_{2-2}	[mm]	0,49
UY_{2-1}	[mm]	4,44	UY_{2-2}	[mm]	0,44
UZ_{2-1}	[mm]	6,08	UZ_{2-2}	[mm]	4,57
Přemístění v oblasti otvoru pro hřídel			Přemístění v oblasti otvoru pro hřídel		
$UMAX_{2-1}$	[mm]	4,27	$UMAX_{2-2}$	[mm]	3,13

Výsledné přemístění			Výsledné přemístění		
URES ₂₋₁	[mm]	5,53	URES ₂₋₂	[mm]	3,13

Tab. 6-8 Výsledná přemístění pro zátěžný stav č. 2

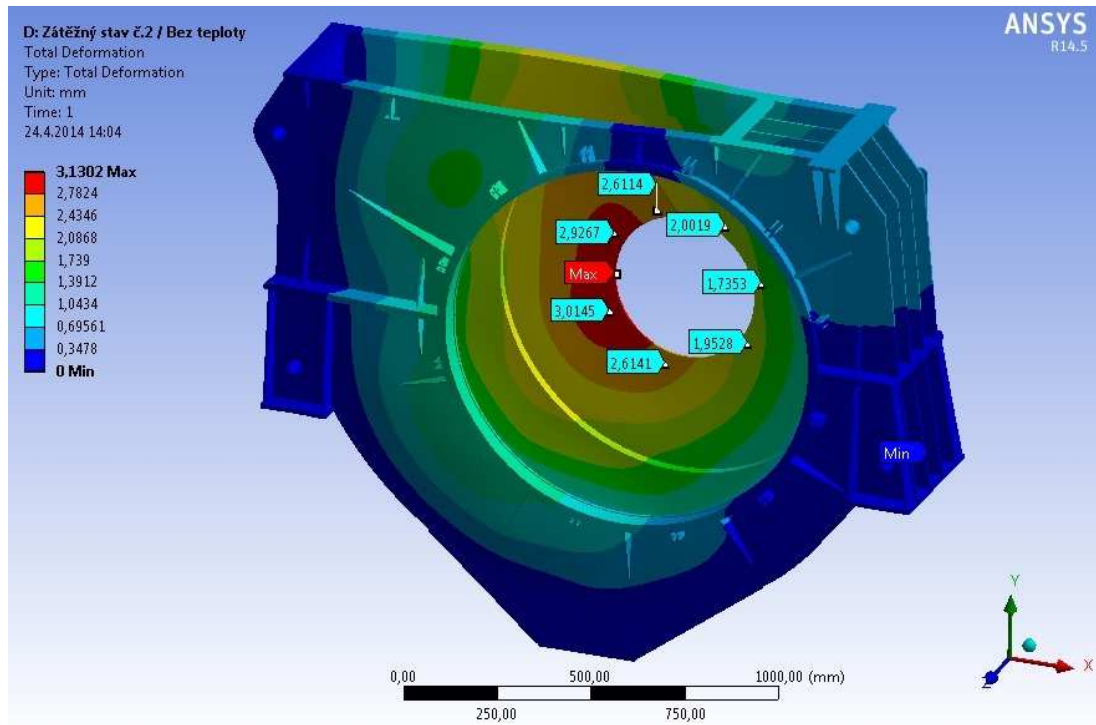
Na následujícím obrázku je vykresleno výsledné přemístění (deformace) spirální skříně pro provozní stav (Obr. 6-12) s maximální hodnotou přemístění URES₂₋₁ = 5,53 mm a výsledné přemístění pro montážní stav (Obr. 6-13) s maximální hodnotou přemístění URES₂₋₂ = 3,13 mm.



Obr. 6-12 Výsledné přemístění spirální skříně, zátěžný stav č. 2 - provoz

Z vykresleného celkového přemístění (Obr. 6-12) je patrné, že vzniklé deformace v oblasti otvoru pro hřídel jsou menší než 4,27 mm. Výsledné přemístění tedy splňuje podmínku maximální dovolené deformace $[UMAX]$ (posouzené dle vzorce (2)). Podmínka je tedy splněna.

Tato podmínka je splněna i v případě montážního stavu (Obr. 6-13), kdy výsledná deformace pro montážní stav odpovídá hodnotě $UMAX_{2-2} = 3,13$ mm.

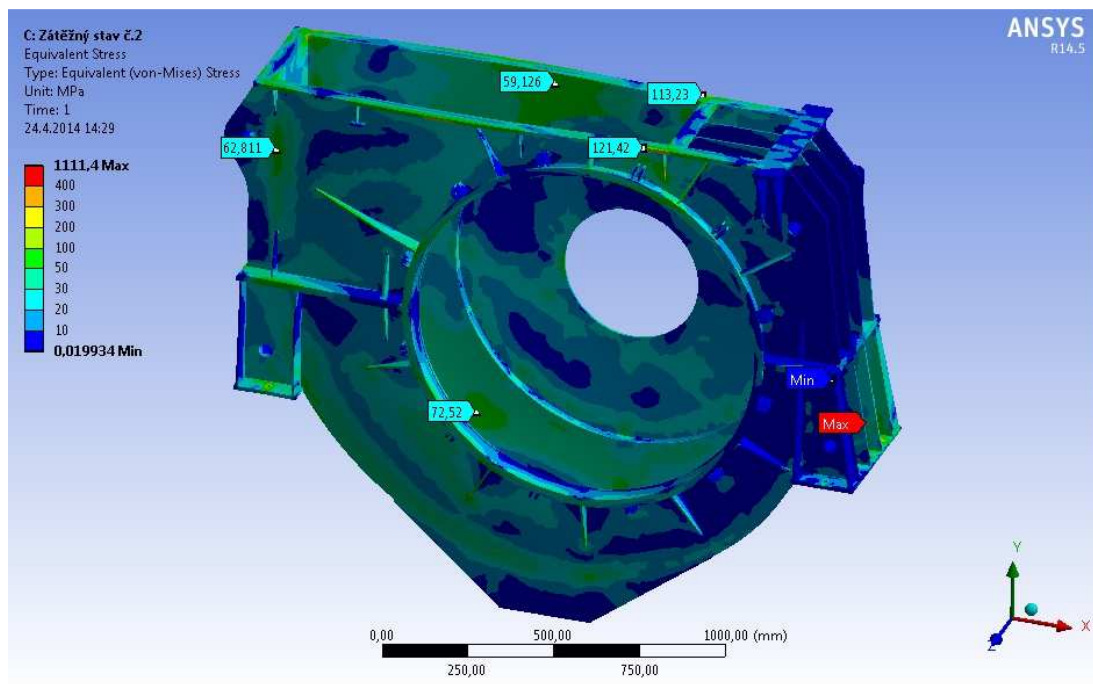


Obr. 6-13 Výsledné přemístění spirální skříně, zátěžný stav č. 2 - montáž

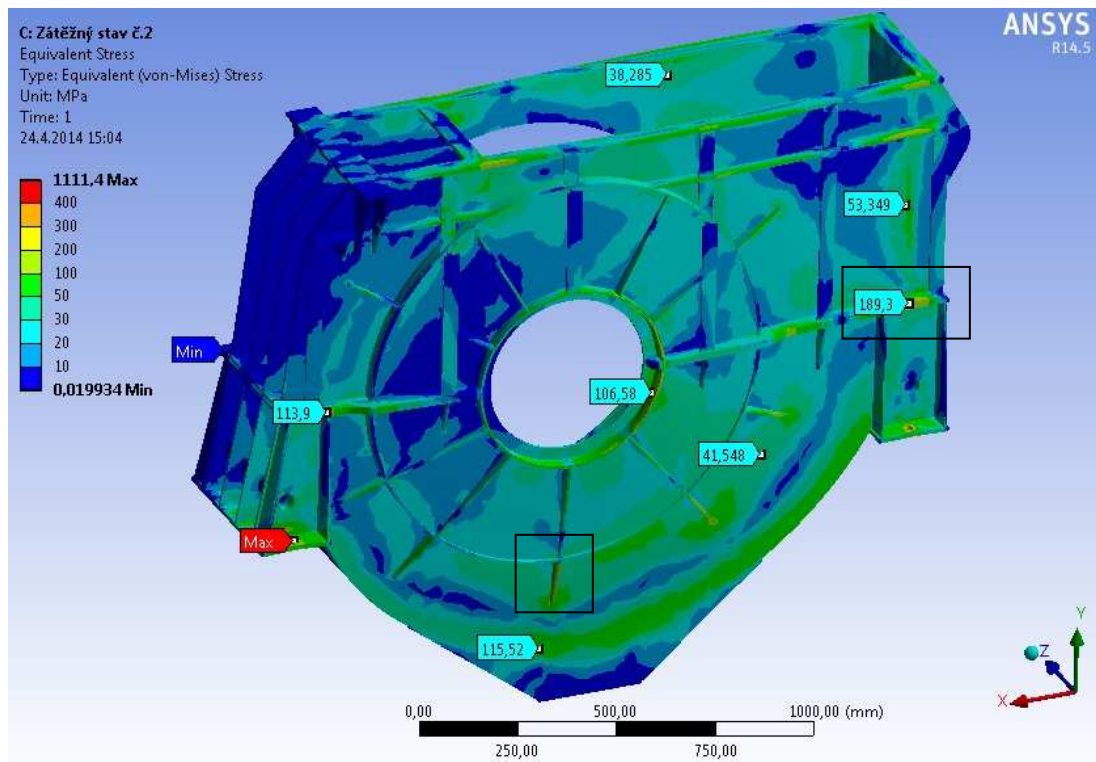
6.7.3 Napjatost spirální skříně

6.7.3

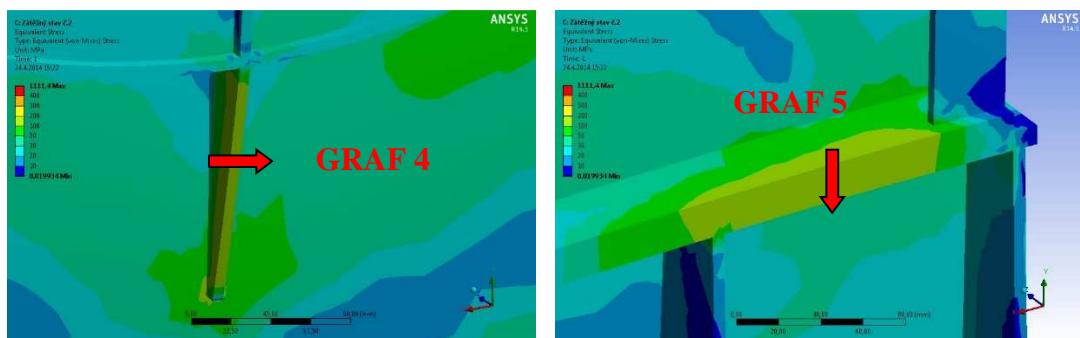
Rozložení napjatosti na spirální skříně při zátěžném stavu č. 2 je zobrazeno na Obr. 6-14 až Obr. 6-17.



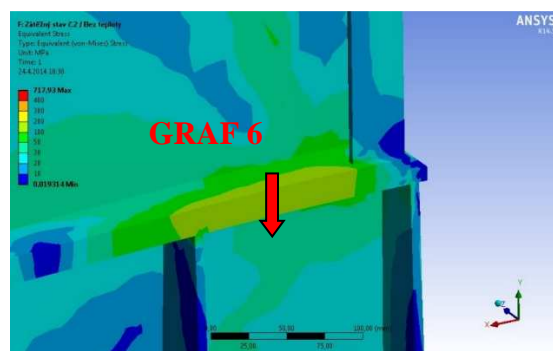
Obr. 6-14 Redukované napětí, zátěžný stav č. 2 - provoz



Obr. 6-15 Redukované napětí, zátěžný stav č. 2 - provoz



Obr. 6-16 Oblast pro linearizaci napětí, zátěžný stav č. 2 - provoz



Obr. 6-17 Oblast pro linearizaci napětí, zátěžný stav č. 2 – montáž

Pro posouzení na prostou pevnost byly vybrány dva nejvíce namáhané průřezy (Obr. 6-16) pro provozní zatížení a jeden namáhaný průřez (Obr. 6-17) pro montážní stav.

6.7.4 Posouzení spirální skříně na prostou pevnost

Hodnoty dovoleného napětí pro montážní a provozní zatížení jsou uvedeny v Tab. 6-4 a Tab. 6-5.

Pro hodnocení pevnosti zátěžného stavu č. 2 byly použity výše uvedené vzorce (3) a (4).

Hodnocení pevnosti spirální skříně při montážním stavu (zatížení teplotou 20 °C)

Oblast	σ_m [MPa]	1,0 [σ] [MPa]	Hodnocení
Dělicí rovina - Graf 6	135,65	235	Vyhovuje

Oblast	σ_{m+b} [MPa]	1,5 [σ] [MPa]	Hodnocení
Dělicí rovina - Graf 6	194,19	352,5	Vyhovuje

Tab. 6-9 Posouzení spirální skříně na prostou pevnost, zátěžný stav č. 2 - montáž

Hodnocení pevnosti spirální skříně při provozním zatížení (zatížení teplotou 250 °C)

Oblast	σ_m [MPa]	1,0 [σ] [MPa]	Hodnocení
Žebro - Graf 4	144,43	151,8	Vyhovuje
Dělicí rovina - Graf 5	135,42	151,8	Vyhovuje

Oblast	σ_{m+b} [MPa]	1,5 [σ] [MPa]	Hodnocení
Žebro - Graf 4	145,53	227,7	Vyhovuje
Dělicí rovina - Graf 5	193,86	227,7	Vyhovuje

Tab. 6-10 Posouzení spirální skříně na prostou pevnost, zátěžný stav č. 2 - provoz

Z výsledků pevnostní analýzy vyplývá, že spirální skříně pro zátěžný stav č. 2 pevnostně vyhovuje a splňuje tak podmínky hodnocení ale normy ČSN EN 1993 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí [2].

6.8 TVORBA VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE SPIRÁLNÍ SKŘÍNĚ

Návrhový výkres spirální skříně je v příloze č. 3: Spirální skříně VM 1000 – návrh – 1 UPEI 001-14.

7 ANALÝZA DYNAMICKY ZATÍŽENÉHO MLECÍHO KOLA ⁷

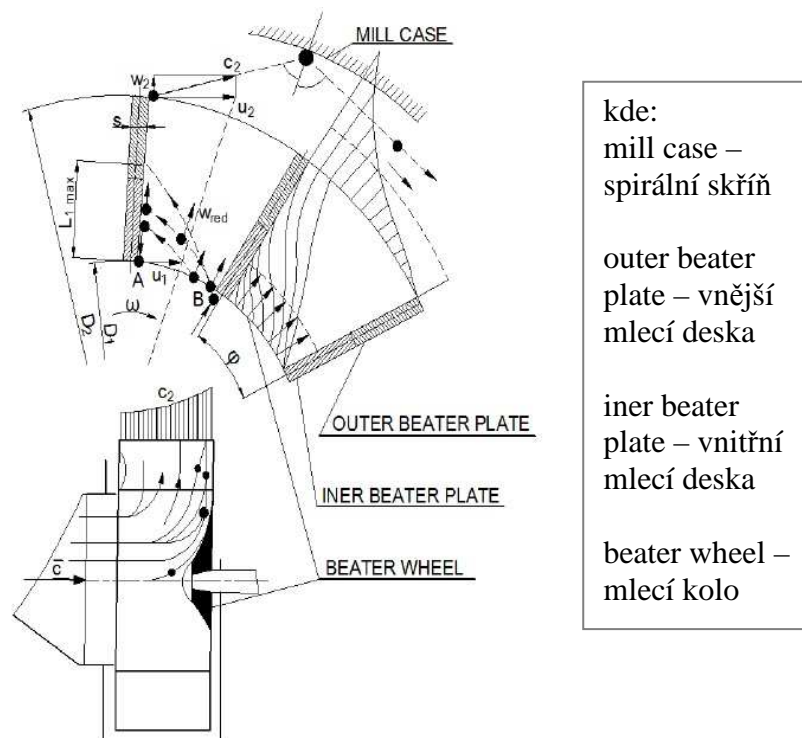
Teorie dynamického zatížení mlecího kola

Proud padajícího uhlí tvořícího částice o různé velikosti, vstupuje do mlecího kola axiálně (Obr. 7-1) se vstupní rychlostí c . Vlivem setrvačných sil dojde k vystředění zrn do radiálního směru a nárazu zrn na mlecí desku mlecího kola. Uhlí vystupuje z mlecího kola rychlostí c_2 . K mletí dochází jednak při srážce zrn s mlecími deskami jednak při nárazu na opanceřování spirální skříň.

Protože popis zatížení mlecího kola je obtížný, lze si proces vzájemného působení uhelné vrstvy a mlecí desky rozdělit do dvou fází.

V první fázi se uplatňuje zejména potenciální energie padajícího uhlí. Dochází k odrazům od mlecí desky, které jsou tlumeny účinkem ostatního dopadajícího uhlí. Vzniklá uhelná vrstva na mlecí desce vyvolává tlakové působení na lopatku mlecího kola. Díky působení těchto externích účinků vzniká na povrchu mlecích desek zpevněná a vytvrzená vrstva o tloušťce až několika milimetrů. Toto tlakové působení je po výšce mlecí desky nerovnoměrné díky účinku odstředivé síly. V druhé fázi se v tlakovém působení uhelné vrstvy na mlecí desku uplatňuje Coriolisův efekt, který vzniká v důsledku zvyšující se obvodové rychlosti po tloušťce mlecí desky.

Popsaný proces zatížení se obdobně opakuje na všech mlecích deskách mlecího kola. Hmotnost uhlí, které se nachází přímo na lopatce (v uhelné vrstvě) je však vůči hmotnosti mlecího kola zanedbatelná (hmotnost rotujících částí až 9 000 kg). Ovlivnění dynamického namáhání mlecího kola nerovnoměrným dopadem uhlí na lopatky se z tohoto důvodu nepředpokládá.



Obr. 7-1 Teorie zatížení mlecího kola [14]

Při provozování ventilátorového mlýna může dojít k několika zátěžným stavům:

- provozní stav
- abnormální (mimořádný) zátěžný stav
 - rozběh mlecího kola
 - zamletí ventilátorového mlýna
 - náraz kusu uhlí na mlecí desku
 - odlomení mlecí desky

V této napěťové analýze dynamicky zatíženého mlecího kola ventilátorového mlýna byl hodnocen pouze provozní stav mlýna.

7.1 VSTUPNÍ HODNOTY

7.1

Fyzikální a materiálové vlastnosti mlecího kola

Mlecí kolo je vyrobeno z uhlíkové oceli P235GH (ze stejného materiálu jako spirální skříň). Pro výpočet byly použity fyzikální vlastnosti materiálu uvedené v Tab. 7-1 a materiálové vlastnosti v Tab. 6-2.

Fyzikální vlastnosti materiálu P235GH dle ČSN EN 10 028-2						
T [°C]	R _e [MPa]	R _m [MPa]	Z [%]	E [MPa]	α [K ⁻¹]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
20	225	360	45	206 000	11,1·10 ⁻⁶	54,5
100	205	355	44	201 000	11,1·10 ⁻⁶	52,7
200	174	350	43	191 000	12,1·10 ⁻⁶	50,2
300	147	330	43	181 000	12,9·10 ⁻⁶	47,3
400	128	157	43	175 000	13,5·10 ⁻⁶	44,6

Tab. 7-1 Fyzikální vlastnosti mlecího kola [8]

Materiál mlecích desek musí odolávat velice silným dynamickým rázům a tlakům. Proto jsou mlecí desky vyrobeny z velice odolné z Mn-Cr oceli na odlitky. Pro zadání fyzikálních vlastností mlecích desek byly použity vlastnosti uvedené v Tab. 7-1, byla změněna pouze hustota materiálu, která je uvedena v Tab. 7-2.

Výpočty byly řešeny v lineárním oboru za předpokladu platnosti Hookova zákona v celém rozsahu zatěžování.

Materiálové charakteristiky mlecích desek		
Hustota materiálu	ρ [kg·m ⁻³]	8 425
Poissonovo číslo	ν [-]	0,3

Tab. 7-2 Materiálové charakteristiky mlecích desek

7.2 ZÁTĚŽNÉ STAVY

7.2

Při analýze napjatosti mlecího kola byla uvažována kombinace dvou působících zatížení.

Prvním uvažovaným zatížením byla vlastní hmotnost mlecího kola. Způsob zadání gravitačního zrychlení je patrný z Obr. 7-10 (označeno písmenem D). Druhým zatížením byla uvažována úhlová frekvence otáčení mlecího kola, která byla vypočítána ze zadaných otáček dle vzorce:

$$\omega = \frac{2 \pi n}{60} \quad (5)$$

kde:

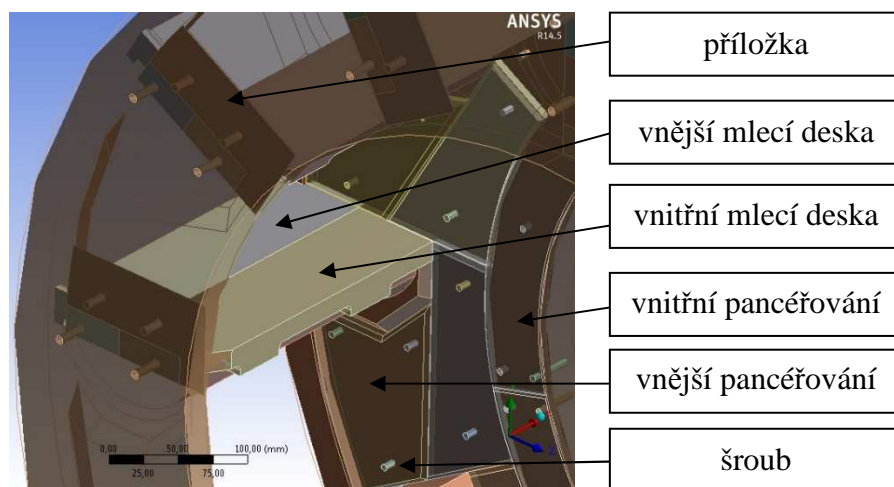
ω [rad·s⁻¹] - úhlová frekvence
 n [ot·min⁻¹] - provozní otáčky mlecího kola, $n = 503$ ot·min⁻¹

7.3 GEOMETRICKÝ MODEL MLECÍHO KOLA

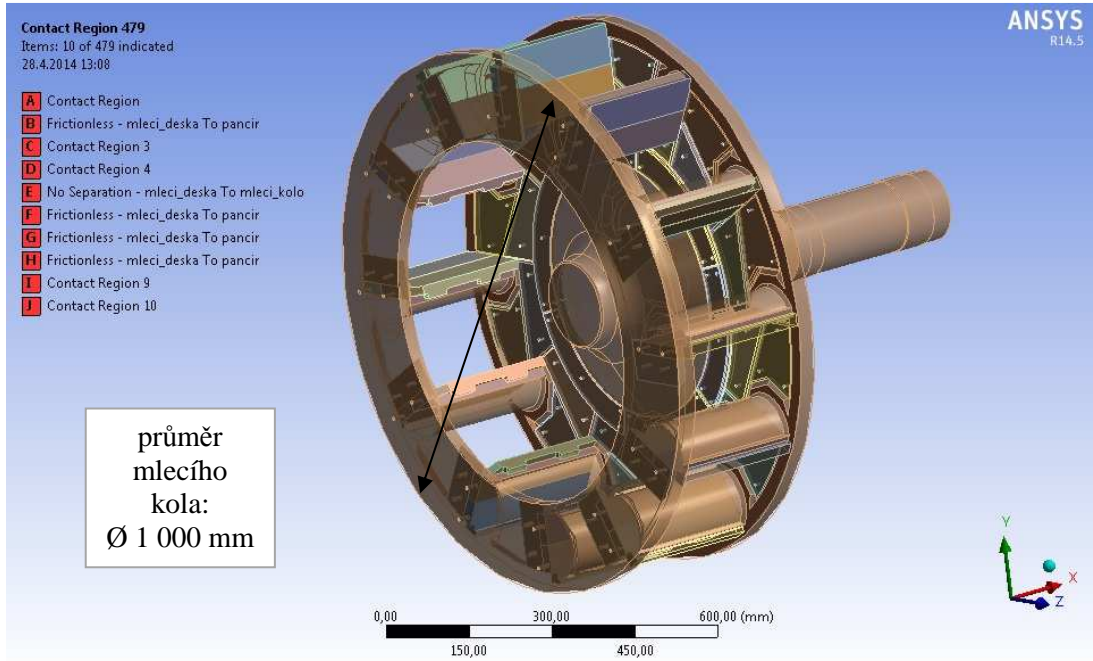
7.3

Geometrie mlecího kola byla navržena na požadované parametry dle poskytnutého výkresu sestavení obdobného řešení VM. Model mlecího kola byl vytvořen v CAD programu SolidWorks 2013 SP3.0 (Obr. 7-3). Model se skládá z vlastního mlecího kola, mlecích desek, pancéřování a kolíků, které spojují jednotlivé díly (Obr. 7-2). Vlastní mlecí kolo je složeno z náboje, základní desky, mezikruží a lopatek, které jsou symetricky umístěny po obvodu a spojují mezikruží a základní desku.

Jelikož předmětem je analýza mlecího kola, bylo při výpočtu uvažováno několik zjednodušení. Prvním zjednodušením je napojení mlecího kola na hřídel. Mlecí kolo a hřídel bylo uvažováno jako jeden díl. Dalším zjednodušením bylo uvažování pevného spojení vnitřní a vnější mlecí desky. Tohoto zjednodušení bylo docíleno pomocí podmínky „bonded“ v definování kontaktů mezi vnitřní a vnější deskou.



Obr. 7-2 Geometrický model mlecího kola, detail



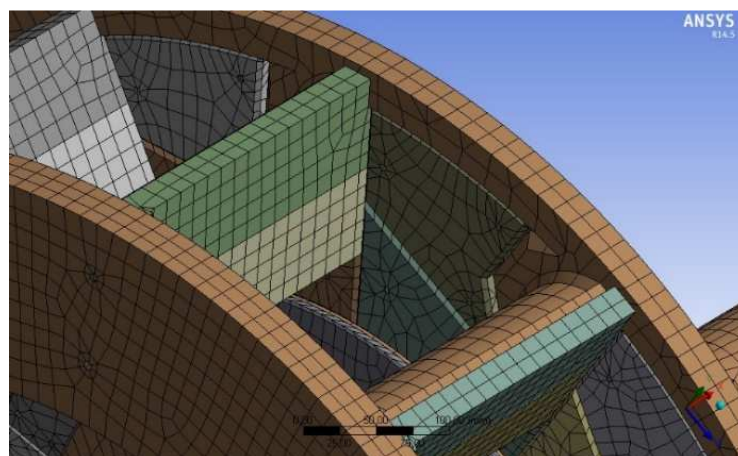
Obr. 7-3 Geometrický model mlecího kola

7.4 VÝPOČTOVÝ MODEL MLECÍHO KOLA

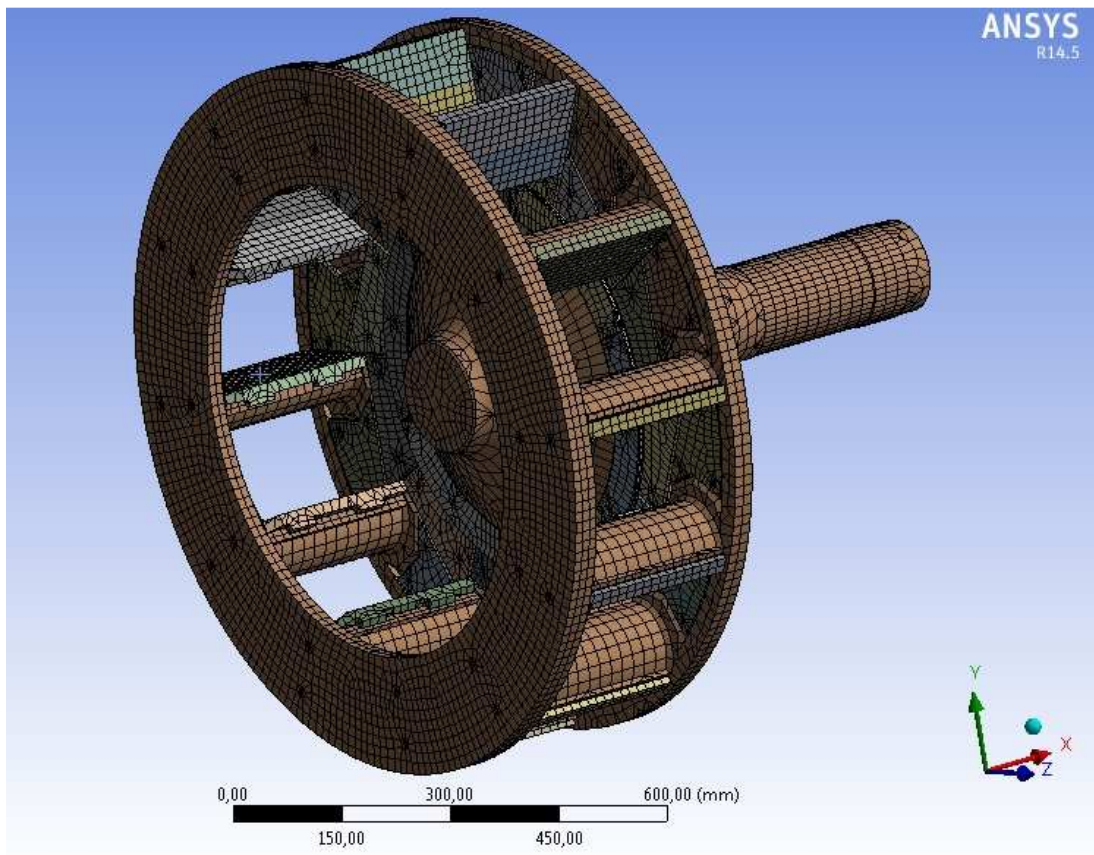
7.4

Geometrický model mlecího kola byl v programu ANSYS Workbench pokryt sítí konečných prvků (Obr. 7-5). Pro pokrytí modelu byly použity elementy ve tvaru krychle typu hex dominant [21] a desetiuzlové kvadratické elementy ve tvaru čtyřstěnu typu tetrahedrons [21].

Pro zkvalitnění sítě bylo na jednotlivých plochách (tělech) použito mapování sítě „mapped face“ a úprava velikosti elementu „face sizing“. Model mlecího kola se skládá z 304 965 prvků a 98 594 uzlů. Pro kontrolu vytvořené sítě byly použity pokročilé metody sledující kvalitu sítě „Mesh Metrics“ a „Structural Error“. Výsledky obou metod jsou uvedeny v příloze č. 2. Tato síť je shodná pro všechny provedené analýzy mlecího kola.



Obr. 7-4 Síť konečných prvků mlecího kola, detail



Obr. 7-5 Síť konečných prvků mlecího kola – přední pohled

7.5 POSTUP VÝPOČTU

7.5

V první fázi výpočtu bylo nutné provést modální analýzu mlecího kola, která nám poskytla důležité údaje o vlastních frekvencích mlecího kola. Následně byla provedena tranzientní analýza pro provozní podmínky, tedy pro úhlovou frekvenci a působení gravitačního zrychlení.

7.6 MODÁLNÍ ANALÝZA

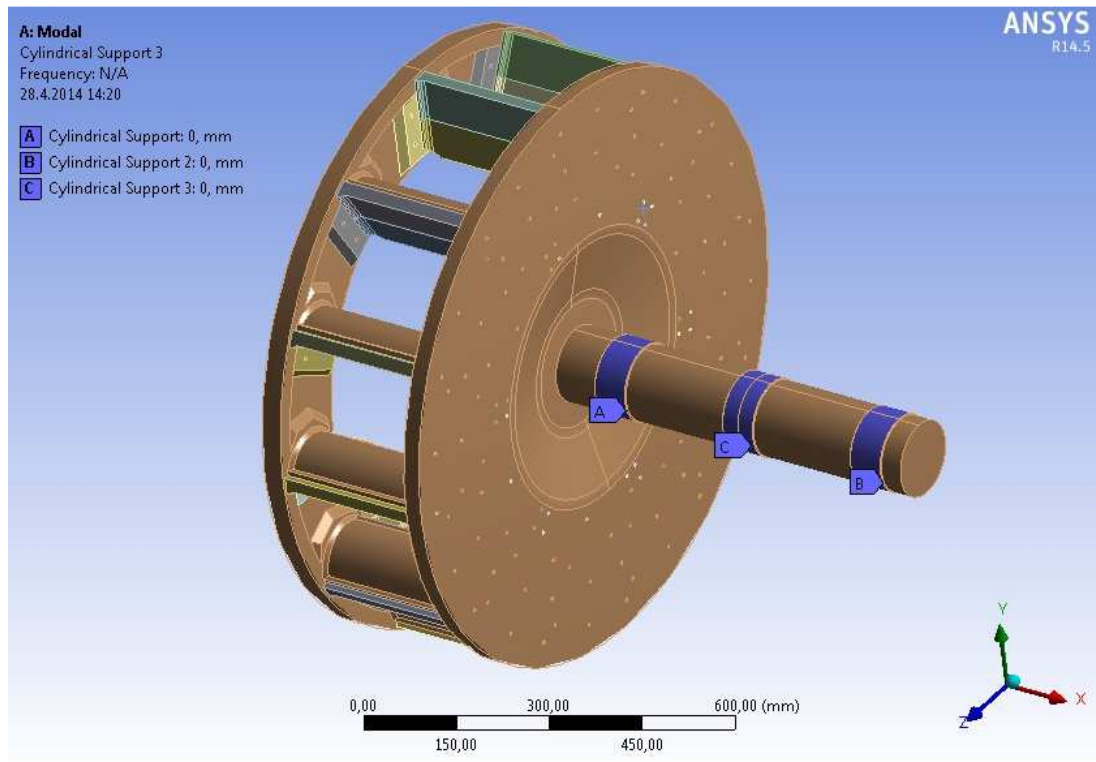
7.6

Z důvodu nutnosti zkoumání dynamického chování mlecího kola byla provedena modální analýza. Tato analýza poskytuje důležité údaje o vlastních frekvencích mlecího kola a vykresluje deformace při dosažení těchto frekvencí.

Modální analýza mlecího kola byla provedena pro provozní podmínky, tedy pro provozní teplotu 400 °C (ve výpočtu uvažovaný odpovídající modul pružnosti dle Tab. 7-1).

7.6.1 Okrajové podmínky a uvažované zatížení

Dle dispozičního uspořádání ventilátorového mlýna bylo zadáno uchycení mlecího kola na hřídeli. V místech ložisek bylo zabráněno posuvům v radiálním směru (Obr. 7-6, označeno písmenem A, B). V místě převodové skříně bylo zabráněno axiálnímu a tangenciálnímu posuvu (Obr. 7-6, označeno písmenem C).



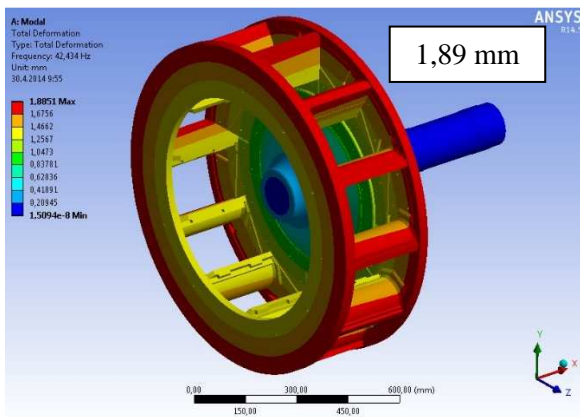
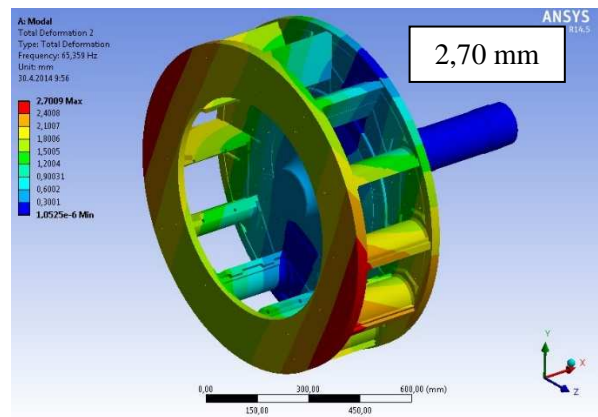
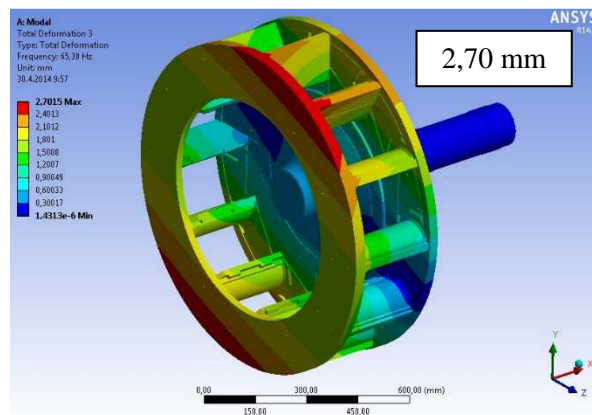
Obr. 7-6 Okrajové podmínky, modální analýza

7.6.2 Popis vlastních frekvencí

Výpočet vlastních frekvencí byl z důvodu provozních podmínek omezen na 0-100 Hz. V tomto rozmezí analýza našla řešení pro 3 vlastní tvary kmitů. Podrobný popis vlastních tvarů kmitů je uveden v příloze č. 2. V Tab. 7-3 jsou vypsány vlastní frekvence mlecího kola. Výsledné přemístění (deformace) mlecího kola pro jednotlivé tvary kmitů jsou vykresleny na Obr. 7-7 až Obr. 7-9.

Tvar	Frekvence
[-]	f [Hz]
1	42,43
2	65,35
3	65,38

Tab. 7-3 Vlastní frekvence mlecího kola

Obr. 7-7 Výsledné přemístění, $f = 42,43$ HzObr. 7-8 Výsledné přemístění, $f = 65,35$ HzObr. 7-9 Výsledné přemístění, $f = 65,38$ Hz

Z výsledků modální analýzy je patrné, že vlastní frekvence mlecího kola ventilátorového mlýna jsou značně vysoké. Z tohoto důvodu nehrozí rezonance s budící frekvencí.

7.7 ANALÝZA PROVOZNÍHO STAVU MLECÍHO KOLA

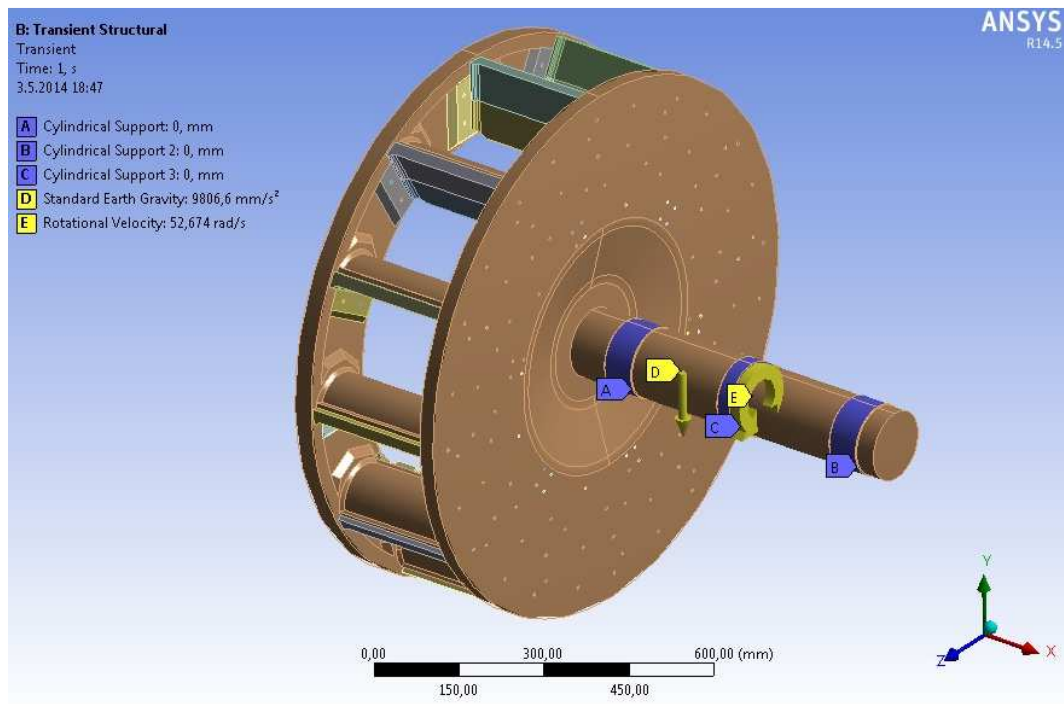
7.7

7.7.1 Okrajové podmínky a uvažované zatížení

7.7.1

Okrajové podmínky uchycení mlecího kola byly zadány v místech ložisek a převodové skříně stejně jako při modální analýze (označeno písmeny A, B, C na Obr. 7-10).

Za osu působení gravitačního zrychlení byla určena osa Y (Obr. 7-10, označeno písmenem D). V místě převodové skříně byla zadána úhlová frekvence o velikosti $\omega = 52,674 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ (Obr. 7-10, označeno písmenem E).

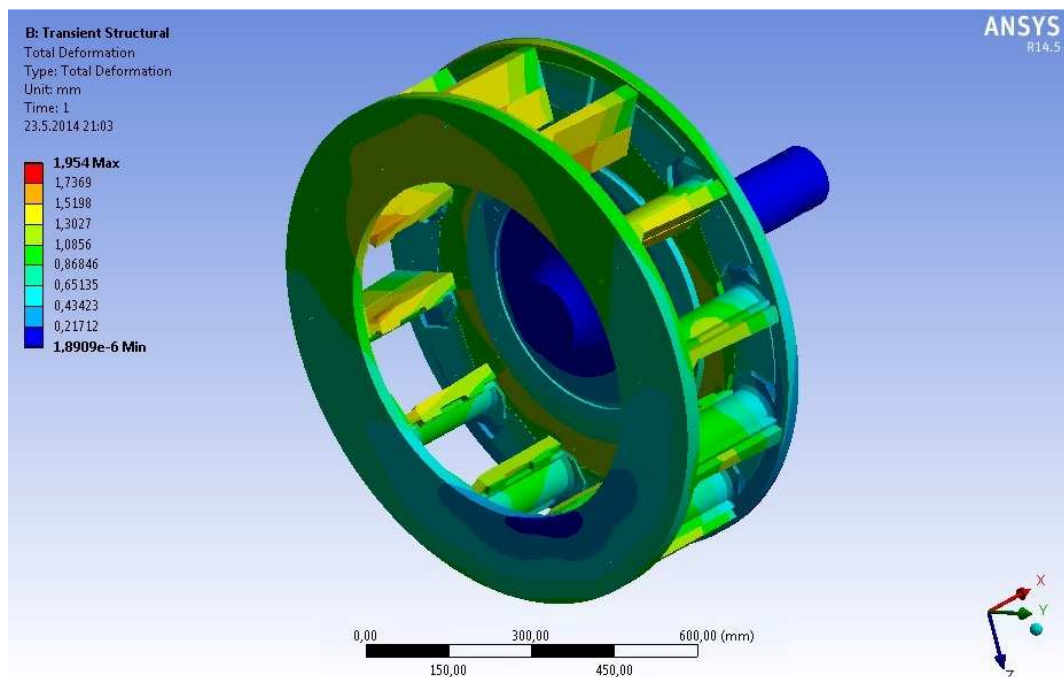


Obr. 7-10 Okrajové podmínky, analýza provozního stavu

7.7.2 Deformace mlecího kola při provozním zatížení

7.7.2

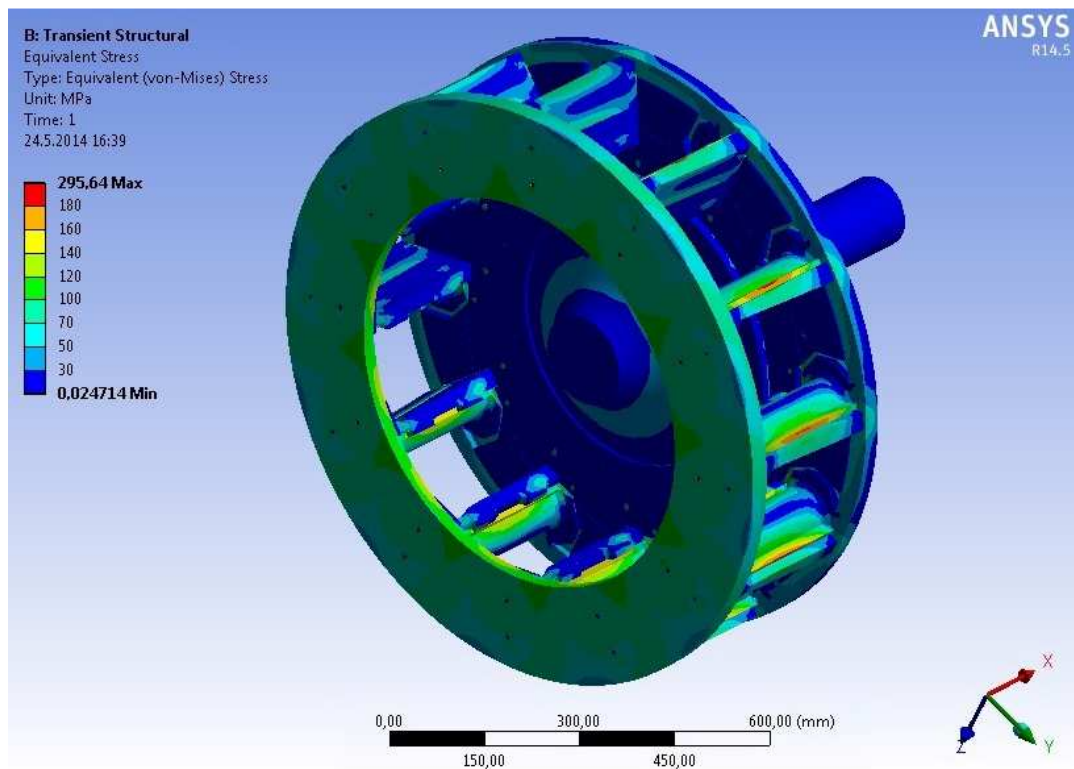
Na následujícím obrázku je vykresleno výsledné přemístění (deformace) mlecího kola při provozním stavu (Obr. 7-11) s maximální hodnotou přemístění $URES_3 = 1,95$ mm. Jednotlivá přemístění UX , UY , UZ mlecího kola jsou vykresleny v příloze č. 2.



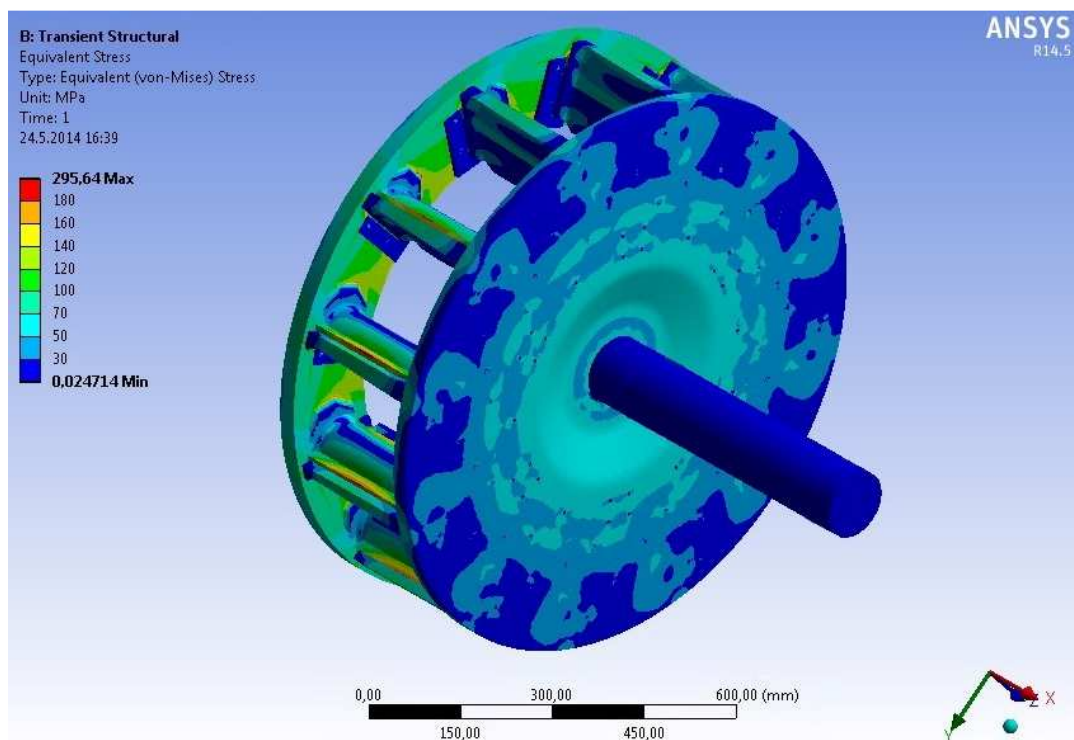
Obr. 7-11 Výsledné přemístění mlecího kola, provozní stav

7.7.3 Napjatost mlecího kola

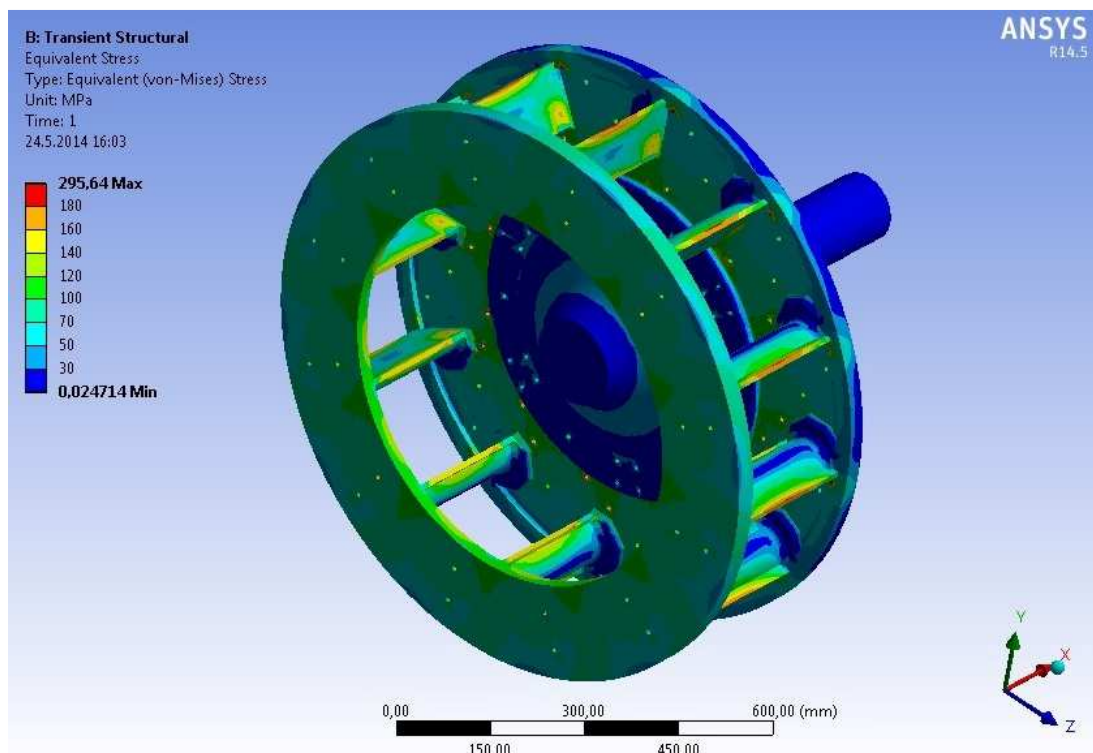
Rozložení napjatosti na mlecím kole při provozním stavu je zobrazeno na Obr. 7-12 až Obr. 7-15.



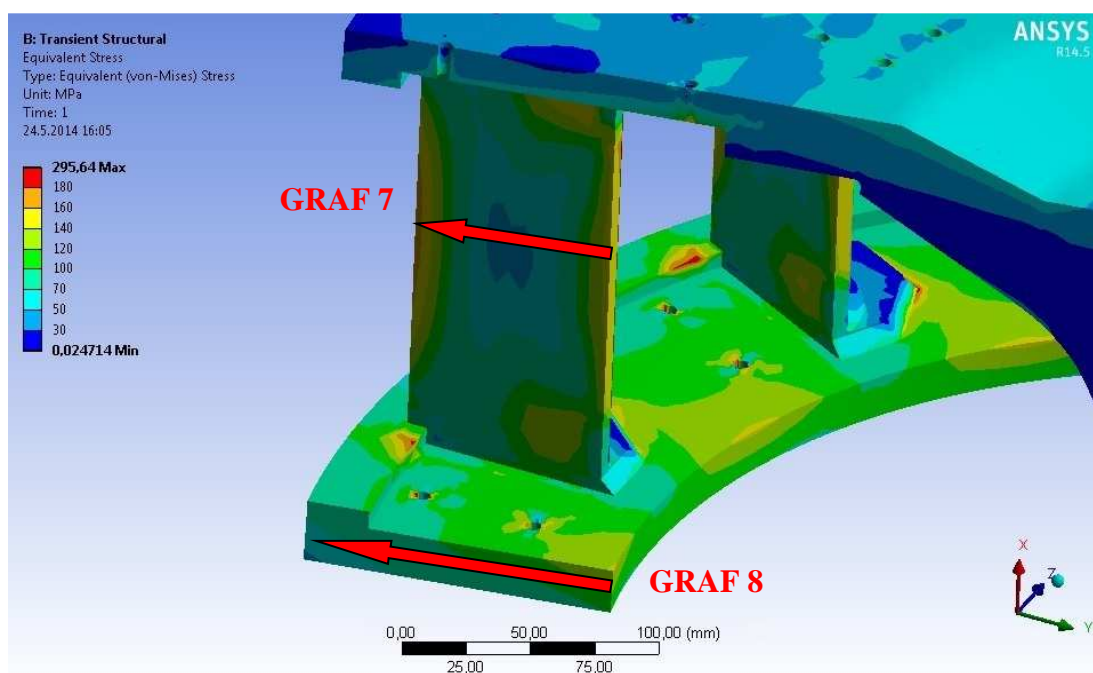
Obr. 7-12 Redukované napětí – celkový pohled - přední, provozní stav



Obr. 7-13 Redukované napětí – celkový pohled - zadní, provozní stav



Obr. 7-14 Redukované napětí – mlecí kolo, provozní stav



Obr. 7-15 Oblast pro linearizaci napětí, provozní stav

Pro posouzení na prostou pevnost byly vybrány dva nejvíce namáhané průřezy, první se nachází na lopatce mlecího kola a druhý na mezikruží (Obr. 7-15).

7.7.4 Posouzení mlecího kola na prostou pevnost

Posouzení mlecího kola na prostou pevnost bylo provedeno dle normy ČSN EN 1993 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí [2].

Pro výpočet dovoleného napětí byl použit vztah (4) s hodnotou meze kluzu materiálu $R_{e/400} = 128$ MPa (viz. Tab. 7-1) a součinitelem bezpečnosti vůči mezi kluzu $\gamma_{M0} = 1,1$ [2].

$R_{e/400}$	$R_{e/400}/\gamma_{M1}$	1,0 [σ]	1,5 [σ]
128	116,36	116,36	174,54

Tab. 7-4 Dovolené napětí při provozním zatížení

Pro hodnocení prosté pevnosti mlecího kola při provozním stavu byl použit vztah (3). Grafy linearizace napětí jsou součástí přílohy č. 2.

Hodnocení pevnosti mlecího kola při provozním zatížení (zatížení teplotou 400 °C)

Oblast	σ_m [MPa]	1,0 [σ] [MPa]	Hodnocení
Lopatka - Graf 7	47,8	116,36	Vyhovuje
Mezikruží - Graf 8	105,1	116,36	Vyhovuje

Oblast	σ_{m+b} [MPa]	1,5 [σ] [MPa]	Hodnocení
Lopatka - Graf 7	162,7	174,54	Vyhovuje
Mezikruží - Graf 8	145,3	174,54	Vyhovuje

Tab. 7-5 Posouzení mlecího kola na prostou pevnost, provozní stav

Limitní hodnota pro membránové napětí σ_m odpovídá mezi kluzu materiálu R_e . Pro membránové a ohybové složky napětí σ_{m+b} je dovolena lokální plastická deformace materiálu. Tyto lokální plastické deformace nevedou ke ztrátě integrity mlecího kola.

Z výsledků pevnostní analýzy vyplývá, že mlecí kolo pro provozní stav pevnostně vyhovuje a splňuje tak podmínky hodnocení ale normy ČSN EN 1993 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí [2].

7.8 TVORBA VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE MLECÍHO KOLA

Návrhový výkres mlecího kola je v příloze č. 3: Mlecí kolo VM 1000 – návrh – 1 UPEI 002-14.

8 ZÁVĚR (KONSTRUKČNÍ, TECHNOLOGICKÝ A EKONOMICKÝ ROZBOR ŘEŠENÍ)

Cílem mé práce bylo navrhnout spirální skříň a mlecí kolo ventilátorového mlýna na základě zadaných parametrů a poskytnutého výkresu sestavení obdobného řešení VM.

V první části své práce jsem vysvětlil hlavní pojmy potřebné k pochopení daného tématu. Dále jsem se zabýval popisem zařízení k přípravě paliva, základními prvky mlecích okruhů a popisem ventilátorového mlýna.

Následně jsem přistoupil k druhé části této práce, kde jsem si v první fázi určil etapy a jednotlivé úkoly, které bylo nutné v průběhu postupně řešit. Po upřesnění zadání a zátěžných stavů jsem provedl koncepční návrh spirální skříně a mlecího kola ventilátorového mlýna. S využitím výpočtového programu ANSYS Workbench jsem dále provedl deformační a napěťovou analýzu jednotlivých dílů pro dané zátěžné stavy.

Analýza spirální skříně byla provedena pro dva zátěžné stavy. Pro normální provozní stav, kdy působí provozní podtlak p_p a abnormální stav, kdy na skříň mlýna působí přetlak p_e . Tento přetlak může nastat například při najíždění zařízení na provozní stav, vlivem navazujícího zařízení nebo při mírné explozi mlecího prášku. Tyto stavy byly vždy hodnoceny pro montážní a provozní teplotu.

Při vyhodnocení výsledků přemístění (deformace) spirální skříně bylo nutné splnit podmínku maximálního dovoleného přemístění v oblasti otvoru pro hřídel. Z důvodu těsnících členů umístěných na hřídeli, byla tato hodnota stanovena na $[UMAX] = 5$ mm. Tato podmínka byla pro všechny zátěžné stavy splněna.

Z porovnání hodnoty $URES_{1-1}$ (výsledné přemístění při provozním zatížení) a hodnoty $URES_{1-2}$ (výsledné přemístění při montážním stavu) je patrné, že deformaci $URES_{1-1}$ primárně způsobuje teplotní zatížení 250 °C. Z důvodu zamezení výskytu napětí pod teplotním zatížením σ_T (napětí v oblastech pro kotevní šrouby), je nutné zabezpečit možnost posuvu (deformaci) spirální skříně. Dále je nutné se vyvarovat pevnému uchycení spirální skříně kotevními šrouby. Tato podmínka může být splněna například, zvětšenými otvory v patkách skříně s dostatečnou vůlí a použitím kluzných desek s nízkým součinitelem tření umístěných pod patkami spirální skříně.

Hodnocení napjatosti spirální skříně a mlecího kola bylo provedeno dle normy ČSN EN 1993 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí [2]. Pro hodnocení napjatosti spirální skříně bylo vybráno několik kritických oblastí, na kterých byla provedena linearizace, kategorizace a následné vyhodnocení. Koncepční návrh spirální skříně ve všech zátěžných stavech vyhověl podmínkám normy.

V první fázi analýzy mlecího kola bylo nutné provést modální analýzu, která nám poskytla důležité údaje o vlastních frekvencích mlecího kola při provozní teplotě (400 °C). Z výsledků je patrné, že vlastní frekvence mlecího kola ventilátorového mlýna jsou značně vysoké a z tohoto důvodu nehrozí rezonance s budící frekvencí. Je nutné podotknout, že modální analýza byla provedena pro 3D symetrický model. Skutečné vlastní frekvence mlecího kola mohou být ve skutečnosti odlišné z důvodu možné nevyváženosti. Proto je nutné provést i dynamické vyvážení mlecího kola.

Následně byla provedena tranzientní analýza mlecího kola pro provozní podmínky, tedy pro provozní teplotu, úhlovou frekvenci ω a působení gravitačního zrychlení g .

Výsledná celková deformace mlecího kola při provozním zatížení $URES_3$ je akceptovatelná, z důvodu dostatečně velké vůle mezi mlecím kolem a skříní ventilátorového mlýna.

Pro hodnocení napjatosti mlecího kola bylo vybráno několik kritických oblastí, lopatka a mezikruží, na kterých byla provedena linearizace, kategorizace a následné vyhodnocení. Nejvíce namáhaná místa jsou v oblasti otvorů pro šrouby, vzniklé špičky napětí jsou však ovlivněny idealizací šroubových spojů (zjednodušení pro výpočet). Koncepční návrh mlecího kola pro provozní stav vyhověl podmínkám normy.

Všechny zadané cíle byly splněny.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KADRNOŽKA, J.: *Tepelné elektrárny a teplárny*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1984, 607 s.
- [2] ČSN EN 1993 – Eurokód 3. *Navrhování ocelových konstrukcí*. Praha: ÚNMZ, 2006.
- [3] KŘUPKA, V.: *Výpočet válcových tenkostěnných kovových nádob a potrubí*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1967, 245 s.
- [4] MEGSON, T. H. G.: *Structural and Stress Analysis*, Butterworth-Heinemann, Oxford 2000.
- [5] SKÁLA, Z.: *Palivové hospodářství*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1987, 153 s.
- [6] MEDEK, J.: *Mechanické pochody*. 3. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1998, 217 s.
- [7] ČSN 07 4009. *Předpisy pro zařízení na přípravu uhelného prášku*. Praha: ÚNMZ, 1978.
- [8] ČSN EN 10 088-2. *Ploché výrobky z ocelí pro tlakové nádoby a zařízení – technické dodací podmínky*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [9] ČSN 42 2921. *Ocel na odlitky ČSN 42 2921 Mn-Cr*. Praha: ÚNMZ, 1975.
- [10] STRNAD, R.: Doprava paliva, frekvenční měniče a pohony ventilátorových mlýnů – příklady efektivního přístupu k údržbě. *All for power*, 2013, roč. 7, č. 3, s. 7-11. ISSN 1802-8535
- [11] BOČEK, J.: Obnova tří bloků největší uhelné elektrárny v Česku s sebou nese nasazení technicky inovovaných kotlů. *All for power*, 2013, roč. 7, č. 5, s. 24-28. ISSN 1802-8535
- [12] KŘÍŽ, P. POCHYLA, M.: Ventilátorové mlýny v novém – regulace frekvenčními měniči. *Elektrotrh*. 2012, č. 9, s. 18-20. ISSN 1212-9933
- [13] BAJRIC, J. ZUBER, N. ŠOSTAKOV, R.: *Relations between pulverizing process parameters and beater wheel mill vibration for predictive maintenance program setup*. *Eksloatacja I Niezawodnosc – Maintenance and Reability* 2014, 16 (1): 158-163.
- [14] SCIESZKA, S. GRZEGORZEK, W. ŻOLNIERZ, M.: *Simulative tribo-testing of erosive wear for coal impact mills*. *Scientific problems of machines operation and maintenance* 2010, 4 (164): 37-54.

- [15] DODDS, D. NASER, J. ALAM, F. SIDDIQUEL, H.: *CFD modeling of flow and erosion in a coal pulverizing mill*. [online], 21. 12. 2010 [cit. 2014-01-19]. Dostupné z: <<http://bsmeicte2012.iutoic-dhaka.edu/proceedings/13th-acfm-2010/contributed/fluidmechinery/1016.pdf>>
- [16] Www.casopisstavebnictvi.cz [online], [cit. 2014-01-19]. Dostupné z: <http://www.casopisstavebnictvi.cz/UserFiles/File/img_0704/39_01_b.jpg>
- [17] Www.hitachi-power-service.com [online], [cit. 2014-05-4]. Dostupné z: <http://www.hitachi-power-service.com/media/files/broschueren/de/HPES_5_Mills_Components.pdf>
- [18] Www.hornictvi.info [online], [cit. 2013-12-20]. Dostupné z: <http://www.hornictvi.info/prirucka/up_rudy/03.htm>
- [19] Www.ivitas.cz [online], [cit. 2013-12-20]. Dostupné z: <www.ivitas.cz/doc/download_file/pripadova_studie_130716_web-7.pdf>
- [20] Www.tespo-eng.cz [online], [cit. 2014-01-10]. Dostupné z: <http://www.tespo-eng.cz/publik_syst/files11/rozbehove_spojky_K_CZ.pdf>
- [21] The Finite Element Method – Theory [online], [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <<http://illustrations.marin.ntnu.no/structures/analysis/FEM/theory/index.html>>
- [22] Ansys Theory Reference [online], [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <<http://research.me.udel.edu/~lwang/teaching/MEx81/ansys56manual.pdf>>
- [23] Www.help.solidworks.com [online], [cit. 2014-03-14]. Dostupné z: <<http://help.solidworks.com/>>

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN **10**

A	[-]	- pracovní bod
D	[mm]	- průměr mlecího kola
E	[MPa]	- modul pružnosti v tahu (Youngův modul)
L	[-]	- počet lopatek mlecího kola
M_I	[N·m]	- moment přenášený hydrospojkou
M_L	[N·m]	- absorbovaný moment zařízením
M_m	[N·m]	- záběrový moment elektromotoru (jmenovitý moment při plné zátěži)
M_{ml}	[t·h ⁻¹]	- mlecí výkon
N	[kW]	- výkon elektromotoru mlýna
R_e	[MPa]	- mez kluzu materiálu
$R_{e/20}$	[MPa]	- mez kluzu materiálu při montážní teplotě
$R_{e/250}$	[MPa]	- mez kluzu materiálu při provozní teplotě
R_m	[MPa]	- mez pevnosti materiálu
T	[°C]	- teplota
$UMAX$	[mm]	- maximální přemístění v oblasti otvoru pro hřídel
$[UMAX]$	[mm]	- maximální dovolené přemístění
$URES$	[mm]	- výsledné přemístění
UX	[mm]	- složka přemístění promítnutá do osy x souřadného systému
UY	[mm]	- složka přemístění promítnutá do osy y souřadného systému
UZ	[mm]	- složka přemístění promítnutá do osy z souřadného systému
V	[m ³ ·s ⁻¹]	- objemový výkon
Z	[%]	- poměrné zúžení
c	[m·s ⁻¹]	- vstupní rychlost uhlí
c_2	[m·s ⁻¹]	- výstupní rychlost uhlí
f	[Hz]	- vlastní frekvence
g	[m·s ⁻²]	- gravitační zrychlení
h	[kg·kg ⁻¹ vz]	- koncentrace prášku
k	[-]	- součinitel
m_t	[t]	- hmotnost třídiče
n	[ot·min ⁻¹]	- provozní otáčky mlecího kola
p_e	[MPa]	- abnormální tlak
p_p	[MPa]	- provozní tlak
α	[K ⁻¹]	- součinitel přestupu tepla
γ_{M0}	[-]	- součinitel bezpečnosti vůči mezi kluzu při montáži zařízení
γ_{M1}	[-]	- součinitel bezpečnosti vůči mezi kluzu při provozním zatížení
Δp	[Pa]	- tlaková diference, ztráta
λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	- tepelná vodivost
ν	[-]	- Poissonovo číslo

ρ	[kg·m ⁻³]	- hustota materiálu
ρ_p	[kg·m ⁻³]	- měrná hmotnost plynného prostředí
σ_m	[MPa]	- membránové napětí
σ_{m+b}	[MPa]	- membránové + ohybové napětí
$\sigma_{red,max}$	[MPa]	- maximální redukované nominální napětí
σ_T	[MPa]	- napětí pod teplotním zatížením
$[\sigma]$	[MPa]	- dovolené napětí
ω	[rad·s ⁻¹]	- úhlová frekvence
$1,0 [\sigma]$	[MPa]	- dovolené napětí pro součinitel k = 1,0
$1,5 [\sigma]$	[MPa]	- dovolené napětí pro součinitel k = 1,5

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Zjednodušené schéma tepelné elektrárny [16]	14
Obr. 2-2 Schéma mlecí stanice [5]	15
Obr. 2-3 Trubnatý mlýn [18]	17
Obr. 2-4 Tlukadlový mlýn [5]	18
Obr. 2-5 Ventilátorový mlýn [5]	18
Obr. 2-6 Kroužkový mlýn [5]	19
Obr. 2-7 Kladkový mlýn [5]	19
Obr. 2-8 3D model ventilátorového mlýna [19]	21
Obr. 2-9 Řez ventilátorovým mlýnem [19]	22
Obr. 2-10 Pohled na 3D vizualizaci kotle [11]	23
Obr. 2-11 Charakteristika mlýnu při změně otáček [5]	24
Obr. 2-12 Charakteristika mlýnu při změně měrné hmotnosti spalin [5]	24
Obr. 2-13 Charakteristika mlýnu při změně koncentrace prášku [5]	24
Obr. 2-14 Rychlostní profil střední rovinou mlýna [15]	25
Obr. 2-15 Rozběh a momentová charakteristika rozběhové hydraulické spojky	26
Obr. 2-16 Mlýn s asynchronním motorem řady SIMOTICS 1LA4 [12]	27
Obr. 2-17 Skříňový frekvenční měnič řady SINAMICS G150 [12]	27
Obr. 6-1 Geometrický model spirální skříně	32
Obr. 6-2 Síť konečných prvků spirální skříně, zjemnění sítě – přední pohled	33
Obr. 6-3 Síť konečných prvků spirální skříně – zadní pohled	34
Obr. 6-4 Okrajové podmínky, zátěžný stav č. 1 – přední pohled	35
Obr. 6-5 Okrajové podmínky, zátěžný stav č. 1 – zadní pohled	35
Obr. 6-6 Výsledné přemístění spirální skříně, zátěžný stav č. 1 – provoz	36
Obr. 6-7 Výsledné přemístění spirální skříně, zátěžný stav č. 1 – montáž	37
Obr. 6-8 Redukované napětí, zátěžný stav č. 1 – provoz	38
Obr. 6-9 Oblast pro linearizaci napětí, zátěžný stav č. 1 – provoz	38
Obr. 6-10 Oblast pro linearizaci napětí, zátěžný stav č. 1 – montáž	39
Obr. 6-11 Graf 1 – Linearizace napětí na výztužném žeburu (viz. Obr. 6-9)	41
Obr. 6-12 Výsledné přemístění spirální skříně, zátěžný stav č. 2 - provoz	43
Obr. 6-13 Výsledné přemístění spirální skříně, zátěžný stav č. 2 - montáž	44
Obr. 6-14 Redukované napětí, zátěžný stav č. 2 - provoz	44
Obr. 6-15 Redukované napětí, zátěžný stav č. 2 - provoz	45
Obr. 6-16 Oblast pro linearizaci napětí, zátěžný stav č. 2 - provoz	45
Obr. 6-17 Oblast pro linearizaci napětí, zátěžný stav č. 2 – montáž	45
Obr. 7-1 Teorie zatížení mlecího kola [14]	47
Obr. 7-2 Geometrický model mlecího kola, detail	49
Obr. 7-3 Geometrický model mlecího kola	50
Obr. 7-4 Síť konečných prvků mlecího kola, detail	50
Obr. 7-5 Síť konečných prvků mlecího kola – přední pohled	51
Obr. 7-6 Okrajové podmínky, modální analýza	52
Obr. 7-7 Výsledné přemístění, $f = 42,43$ Hz	53
Obr. 7-8 Výsledné přemístění, $f = 65,35$ Hz	53
Obr. 7-9 Výsledné přemístění, $f = 65,38$ Hz	53
Obr. 7-10 Okrajové podmínky, analýza provozního stavu	54
Obr. 7-11 Výsledné přemístění mlecího kola, provozní stav	54

Obr. 7-12 Redukované napětí – celkový pohled - přední, provozní stav	55
Obr. 7-13 Redukované napětí – celkový pohled - zadní, provozní stav	55
Obr. 7-14 Redukované napětí – mlecí kolo, provozní stav	56
Obr. 7-15 Oblast pro linearizaci napětí, provozní stav	56

12 SEZNAM TABULEK

Tab. 6-1 Fyzikální vlastnosti materiálu spirální skříně [8]	31
Tab. 6-2 Materiálové charakteristiky použité při výpočtu spirální skříně	31
Tab. 6-3 Výsledná přemístění pro zátěžný stav č. 1	36
Tab. 6-4 Dovolené napětí při montáži zařízení	40
Tab. 6-5 Dovolené napětí při provozním zatížení	40
Tab. 6-6 Posouzení spirální skříně na prostou pevnost, zátěžný stav č. 1 - montáž	41
Tab. 6-7 Posouzení spirální skříně na prostou pevnost, zátěžný stav č. 1 - provoz	42
Tab. 6-8 Výsledná přemístění pro zátěžný stav č. 2	43
Tab. 6-9 Posouzení spirální skříně na prostou pevnost, zátěžný stav č. 2 - montáž	46
Tab. 6-10 Posouzení spirální skříně na prostou pevnost, zátěžný stav č. 2 - provoz	46
Tab. 7-1 Fyzikální vlastnosti mlecího kola [8]	48
Tab. 7-2 Materiálové charakteristiky mlecích desek	48
Tab. 7-3 Vlastní frekvence mlecího kola	52
Tab. 7-4 Dovolené napětí při provozním zatížení	57
Tab. 7-5 Posouzení mlecího kola na prostou pevnost, provozní stav	57

13 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č. 1:** Výsledky statického posouzení spirální skříně
- Příloha č. 2:** Výsledky dynamicky zatíženého mlecího kola
- Příloha č. 3:** Spirální skříně VM 1000 – návrh – 1 UPEI 001-14
- Příloha č. 4:** Mlecí kolo VM 1000 – návrh – 1 UPEI 002-14
- Příloha č. 5:** CD-ROM