

Posouzení 3D modelu zubu 2673 a ESCO Super V39VYH

Ing. Vlastimil Moni, Ph.D., Ing. Petr Klouda, Ing. Tomáš Miletič

Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a.s., Most; moni@vuhu.cz

Přijato: 7. 1. 2019, recenzováno: 8. a 11. 2. 2019

Abstrakt

Obsahem předmětného článku je popis první části analýzy pevnosti a použitelnosti 3D návrhů zubů č.v. 2673 a ESCO Super V39VYH metodou konečných prvků, realizované v rámci projektu, který řeší výzkum optimalizace tvarů a především materiálů použitých při výrobě řezných orgánů zemních a dobývacích strojů v závislosti na těžebních podmínkách s využitím nejmodernějších poznatků z oblasti materiálového inženýrství a metalurgie, kryogeniky a nanotechnologií za účelem zvýšení efektivity rozpojovacího procesu a životnosti předmětného klíčového uzlu zemních a dobývacích strojů.

Assessment of the 3D model of the tooth 2673 and ESCO Super V39VYH

The article describes the first part of the analysis of the strength and applicability of 3D designs of teeth PN 2673 and ESCO Super V39VYH using the finite element method realized in the framework of the project. The project addresses the optimization research of the shapes and the materials used in the production of particular cutting elements of mining and ground machinery depending on mining conditions using the latest knowledge in the field of material engineering and metallurgy, cryogenics and nanotechnology to improve the efficiency of the cutting process and the lifetime of this key node of the earth moving and mining machinery.

Die Bewertung des 3D-Modells des Zahnes 2673 und ESCO Super V39VYH

Der vorgelegte Artikel beschreibt die ersten Teile der Festigkeitsanalyse und der Einsatzfähigkeit der 3D-Modelle von Zahnen der Zeichnungsnummer 2673 und ESCO Super V39VYH mithilfe der Methode der finiten Elementen, die im Rahmen des Projektes umgesetzt wurden, das sich mit der Untersuchung der Formgestaltung-Optimierung und insbesondere mit der Materialien-Optimierung befasst, die bei der Herstellung der Schneidorgane von Erd- und Gewinnungsgeräten in Abhängigkeit von Gewinnungsbedingungen eingesetzt wurden unter Nutzung von neuesten Kenntnissen aus dem Gebiet Materialengineering und Metallurgie, Kryogenik und Nanotechnologien mit dem Ziel, die Effektivität des Löseprozesses und der Lebensdauer des gegebenen Kernknotens der Erd- und Gewinnungsgeräte zu verbessern.

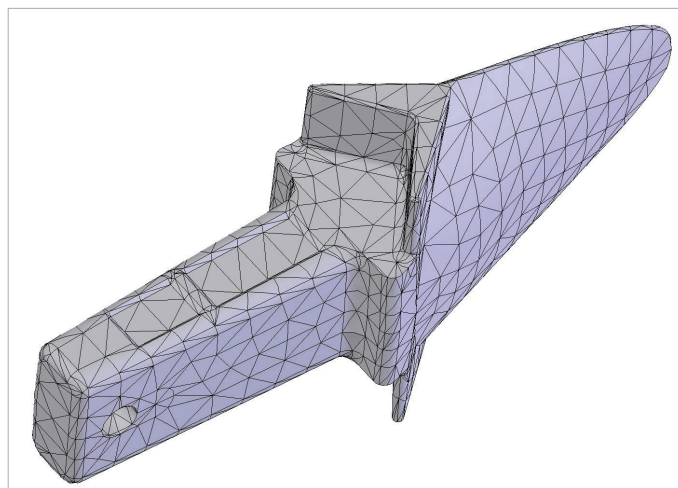
Klíčová slova: 3D model, zub, koreček, životnost, dobývací orgán, dobývací stroje.

Keywords: 3D model, tooth, bucket, lifetime, cutting element, mining machines.

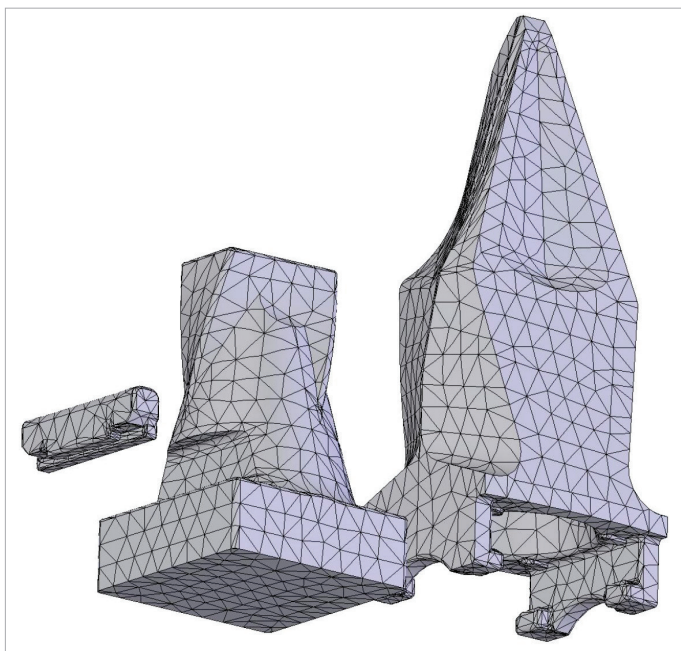
1 Úvod

Koleso rýpadla a geometrie řezných orgánů jsou determinujícími prvky dobývacího stroje, který je v interakci s rozpojovanou horninou. Rozhodující vliv na efektivnost a výkonnost dobývacích procesů kolesových rýpadel má tvar a geometrie břitů korečků, tvar a geometrie předsunutých zubů a materiál břitů a zubů. V rámci řešení projektu č. TH03020368 z programu EPSILON agentury TA ČR s názvem „Výzkum optimalizace tvaru a materiálu řezných orgánů zemních a dobývacích strojů“ se očekává prodloužení doby technického života rozpojovacího orgánu dobývacích a zemních strojů, t.j. zvýšení doby do nutné obměny. Proto paralelně s výzkumem v oblasti materiálového inženýrství a metalurgie, popřípadě hledáním optimálního postupu tepelného nebo chemicko-tepelného zpracování s nejvyšší možnou odolností proti opotřebení již sériově vyráběných zubů, probíhá i výzkum optimalizace tvaru. Cílem je na základě pevnostní analýzy (výpočtu) 3D návrhů zubů používaných v ČR [1,2,3] nalézt nejvhodnější geometrii zubu s ohledem na použitelnost a únosnost navržené ocelové konstrukce zubů. V článku je uvedeno stručné porovnání dvou nejvíce používaných zubů. V realizovaných výpočtech je použita metoda mezních stavů dle ČSN 73 0031 a samotný postup výpočtů se skládal z těchto dílčích etap:

- vytvoření geometrických modelů zubů č.v. 2673 a ESCO Super V39VYH
- stanovení uložení - okrajové podmínky modelů
- stanovení jednotlivých zatěžovacích stavů a jejich kombinací
- výpočet vnitřních sil
- kontrola únosnosti a použitelnosti.



Obr. 1: Model zubu č.v. 2673 se sítí konečných



Obr. 2: Rozložený model zubu ESCO se sítí konečných

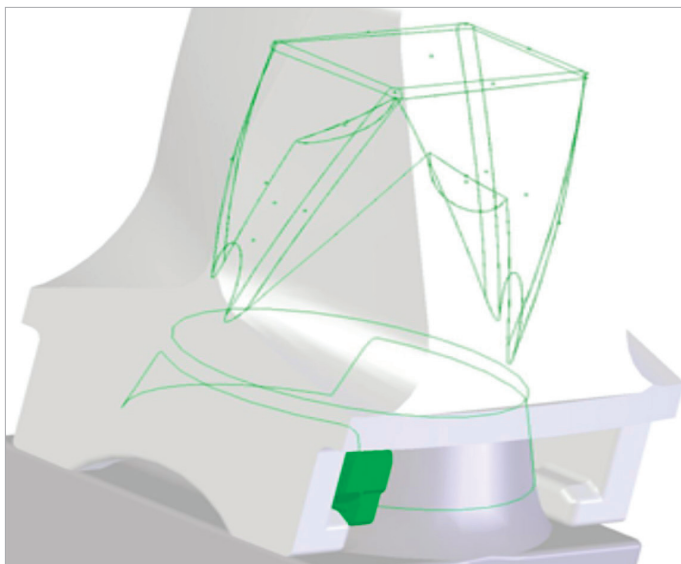
2 Výpočtový model - Geometrie

Rozměry a tvar prostorových výpočtetních modelů byly převzaty z modelů vytvořených v programu AutoDesk Inventor v12. Na modelech byla vytvořena síť konečných objemových prvků typu TETRA10 o nominální velikosti 9,7 mm s lokálním zjemněním sítě ve stykových plochách zubu s nožem (č.v. 2673) a o nominální velikosti 13,42 mm s lokálním zjemněním sítě ve stykových plochách adaptéru, korunky a pera u modelu ESCO.

Koreček je v takové poloze čelního úhlu kola, že spojnice špičky bříty zubu se středem otáčení kola svírá se svislicí úhel 90°.

3 Stanovení uložení

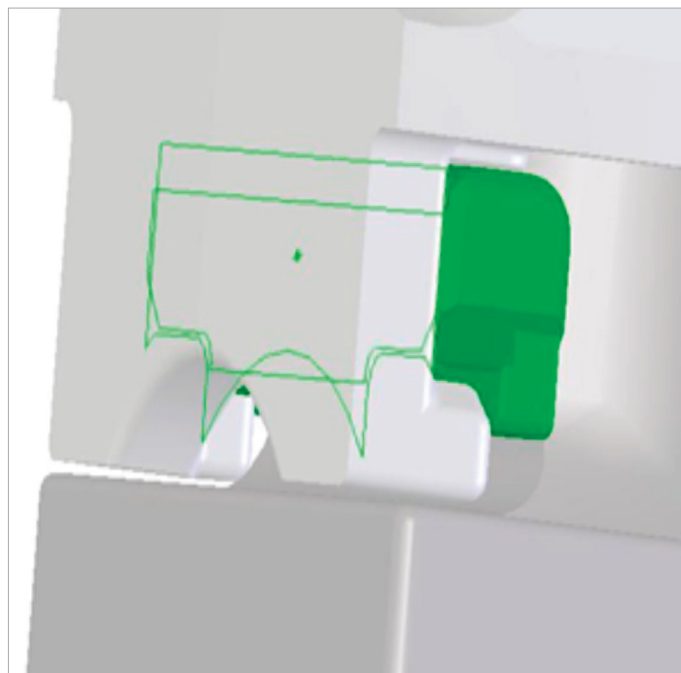
Na následujících obrázcích jsou nalezené kontaktní plochy zubu ESCO Super V39VYH (ohrazení zelenými čarami).



Obr. 3: Kontaktní plochy mezi korunkou a adaptérem ESCO Super V39VYH.



Obr. 4: Kontaktní plochy mezi korunkou a perem a mezi perem a adaptérem ESCO Super V39VYH.



Obr. 5: Kontaktní plochy mezi korunkou a perem ESCO Super V39VYH.

4 Zatížení zubů

Zatížení zubu odvisí od zatížení korečku, které je konstruováno v souladu s ČSN 73 7008. V základním členění se zatížení dělí na zatížení stálé vlastní tíhou a zatížení nahodilé. Výsledné zatížení je dáno kombinací jednotlivých druhů zatížení a jejich položek. Přehled vytvořených kombinací zatížení včetně jejich členění je uveden dále [4,5].

Zatížení stálé:

Sa) vlastní tíha zubu.

Zatížení nahodilé:

- Na) rozpojovacími silami
- Nb) odstředivou silou vlastní hmoty zubu
- Nc) materiálem v korečku
- Nd) odstředivou silou materiálu v korečku
- Ne) bočním nárazem kola
- Nf) podepřením kola.

Vlastní tíha zubu

Součinitel spolehlivosti zatížení je $\gamma_G = 1,1$. Zatížení generuje program automaticky pro tíhové zrychlení $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$. V řešeném problému se uplatní pouze vlastní tíha zubu a příslušné části nože. Vlastní tíha zubu č.v. 2673 je $G_z = 118 \text{ N}$ a zubu ESCO $G_z = 98,875 + 85,739 + 2,786 = 187,4 \text{ N}$ (korunka, adaptér a pero).

Zatížení nahodilé

Součinitel spolehlivosti zatížení $\gamma_{QR} = 2,2$ snížen na hodnotu 1,6 s ohledem na nastavení pojistného zařízení. Maximální rozpojovací síla na kolese u zubu č.v. 2673 $F_{\max} = 740 \text{ kN}$, maximální rozpojovací síla na kolese $F_{\max} = 896 \text{ kN}$ u zubu ESCO.

Směrování zubů na korečku v normálové rovině korečku je patrné z obrázků č. 6 a 7.

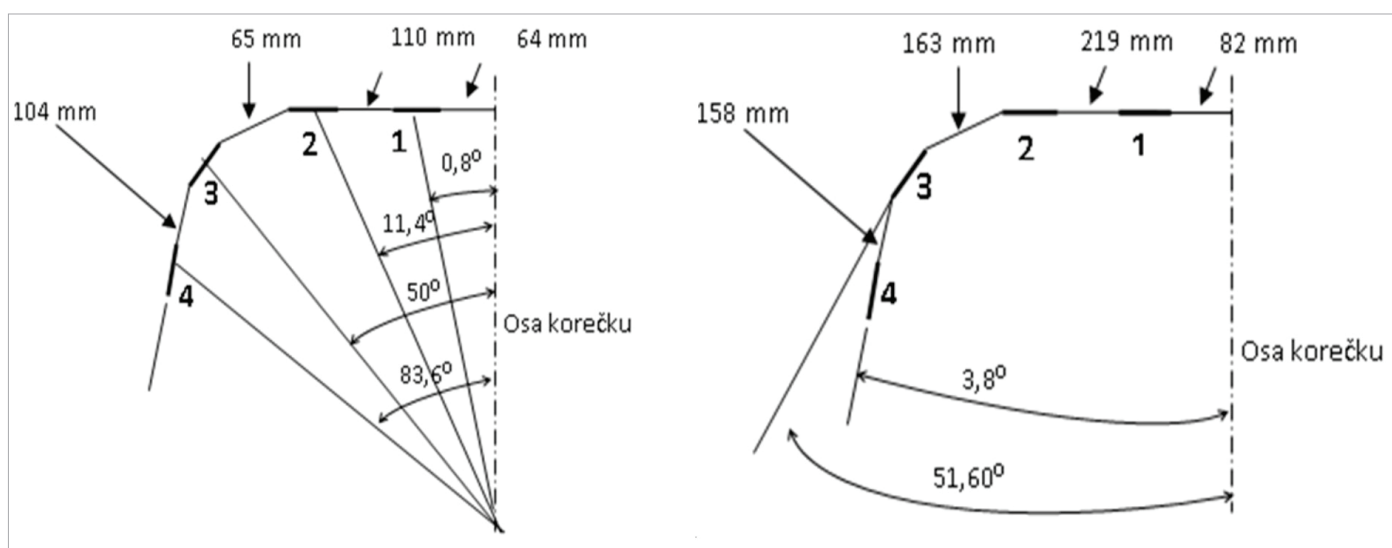
5 Výsledky výpočtu

Výpočet byl proveden lineární statikou pro všechny zatěžovací stavy P, MM a U zvlášť, přičemž zatěžovací stavy P, MM a U jsou:

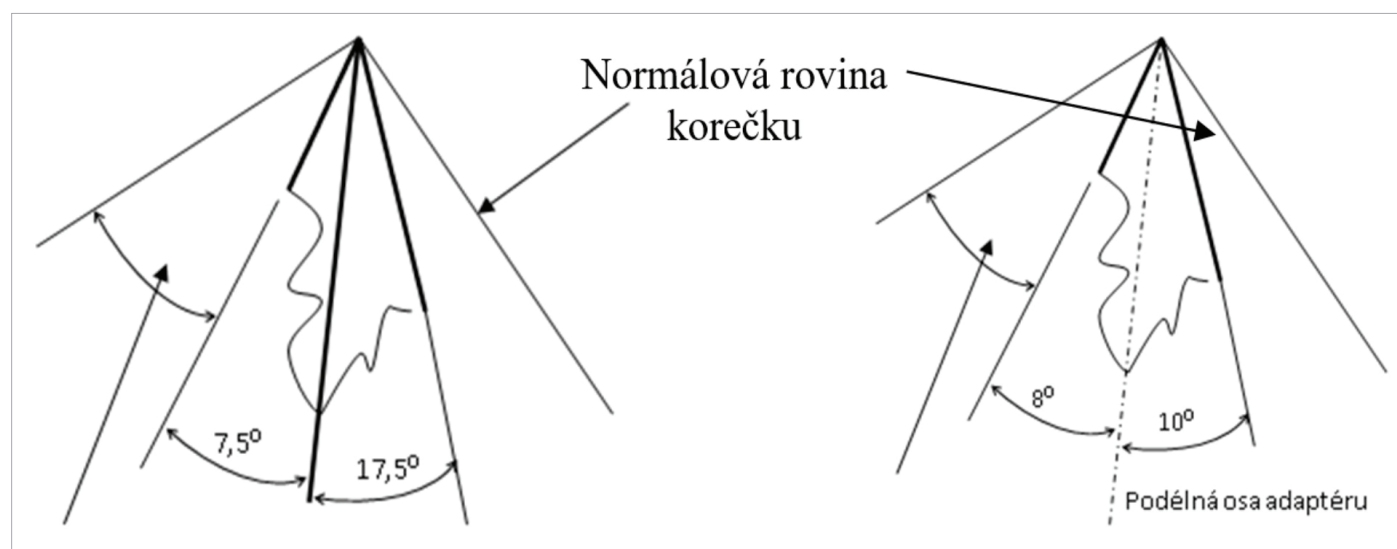
- P - Provoz – lávkování
- Provoz - spouštění
- MM - Boční náraz
- Podepření rýpacího orgánu
- U - Únava 6 - lávkování
- Únava 6 - spouštění.

Maximální namáhání bylo nalezeno pro zatěžovací stav „Provoz - lávkování“.

Maximální efektivní napětí [MPa] prvků modelů pro spočtené kombinace zatížení uvádí tabulky 1 a 2. V závorkách jsou uvedeny lokální hodnoty.



Obr. 6: Směrování zubu č.v. 2673 a zubu ESCO na korečku.



Obr. 7: Ostří zubu s úhlem hřbetu č.v. 2673 a zubu ESCO.

Tab. 1: Efektivní napětí [MPa] modelu zubu ESKO.

Skupina	Lávkování	Únava lávkování	Podepření
Korunka	1 100 ÷ 1 200 (≥ 1 600)	800 ÷ 900 (≥ 1 600)	1 200
Adaptér	900 ÷ 1 000 (≥ 1 600)	720 ÷ 800 (≥ 1 600)	770 ÷ 800
Pero	167 (357)	165 (254)	80 (290)

Tab. 2: Efektivní napětí [MPa] modelu zubu č.v. 2673.

Skupina	Lávkování	Únava lávkování	Podepření
Břit	440	336	≥ 1 500
Dřík	813	379	1 500
Komůrka	1 258	591	1 464 lokálně
Smykové napětí			
Skupina	Lávkování	Únava lávkování	Podepření
Dřík	-304	134	756

Ukázka rozložení efektivního napětí v modelu ESCO a č.v. 2673 při režimu „únava - lávkování“ je znázorněno na obrázku č. 8.

Ukázka rozložení efektivního a smykového napětí v modelu zubu při režimu podepření kola je znázorněno na obrázcích č. 9 a 10.

Vypočtené hodnoty deformací [mm] modelů zubů pro spočtené kombinace zatížení uvádí následující přehledné tabulky č. 3 a 4.

Ukázky tvarů deformací modelů zubů v režimu „Únava - lávkování“ zobrazuje obrázek č. 11.

6 Kontrola únosnosti

Při kontrole únosnosti se ověřuje splnění podmínek prosté pevnosti a stability tvaru v oblasti pružného působení v souladu

s ČSN 27 7008 „Navrhování ocelových konstrukcí rypadel, nakladačů a zakladačů“. Program umožňuje získat hodnoty efektivního napětí v modelové konstrukci dle teorie HMM (von Mises). Proto jsou podmínky pevnosti dle ČSN 27 7008 aplikovány způsobem dále uvedeným. To umožní přímé vyhodnocení výsledků FEM analýzy [8,9].

Pro korunku a adaptér (ESCO), resp. zub (č.v. 2673):

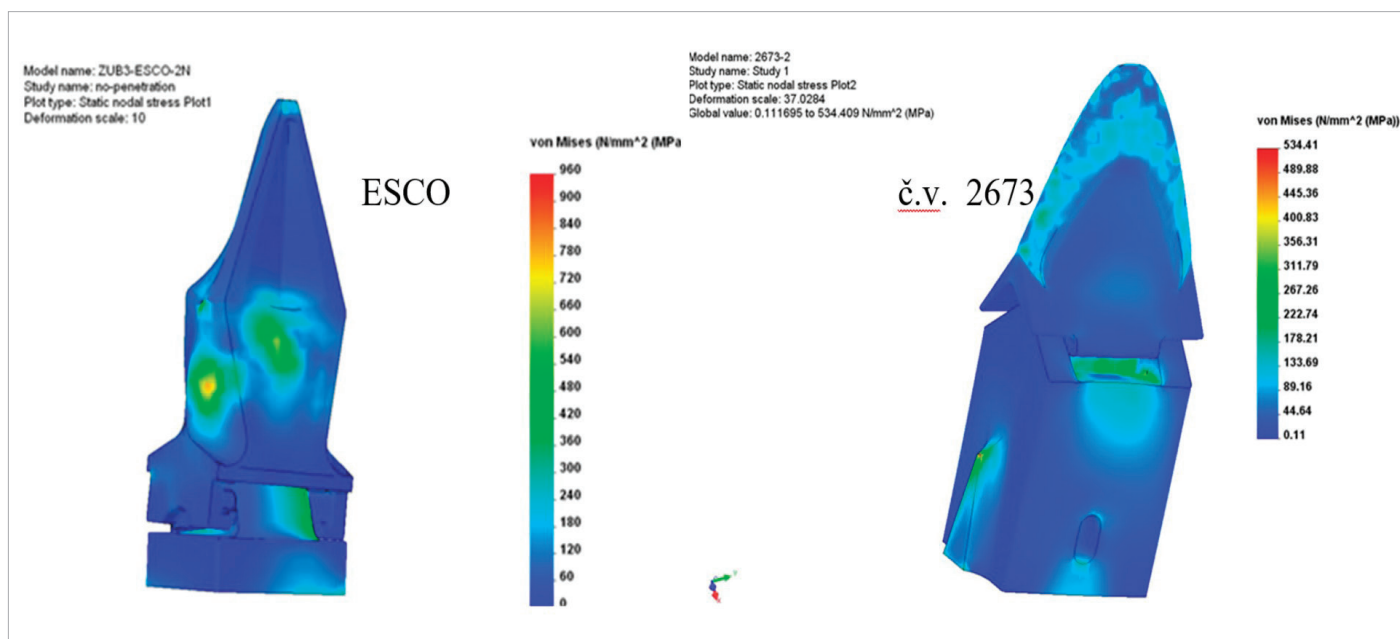
$$\sigma_{ef} \leq f_x / y_{Mo} = 950/1,15 = 826$$

$$\sigma_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}$$

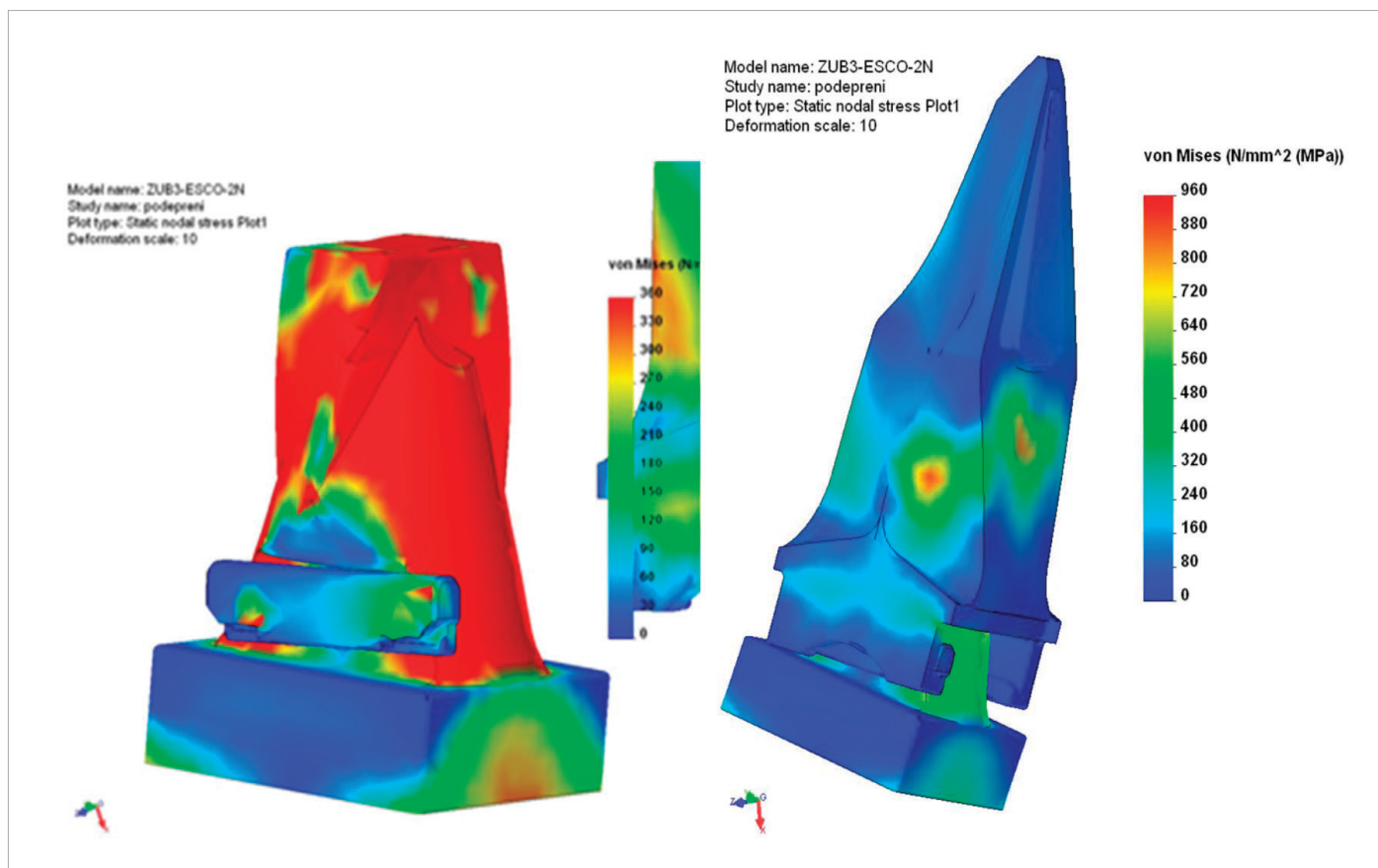
kde

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ normálové napětí v těle korunky

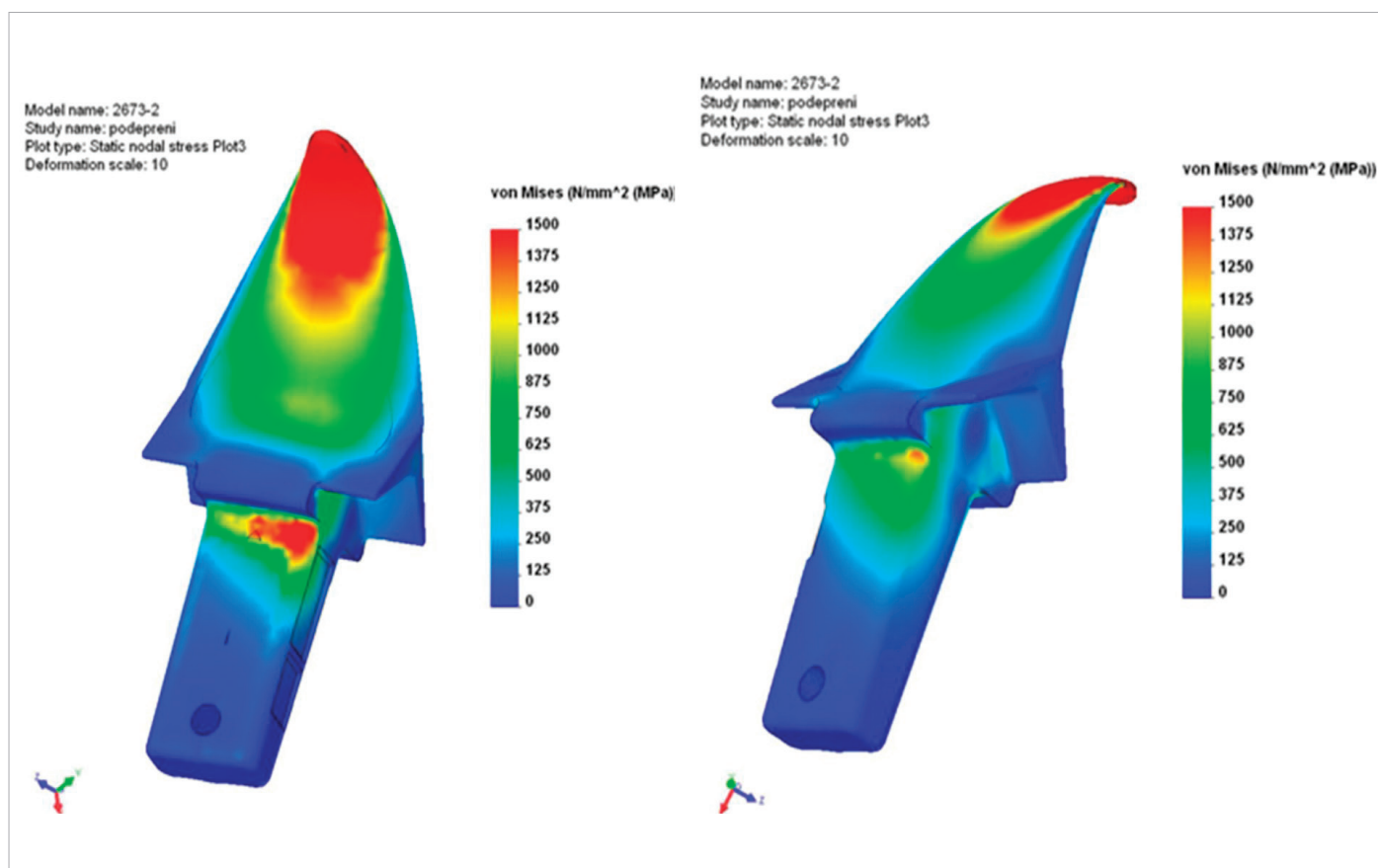
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ smykové napětí v těle korunky,



Obr. 8: Rozložení efektivního napětí v modelu ESCO a č.v. 2673.



Obr. 9: Rozložení efektivního a smykového napětí v modelu ESCO při režimu podepření kola.



Obr. 10: Rozložení efektivního a smykového napětí v modelu č.v. 2673 při režimu podepření kola.

Tab. 3: Deformace [mm] modelu zubu ESKO.

Skupina	Lávkování	Únava lávkování	Podepření
Korunka	2,2	1,8	3,67
Adaptér	0,96	0,7	0,96
Pero	0,10	0,07	0,16

Tab. 4: Deformace [mm] modelu zubu č.v. 2673.

Skupina	Lávkování	Únava lávkování	Podepření
Břit - špička	1,25	1,10	10,00
Břit - pata	0,33	0,28	0,83

Pro pero:

$$\sigma_{ef} \leq f_x / y_{MO} = 300/1,2 = 250 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}$$

kde

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ normálové napětí v těle pera

$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ smykové napětí v těle pera.

6.1 Výsledky modelu zubu ESCO pro režimy „provoz“ a „únava“

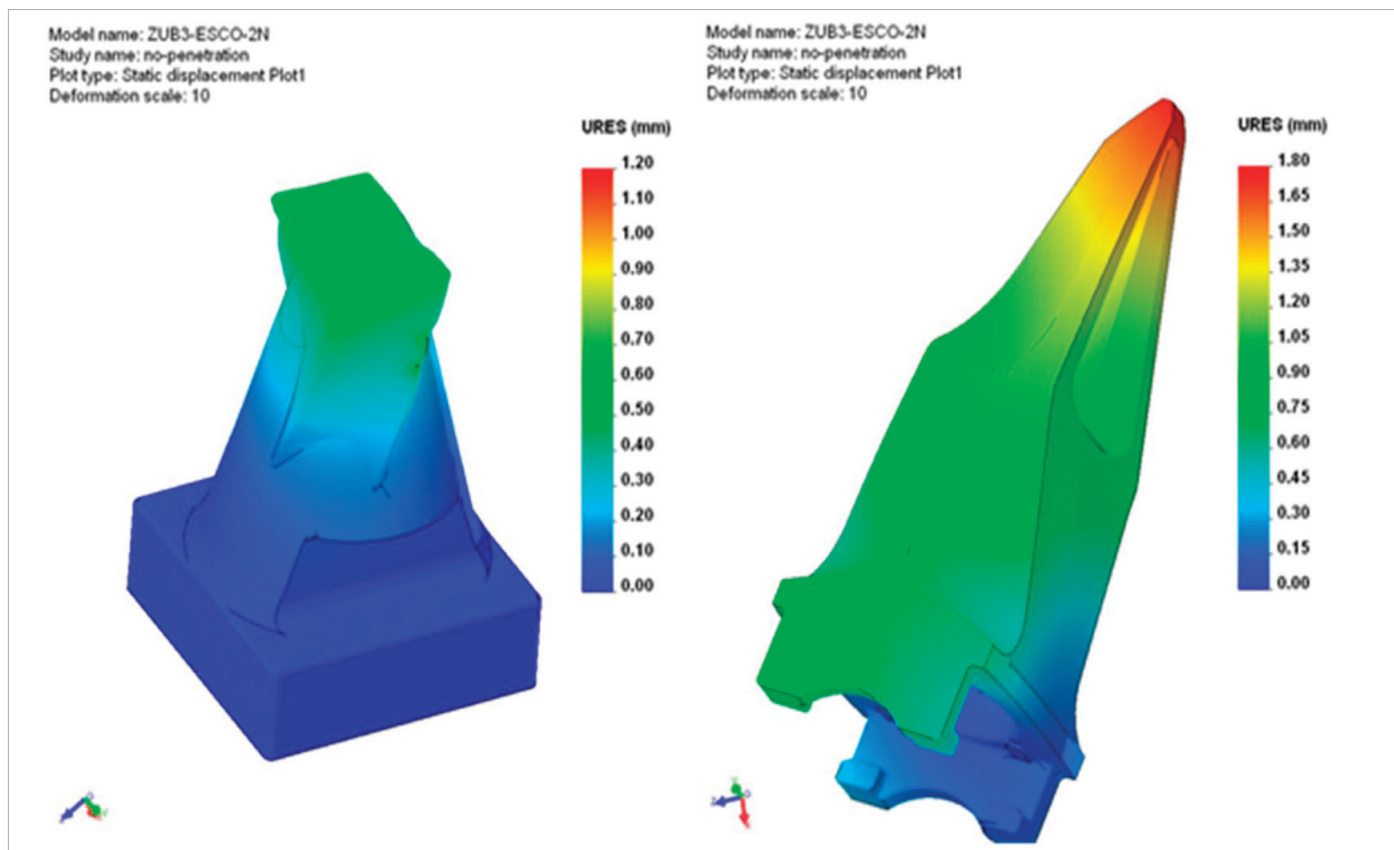
Korunka

K největšímu namáhání konstrukce korunky dochází při těžbě lávkováním. Z výsledků plyne, že srovnávací efektivní na-

pětí σ_{ef} [MPa] dosahuje hodnoty 1 200 MPa v otvoru pro adaptér, lokálně až 6200 MPa na kontaktních plochách s adaptérem a cca 780 MPa na povrchu korunky. Srovnávací efektivní napětí v otvoru pro adaptér překračuje limitní hodnotu 826 MPa o 45 % a hodnotu meze kluzu o 26 %. Mimo tato místa efektivní napětí nepřekračuje limitní hodnotu 826 MPa. V místech s hodnotami napětí nad mezí kluzu lze očekávat plastické deformace. To také potvrzují výsledky výpočtu deformace.

Adaptér

Největší napětí adaptéru je dosaženo na stykových plochách s korunkou. Jedná se o namáhání na otláčení – Hertzovy tlaky. Kontaktní napětí má zde hodnotu 900 až 1 000 MPa, lokálně až 4 670 MPa. Srovnávací efektivní napětí zde překračuje limitní hodnotu 826 MPa až o 21 % a hodnotu meze kluzu o 5 %. Mimo kontaktní plochy napětí nedosahuje výpočtové



Obr. 11: Deformace modelu zubu ESCO v režimu „Únava - lávkování“.

meze 826 MPa. V místech s hodnotami napětí nad mezí kluzu lze očekávat plastické deformace. To také potvrzují výsledky výpočtu deformace.

Pero

Napětí 167 MPa je pod limitní hodnotou. Napětí 357 MPa je dosaženo v tvarově kritickém rohu pera na velmi malé oblasti. Srovnávací efektivní napětí zde překračuje limitní hodnotu 250 MPa o 43 % a hodnotu meze kluzu o 19 %. V této oblasti lze očekávat plastickou deformaci.

Zub z hlediska prosté pevnosti vyhovuje, avšak na kontaktních plochách korunky s adaptérem lze očekávat trvalé plastické deformace. Čtyři oblasti s napětím nad mezí pevnosti jsou potenciálním zdrojem trhlin.

6.2 Výsledky modelu zubu č.v. 2673 pro režimy „provoz“ a „únava“

K největšímu namáhání konstrukce nože dochází při těžbě lávkováním. Z výsledků plyne, že srovnávací efektivní napětí σ_{ef} [MPa] dosahuje hodnoty 813 MPa v rádiu přechodu dříku do břitu a 440 MPa na špičce čelní plochy břitu zubu.

Srovnávací efektivní napětí σ_{ef} [MPa] tedy nepřekračuje limitní hodnotu 826 MPa.

Napětí 147 MPa je v přechodu zubu do otvoru pro čep. Jde o konstrukční prvek, který je v praxi u korečků běžně používán a úspěšně přežívá. Jedná se o namáhání na otláčení – Hertzovy tlaky. Kontaktní napětí dovolené má zde hodnotu 1 500 MPa. Zde zub vyhovuje.

7 Kontrola použitelnosti

Při kontrole použitelnosti se ověřuje vliv deformace tvaru zubu na funkčnost v souladu s článkem 7.3.1 ČSN 27 7008 „Navrhování ocelových konstrukcí rýpadel, nakladačů a zakladačů“.

Pro OK korečku je podstatná deformační podmínka:

Deformovaná část korečku nesmí přijít do kontaktu se strojními skupinami umístěnými v okolí kola, tj. deformace ve směru osy kola a ve směru radiálním nepřekročí hodnotu 30 mm. Uvažujeme-li maximální možnou deformaci korečku 10 mm, potom hodnota maximální možné deformace zubu činí 20 mm.

- Maximální celková deformace zubu ESCO činí „za provozu“ 2,2 mm a je dosažena při kombinaci zatížení „Provoz - lávkování“. Maximální celková deformace je dosažena při kombinaci zatížení „Podpření kola“ a činí 3,7 mm. Zub ESCO z hlediska použitelnosti vyhovuje.
- Maximální provozní celková deformace zubu č.v. 2673 činí 1,25 mm a je dosažena při kombinaci zatížení „Provoz - lávkování“. Zub č.v. 2673 z hlediska použitelnosti vyhovuje.

8 Závěr

Při pevnostní analýze zubu ESCO Super V39VYH a zubu č.v. 2673 bylo vypočteno namáhání a deformace navrhované upravené ocelové konstrukce předmětných zubů podle metody mezních stavů a v souladu s ČSN 27 7008 „Navrhování ocelových konstrukcí rýpadel, nakladačů a zakladačů“.

Výpočet byl proveden na dodaném 3D modelu zubu.

Okrajové podmínky výpočtu byly nastaveny v souladu s dodaným výkresem uložení zubů v korečku, resp. pevného upnutí adaptéru zubu k podložce v případě zubu ESCO.

Pevnostní analýza prokázala, že zjištěné hodnoty efektivního (srovnávacího) napětí jednotlivých částí ocelové konstrukce zubu č.v. 2673, resp. jednotlivých částí zubu ESCO (korunka, adaptér, pero), jsou pro extrémní hodnoty rypné síly na hranici výpočtové pevnosti materiálu a v případě zubu ESCO ji dokonce v kritických místech překračují.

Zuby z hlediska prosté pevnosti vyhovují, avšak na kontaktních plochách korunky s adaptérem zubu ESCO lze očekávat trvalé plastické deformace. Čtyři oblasti s napětím nad mezí pevnosti jsou potenciálním zdrojem trhlin. Tento výsledek je v souladu s doporučením výrobce zubu ESCO měnit adaptér po deseti výměnách korunky.

Funkční analýza prokázala, že navržená konstrukce zubů po stránce deformace vyhovuje.

Pevnostní analýza dodaných 3D modelů zubů ESCO a č.v. 2673 prokázala, že navržená konstrukce vyhovuje z hlediska prosté pevnosti pro těžbu materiálů, u nichž se předpokládá hodnota měrného rypného odporu do 180 kN.m⁻¹.

Poděkování

Príspevek vznikl za finanční podpory projektu TA ČR č. TH03020368 s názvem „Výzkum optimalizace tvaru a materiálu řezných orgánů zemních a dobývacích strojů“.

Literatura

- [1] ČSN 27 7013 - Kolesové rýpadla a nakladače, květen 1992.
- [2] BRIŠ, R.: Výzkum závislosti pro energetickou náročnost, opotřebení a oteplení v kontextu s geometrií břitu a geologickými podmínkami při dobývacím procesu kolesových rýpadel. Technická zpráva, Kunčice pod Ondřejníkem, 49 s., 2010.
- [3] GONDEK, H., JURMAN, J., HELEBRANT, F.: Analýza teorie rozpojování hornin kolesovými rýpadly a objektivní náhled na ČSN 2707013. Centrum špičkových technologií pro hnědouhelné hornictví – subprojekt B, VŠB-TU Ostrava, 46 s., 64 příl., 2000.
- [4] HELEBRANT, F., JURMAN, J., FRIES, J.: Kolesová rýpadla a provozní spolehlivost. VŠB-TU Ostrava, 189 s., 2007, ISBN 978-80-248-1669-2.
- [5] ŠIMŮNEK, J.: Části strojů pro povrchovou těžbu – Kolesová rýpadla. Studijní texty pro postgraduální studium. Institut VHJ Vítkovice, 113 s., 1985.

- [6] ŽDÁRSKÝ, J.: Interakce hornina – dobývací stroj. Odborný článek v časopisu Uhlí-rudy-geologický průzkum, 2/2006, s. 11-15. (Odborné posouzení Ing. B. Suchý).
- [7] ŽDÁRSKÝ J., FULTNER J. a kol.: Prognózování rozpojovacích odporů hornin v perspektivních dolo- vých polích velkolomů. Grantový úkol č. 105/988/0166. Závěrečná zpráva GÚ. VÚHU a.s., Most, 67 s., 2000.
- [8] KLOUDA, P.: Výzkum vlivu tvaru a geometrie břitu rozpojovacích orgánů kolesových rýpadel pomocí nových metod na energetickou náročnost a životnost. Grantový úkol č. 105/07/1031 (836.1). Závěrečná zpráva GÚ. VÚHU a.s., Most, 65 s., 2010.
- [9] MONI, V.: Vliv teplotního obrazu zubu korečku kola na jeho životnost. VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, Disertační práce, 120 s., + 67 s. příloh, 2011.