

Jednostěnové bezkomorové koleso pro rýpadlo KU800.7/K75 - pevnostní analýza za pomoci PC

Einwandiges zellenloses Schaufelrad für den Bagger KU800.7/K75 – Festigkeitsanalyse mit PC-Unterstützung

Das Ziel des Beitrages ist es, einerseits die Fachöffentlichkeit mit der Anwendung von neuen Technologien in VÚHU, a.s. vertraut zu machen und andererseits einer der möglichen Ansätze zum Projektieren und Analysieren der Maschinenteile und deren Gruppen zu zeigen und den Interessenten für eine Zusammenarbeit neue Möglichkeiten umzureißen. Die Methode der Endelemente hat ihre Schwerpunkte (Wahl des Element-Netztes, Wahl der einzelnen Elementen, Wahl der Modelleinzelheiten aus dem Gesichtspunkt der gewünschten Ergebnissen und deren Genauigkeit – Arbeitsaufwandes des Modells, geeignete Interpretierung von Ergebnissen), aber auch ihre Vorteile – sie kann die Vorstellung eines Konstrukteurs über dem wirklichen Beanspruchung des analysierten Teiles oder eines gesamten Maschinenkomplexes verbessern.

One-wall chamber-free paddle wheel for excavator KU800.7/K75 – strength analysis by means of PC

The aim of the report is to introduce experts to new technologies utilization in Brown Coal Research Institute, joint-stock company and furthermore to show one of possible new approaches to design and analyse machinery parts and their units and to outline new possibilities for interested persons. A finite elements method is relatively difficult to use (choice of elements network, choice of elements themselves, choice of model niceness concerning requested results and their precision – model elaborateness, proper interpretation of results), but it has got many advantages - it can improve

designer's idea about actual stress of analysed part or whole mechanical unit.

Одностенный бескамерный ротор для экскаватора KU 800.7/K75 - анализ прочности при помощи персонального компьютера

Статья хочет познакомить техническую публику с использованием новых технологий в институте ВУГУ Мост, а/о, а также показать один из возможных новых подходов к проектированию и анализованию частей машин и их комплексов. Метод финитных элементов имеет свои трудные места (выбор сети элементов, выбор настоящих элементов, выбор подробности модели с точки зрения требуемых результатов и их точности - трудоемкости модели, подходящая интерпретация результатов), но и свои преимущества - он может улучшить представления конструктора о настоящем напряжении анализированной части машины или всего машинного комплекса.

Jednostěnové bezkomorové koleso pro rýpadlo KU800.7/K75

Cílem příspěvku je jednak seznámit technickou veřejnost s využíváním nových technologií ve VÚHU, a.s. a dále ukázat jeden z možných nových přístupů k projektování a analýze strojních částí a jejich celků a zájemcům o spolupráci nastínit nové možnosti. Metoda konečných prvků má svá úskalí (volba sítě prvků, volba samotných prvků, volba detailnosti modelu z hlediska požadovaných výsledků a jejich přesnosti - pracnosti modelu, vhodná interpretace výsledků), ale i přednosti - může zlepšit představu konstruktéra o skutečném namáhání analyzované části nebo celého strojního celku.

V minulých měsících probíhaly v technickém odboru Výzkumného ústavu pro hnědé uhlí (VÚHU) práce na dokončení návrhu **jednostěnového bezkomorového kola č.v. 0-RK8-9649 pro rekonstrukci kolesové špičky lomového rýpadla KU800.7/K75** Mostecké uhelné společnosti. Tyto práce byly konány jednak pod záštitou MUS, a.s. (hlavně v závěrečné fázi) a jednak pod záštitou projektů Centra špičkových technologií. V rámci těchto prací byla a v současnosti ještě je prováděna pevnostní analýza navržené konstrukce kola s využitím v České republice relativně nových výpočetních postupů.

VÚHU, a.s., respektive pracoviště jeho technického odboru, bylo vybaveno výpočetním **programovým balíkem COSMOS/M 2.5** firmy Structural Research and Analysis Corporation (SRAC) z roku 1999.

Uvedený program pracuje **metodou konečných prvků (FEM)**. Využívá hraniční a polynomicke varianty této metody (tzv. H-metoda, P-metoda a jejich kombinace). V rámci **pevnostní analýzy** umožňuje provádět analýzu

- | | |
|--|----------------------------|
| | - statickou lineární |
| | - statickou nelineární |
| | - únavy |
| | - dynamickou |
| | - frekvenční |
| | - stabilitní |
| Dále je možné v programu provádět analýzu | - vedení tepla |
| | - proudění |
| | - elektromagnetismu |

VÚHU vlastní licenci na moduly pevnostní analýzy s výjimkou únavy.

Obecné charakteristiky programu:

- | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| Široká škála konečných prvků typu | - prutové |
| | - nosníkové |
| | - deskové |
| | - skořepinové |
| | - objemové |
| Maximální počet konečných prvků | - 1 024 000 |
| Maximální počet uzlových bodů | - 256 000 |
| Vytváření sítě konečných prvků | - automatické |
| | - manuální |
| | - parametrické |
| Nároky na výpočetní techniku | - procesor min Intel Pentium II |
| | - paměť min 128 MB RaM |
| | optimálně 768 MB RaM a více |
| | - rychlá grafika ... 32MB paměti |

Součástí programového balíku COSMOS/M jsou programy DesignStar a Geostar. Program DesignStar umožňuje efektivní provádění pevnostní analýzy strojních částí a jejich sestav na 3D modelech převzatých z jiných Cadovských programů - např. IDEAS, Pro Engineer, ACad, EUKLID, CATIA a Mechanical Desktop a Inventor. Právě na spolupráci **DesignStaru a Inventoru** je postavena budoucnost konstrukčních prací v technickém odboru. Program **Geostar** na rozdíl od DesignStaru

umožňuje vytvoření 3D modelu strojní části a její následnou analýzu. Jde však o starší a uživatelsky méně příjemný program, avšak s velmi univerzálními a širokými možnostmi analýzy. Právě v tomto programu byla provedena pevnostní analýza jednostěnového bezkomorového kola č.v. 0-RK8-9649 pro rekonstrukci kolesové špičky lomového rýpadla KU800.7/K75 Mostecké uhelné společnosti.

Účelem analýzy bylo (v souladu s ČSN 73 0031) ověřit rozměrový a materiálový návrh jednostěnového kola dle výše uvedeného výkresu z hlediska únosnosti, použitelnosti (deformací) a dimenzování s životností cca 15 let. Analýza únosnosti a použitelnosti byla již provedena a bude o ní více pojednáno dále. Na analýze předpokládané životnosti konstrukce se v současnosti intenzivně pracuje, rovněž podle nových metod.

Analýza únosnosti a použitelnosti

Stručný výtah z práce "Výrobní dokumentace bezkomorového kola K 75 - pevnostní analýza", zpráva VÚHU č. 214/2001.

Stručný popis navržené konstrukce kola

Hlavní nosná ocelová konstrukce (dále jen OK) bezkomorového jednostěnového kola je navržena jako prolamovaný disk, tvořený dvěma komolými kužely, opatřený na vnějším průměru věncem pro upevnění korečků. Vnitřním průměrem je disk připojen k trubkovému náboji, který je pomocí rozpínacích kuželových kroužků (DOBIKON) na koncích upevněn na osazované hřídel. Věncem má skříňový průřez.

Uložení korečků na věncem je dle tělesa kola v.č. 0-02-1773 KSK, tedy na čepech.

Uložení kola na hřídel je principiálně shodné s uložením kola dle č.v. 2-01-4154 (KSK).

Větší kužel disku kola plní ještě funkci dopadové a vynášecí plochy pro těžný materiál. Proti abrazi je chráněn obkladem z plechů HARDOX 400 tloušťky 5 mm.

Nosné kužele a věncem jsou svařeny z oceli třídy S355 J2 G3, náboj centrálního kola je odlit z ocelolitiny 42 2709.6, hřídel je vykován z oceli třídy 16 431.2, korečky jsou zhotoveny z ocelolitiny 42 2712.5 a z válcovaného materiálu třídy 11 503 a 11 600.

Nosná konstrukce je zařazena do výrobní skupiny "A" dle ČSN 73 2601-88 „Provádění ocelových konstrukcí“.

Hlavní parametry kola s hřídelem:

• průměr kola s korečky	D_k	12750 mm
• průměr disku kola	D_d	10400 mm
• počet korečků	z_k	15
• počet otáček kola	n_k	3 - 5.6 1.min ⁻¹
• obvodová rychlost	v_k	2 - 3.7 m.s ⁻¹
• objem výsypu	V_f	1000 dm ³

• teoretická výkonnost nakypřené horniny	Q_{th}	7390 m ³ .h ⁻¹
• výkon motorů kola	P_{ck}	4x400 kW
• minimální obvodová síla na kolese	P_{min}	428 kN
• jmenovitá obvodová síla na kolese	P_{jm}	486 kN
• maximální obvodová síla na kolese	P_{max}	800 kN
• délka hřídele mezi ložisky		7500 mm
• max. průměr hřídele		720 mm
• průměr hřídele v ložiskách		500 mm

Použitá dokumentace

- ČSN 27 7008-89 „Navrhování ocelových konstrukcí rýpadel a zakladačů“
- ČSN 73 1401-98 „Navrhování ocelových konstrukcí“
- ČSN 73 2601-88 „Provádění ocelových konstrukcí“
- [1] Prof. J. Studnička „Ocelové konstrukce I“, skriptum ČVUT 1996
- [2] Prof. Bittnar a kol. „Výpočty štíhlých konstrukcí MKP“, ČVUT 1997
- [5] SR&AC manuál programu COSMOS/M

KSK - „Pevnostní výpočet hřídele a stanovení průhybu osy kola KU800“
v.č. 4-00-20663

Výkresová dokumentace ke hřídeli a kolesu :

výkres č. 2-01-4154 Uložení osy kola
výkres č. 243-734-01-B Periferní převodovka
výkres č. 243-734-02-A Pohon kola
výkres č. 0-RK8-9649 "Návrh jednostěnného kola"

Postup výpočtu

- a) vytvoření geometrického modelu konstrukce
- a) stanovení uložení ocelové konstrukce
- c) stanovení jednotlivých zatěžovacích stavů OK a jejich kombinací
- d) výpočet vnitřních sil podle teorie 1. řádu (lineární statika)
- e) kontrola únosnosti a použitelnosti OK

Geometrie a podepření

Výpočtový model sestává z kola, jeho hřídele a centrálního kola převodovky. Kolo je po obvodě fixováno proti rotaci. To umožní přiblížení modelu reálnému přenosu zatížení z korečků na koleso. Hřídel je podepřen v místech uložení ložisek do konstrukce výložníku. Vzdálenost podpěr 7500 mm. Uložení je kloubové. Hřídel a centrální kolo jsou modelovány z objemových prvků typu TETRA4 (čtyřstěn), oba kuželové disky kola, věnec a korečky jsou modelovány z plošných skořepinových

prvků typu Shell3T (trojúhelníky), korečky jsou do věnce začepovány pomocí prutových prvků typu Beam3D (nosníkový prvek). Model viz přiložené obrázky.

Velikost modelu v měřítku metody konečných prvků

- 180 000 prvků
- 70 000 uzlů
- 359 723 rovnic k řešení

Zatížení nosné ocelové konstrukce

Zatížení OK je konstruováno v souladu s ČSN 73 0035-86 a ČSN 73 7008-89. V základním členění se zatížení dělí na zatížení stálé vlastní tíhou OK a strojních a elektro skupin (vybavení, technologie) a zatížení nahodilé. To je tvořeno zatížením užitným (rypné síly, materiál apod.), klimatickým (vítr) a ostatním (např. náhodná osamělá síla).

Výsledné zatížení OK je dáno kombinací jednotlivých druhů zatížení a jejich položek. Přehled vytvořených kombinací zatížení včetně jejich členění a součinitelů kombinace ϕ_c je uveden dále.

Zatěžovací stavy a jejich kombinace (LCComb):

- extrémní 51, 52
- kritické 56, 57
- mimořádné 60

L - síly na levý břit korečku ze strany pohonu

P - síly na pravý břit korečku ze strany násypky

Zatěž. Stav č.	Zatížení	LCC 51 Extrémní L	LCC 52 Extrémní P	LCC 56 Kritický L	LCC 57 kritický P	LCC 60 mimoř. Prov.
1	Vlastní tíha OK	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
2	Rypné síly zprava	2,25		1,22		
3	Rypné síly zleva		2,25		1,22	
4	Materiál na pase	1,25	1,25	1,25	1,25	
5	Vlastní tíha technologie	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
6	Materiál na skluzu	1,25	1,25	1,25	1,25	
7	Vlastní tíha obložení disk	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
8	Síly v ozubení	1,13	1,13	1,22	1,22	
9	Předpětí na dobiconech	1	1	1	1	1
10	Zatížení podepřením kol.					1,1

Vlastní tíha ocelové konstrukce

Zatížení generuje program automaticky ≈ 672 kN

Vlastní tíha technologie a vybavení

Převzato z práce „Pevnostní výpočet hřídele a stanovení průhybu osy kola KU800“

- korečky 9,2.15 = 138 kN
- násypka 98,10 kN
- část pasového výložníku 68,67 kN

- pohon 750,47 kN
- kryt pohonu 29,43 kN

Materiál v rypném orgánu

Je zahrnuto v rypné síle.

Materiál nalepený v kolese

Působí na věnci kola. Činí 37 kN.

Materiál na skluzu

Působí v místě násypky (36 kN) a na části disku kola v oblasti násypky (18kN).

Materiál na páse

Činí 29.43 kN.

Hodnoty zatížení materiálem jsou převzaty z práce „Pevnostní výpočet hřídele a stanovení průhybu osy kola KU800“ archivní č. 4-00-20663.

Rypné síly

Součinitel spolehlivosti zatížení... $\gamma_{fR} = 2.25$

Jmenovité hodnoty rypné síly jsou stanoveny z výkonu pohonu kola 4x400kW.

Otáčky kola	3 min ⁻¹	4.9 min ⁻¹	5.6 min ⁻¹
Obvodová složka rypné síly	800 kN	486 kN	428 kN
Boční složka rypné síly	400 kN	243 kN	214 kN
Radiální složka rypné síly	800 kN	486 kN	428 kN

Rozdělení síly na korečky v záběru

1. koreček 73 %

2. koreček 27 %

Vzhledem k nastavení omezovače obvodové síly je ve výpočtu použita hodnota obvodové síly 486 kN.

Síly působí na poloměru $R = 6375 \text{ mm}$.

Statické zatížení bočním větrem. Zatížení se zanedbává.

Zatížení silami v ozubení

Síly v ozubení, které zatěžují hřídel kola, jsou převzaty z práce „Pevnostní výpočet hřídele a stanovení průhybu osy kola rýpadla KU800“ archivní č. 4-00-20663.

Vodorovná síla		$F_x = 2308 \text{ kN}$	pro max. obvodovou sílu
		$F_x = 1402 \text{ kN}$	pro jmenovitou obvodovou sílu
Svislá síla		$F_y = 152 \text{ kN}$	pro max. obvodovou sílu
		$F_y = 92 \text{ kN}$	pro jmenovitou obvodovou sílu

Síly jsou přes náboj kola přenášeny na hřídel a působí v místech styku náboje s hřídelem – kroužky Dobicon.

Zatížení podepřením kola za provozu

Zatížení osy kola v místě uložení kola silou 3223 kN směrem vzhůru.

Součinitel spolehlivosti zatížení $\gamma_f = 1.1$.

Kontrola únosnosti

Program COSMOS/M umožňuje získat hodnoty efektivního napětí v modelové konstrukci dle teorie HMM (von Mises). Proto jsou podmínky pevnosti dle ČSN 73 1401-98 aplikovány způsobem dále uvedeným. To umožní přímé vyhodnocení výsledků FEM analýzy přímo v programu COSMOS/M.

Pro kuželové stěny disku kola platí podmínka

$$\sigma_{ef} \leq f_y / \gamma_{M0} = 308 \text{ MPa}$$

a současně $\sigma_{ef} \leq f_u / 1.6 / \gamma_{M0} = 276 \text{ MPa}$

kde

$$\sigma_{ef} = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3\tau^2)}$$

σ_x, σ_y normálové napětí ve stěně kola

τ smykové napětí ve stěně kola

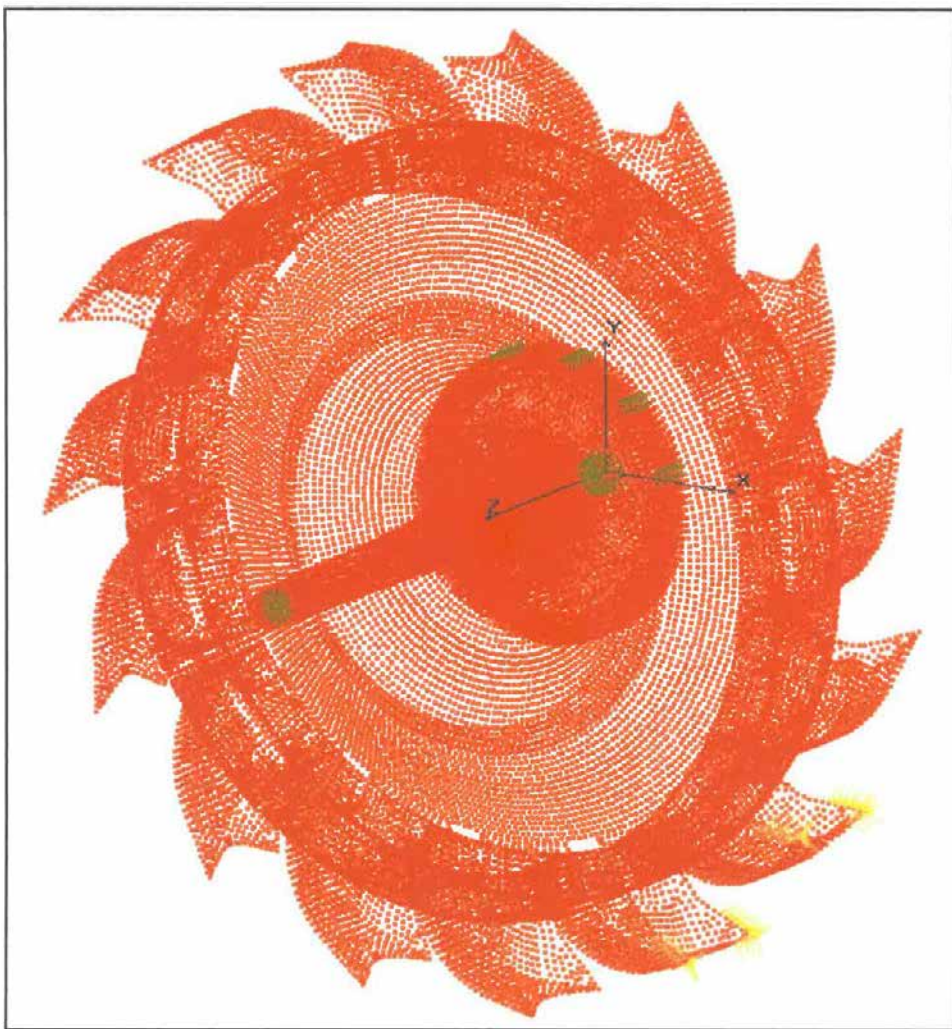
Pro tupé svary kuželové stěny disku kola platí podmínka (po zjednodušení pro potřeby FEM analýzy a statický výpočet)

$$\sigma_{ef} \leq \gamma_r \cdot f_y / \gamma_{M0} = 215 \div 308 \text{ MPa}$$

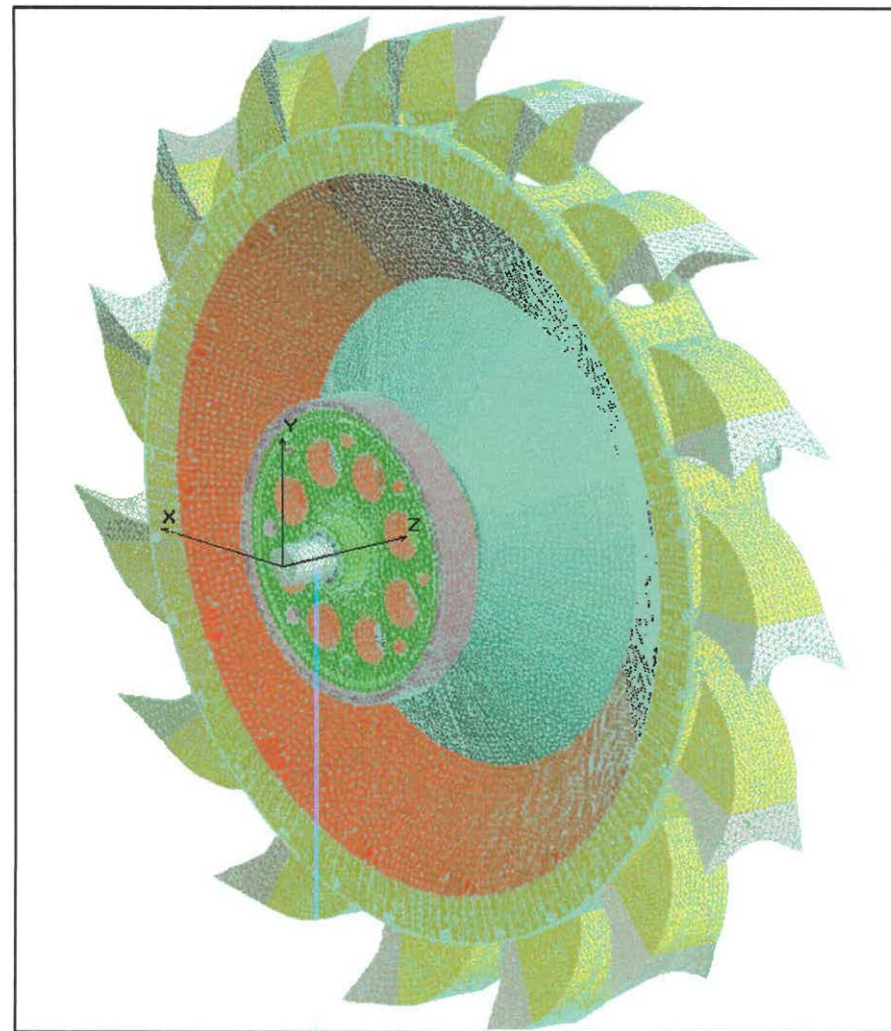
a současně $\sigma_{ef} \leq \gamma_r \cdot f_u / 1.6 / \gamma_{M0} = 193 \div 276 \text{ MPa}$

kde

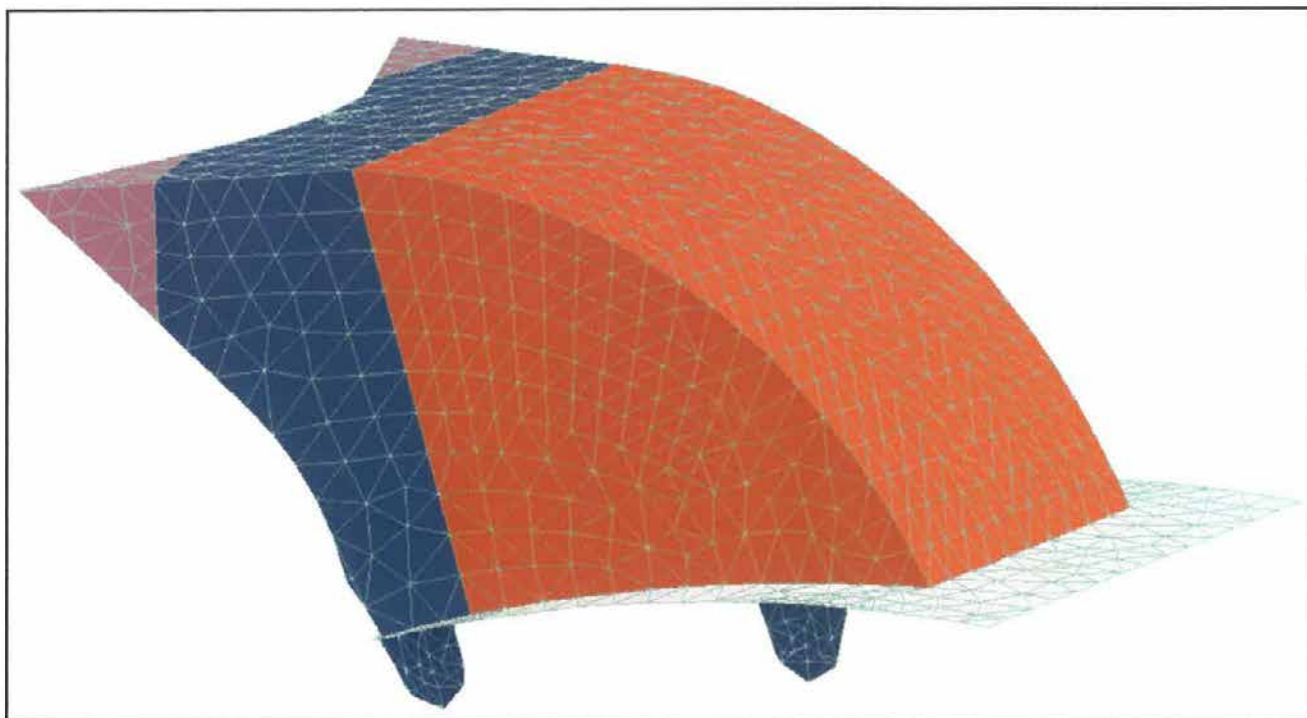
$$\sigma_{ef} = \sqrt{(\sigma_\perp^2 + \sigma_\parallel^2 - \sigma_\perp \cdot \sigma_\parallel + 3\tau^2)}$$



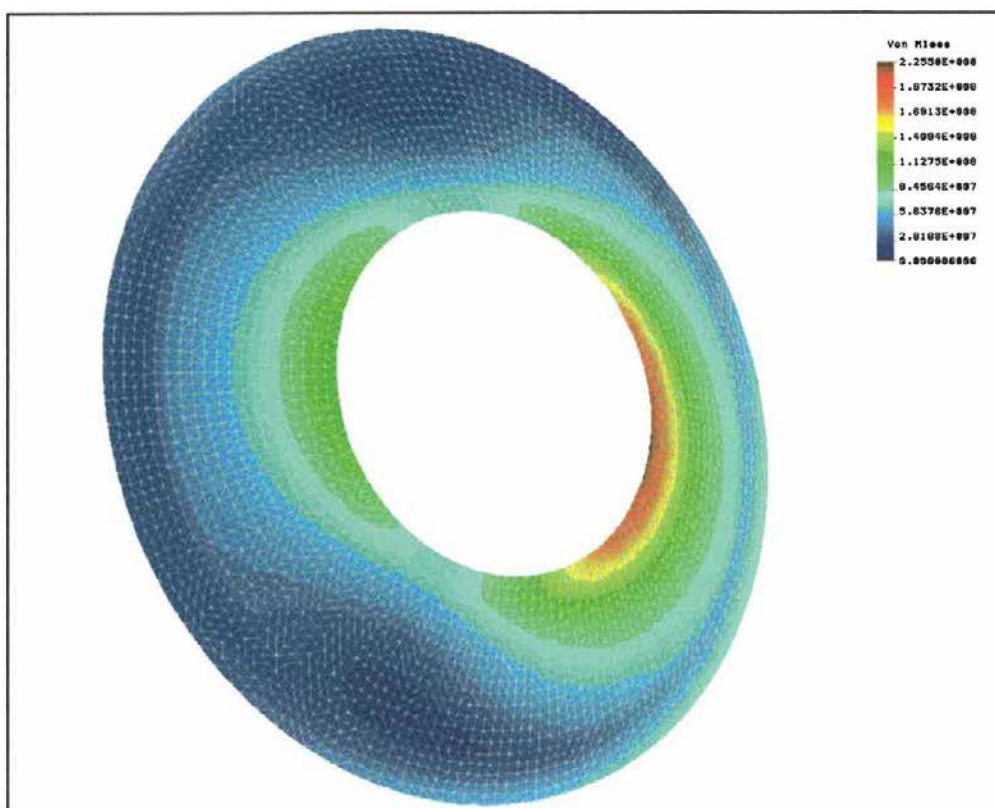
Obr. 1 Zatížení rypnými silami



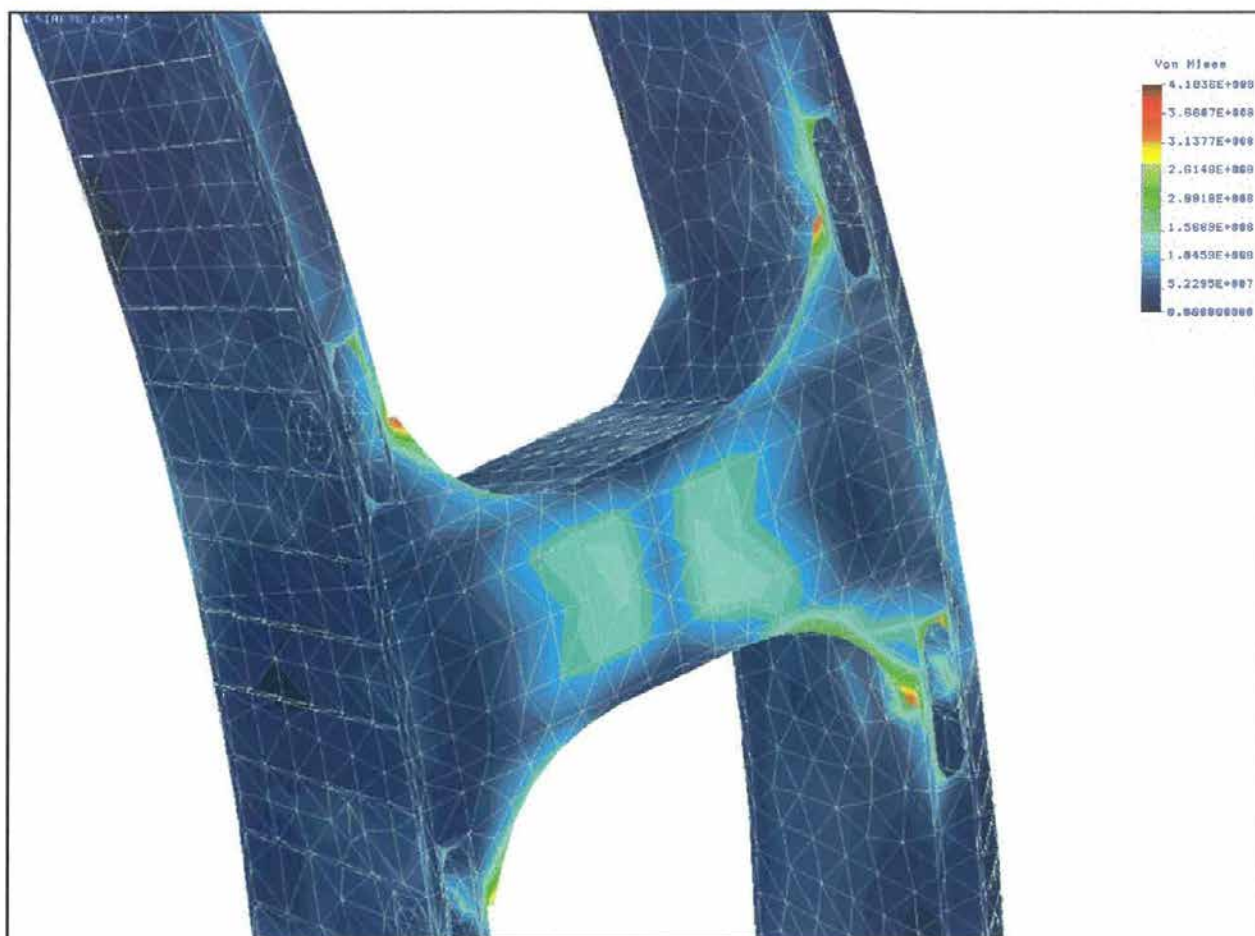
Obr. 2 Pohled na model kola s ozubeným kolem



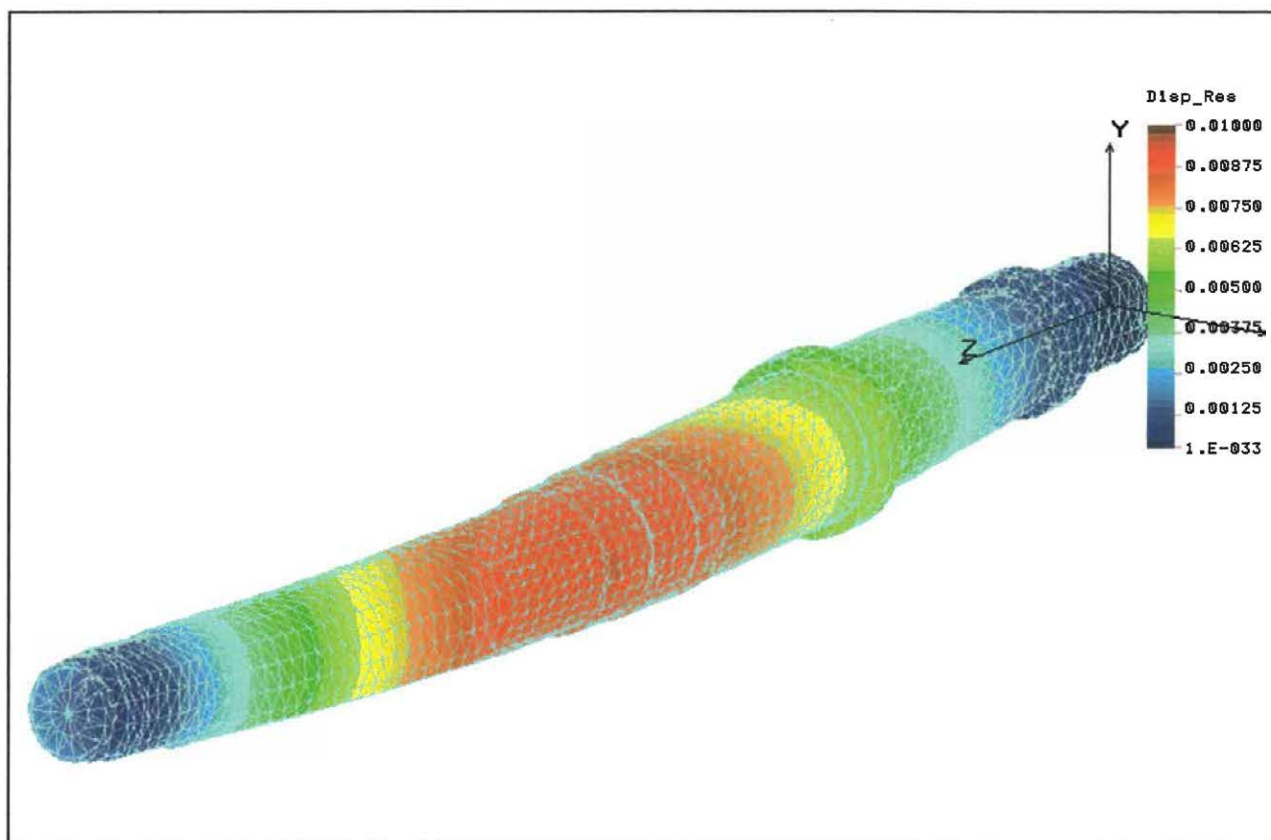
Obr. 3 Síť konečných prvků korečku



Obr. 4 Napětí spodního kužele tělesa kola



Obr. 5 Napětí věnce tělesa kola



Obr. 6 Deformace hřídele kola

a $\gamma_r = 0,7 \div 1$ dle požadavku na kvalitu provedení svaru.:

$\gamma_r = 1,00$ pro svary klasif. stupně 1 a 2 dle ČSN 05 1305 $\sigma_{ef} \leq 276 \text{ MPa}$

$\gamma_r = 0,85$ pro svary s plným průvarem, nekontrolované $\sigma_{ef} \leq 234 \text{ MPa}$

$\gamma_r = 0,70$ pro svary tupé jednostranné bez kontroly $\sigma_{ef} \leq 193 \text{ MPa}$

Charakteristická hodnota obvodové rypné síly je při použití omezovače uvažována hodnotou 900 kN s tolerancí omezovače 22 %, tj. maximální obvodová rypná síla má hodnotu 1100 kN.

Výsledky výpočtu jsou graficky znázorněny formou izoploch napětí na přiložených obrázcích. Z nich vyplývá, že konstrukce kola je nejvíce namáhána při působení rypných sil zprava – kombinace zatížení LCC56. Pro potřeby příspěvku jsou dále uvedeny jen některé části konstrukce a lze pro ně konstatovat:

Hřídel – srovnávací napětí σ_{ef} [MPa] nepřekročí hodnotu 150 MPa. Pouze oblast styku kroužku Dobicon na průměru 720 mm vykazuje lokální napětí až 200 MPa.

Výpočtová pevnost materiálu hřídele:

$$f_{Rd} = f_y / \gamma_{Mo} = 569 / 1,15 = 494 \text{ MPa}$$

Hřídel z hlediska únosnosti vyhovuje.

Vnitřní kužel stěny kola - srovnávací napětí σ_{ef} [MPa] dosahuje hodnoty 226 MPa v oblasti těsně nad spojem stěny tloušťky 20 mm se střední přírubou pro upevnění kola na hřídel.

Výpočtová pevnost materiálu stěny kužele:

$$f_{Rd} = f_y / \gamma_{Mo} = 355 / 1,15 = 308 \text{ MPa}$$

Vnitřní kužel stěny kola z hlediska únosnosti vyhoví.

Vnější kužel stěny kola - srovnávací napětí σ_{ef} [MPa] dosahuje hodnoty 125 MPa v oblasti těsně u spojení stěny tloušťky 20 mm s věncem kola poblíž korečků, které jsou právě v záběru.

Výpočtová pevnost materiálu stěny kužele:

$$f_{Rd} = f_y / \gamma_{Mo} = 355 / 1,15 = 308 \text{ MPa}$$

Vnější kužel stěny kola z hlediska únosnosti vyhoví.

Věncí kola - srovnávací napětí σ_{ef} [MPa] dosahuje hodnoty až 410 MPa v oblasti na vnějším obvodu poblíž začepování korečků, které jsou právě v záběru. Toto lokální napětí rychle klesá v okolí cca 100 mm na hodnoty pod 200 MPa.

Výpočtová pevnost materiálu stěny věnce:

$$f_{Rd} = f_y / \gamma_{Mo} = 355 / 1,15 = 308 \text{ MPa}$$

Věncí kola z hlediska únosnosti vyhoví.

Kontrola použitelnosti

Při kontrole použitelnosti se ověřuje vliv deformace tvaru konstrukce na funkčnost v souladu s ČSN 73 1401-98 „Navrhování ocelových konstrukcí“. Pro OK kola jsou podstatné dvě deformační podmínky:

- deformovaná stěna kola nesmí přijít do kontaktu s otěrovým prstencem kola, tj. deformace ve směru osy kola na úrovni spoje obou kuželů nepřekročí hodnotu 50mm
- průhyb hřídele v oblasti upevňovacích kroužků Dobicon nesmí přesáhnout hodnotu 10mm

Výsledky výpočtu jsou graficky znázorněny formou izoploch deformace na vybraných příložených obrázcích. Z nich vyplývá, že konstrukce kola je nejvíce deformována při působení rypných sil zleva – kombinace zatížení LCC57. Pro jednotlivé části konstrukce kola lze konstatovat:

Kuželové stěny kola Maximální deformace diskové plochy kola činí 34 mm ve směru osy kola při působení rypných sil zleva. Deformace vyhovuje výše uvedeným kritériím.

Věncí kola Maximální celková deformace věnce kola činí 64 mm při působení rypných sil zleva.

Osa kola – hřídel Maximální průhyb hřídele činí 6,3 mm ve vzdálenosti 3540 mm až 4420 mm od ložiska na straně pohonu pro rypné síly působící zleva.

Průhyb pod kroužky DOBIKON	pod kolem Ø720mm	max. 3,9 mm
	u ložiska Ø540mm	max. 1,0 mm