

# KONTROLA PEVNOSTI KOSTRY KAPOTY DIESEL ELEKTRICKÉ LOKOMOTIVY

**Petr TOMEK, Petr PAŠČENKO, Doubravka STŘEDOVÁ**

*Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, Studentská 95, 532 10 Pardubice, ČR, e-mail: petr.tomek@upce.cz, petr.pascenko@upce.cz, doubravka.stredova@upce.cz*

## **Annotation**

The original structural design of hood is analyzed in this paper. The whole construction is loaded by force caused by the weight of the structure. The parts of the hood are subject to the standards for railway applications CSN EN 12663-1 [1]. Numerical analyses are performed by FEM computer program COSMOSWorks [2]. The main aim of this paper is to determine critical points of construction on the basis of the results of numerical analyses.

## **Úvod**

Tento článek se zabývá výpočtem pevnosti kostry kapoty železniční diesel elektrické lokomotivy. Kostra kapoty je převážně vyrobena z uzavřených tenkostěnných profilů. Duté profily jsou spojené svařováním. Kostra kapoty je zatížena setrvačnými účinky vyvolanými předepsaným zrychlením. Kapota podléhá ustanovením normy pro železniční aplikace ČSN EN 12663–1[1]. V první části článku je analyzováno původní konstrukční řešení. V druhé části jsou na základě výsledků navrženy konstrukční úpravy pro odstranění kritických míst původní konstrukce.

## **Metody použité při řešení úlohy**

Pro vyhodnocení pevnosti kostry kapoty jsou použity dvě metodiky lineární statická analýza a nelineární numerická analýza GMNA. Metodika zakotvená v ČSN EN 12663–1 [1] spočívá v provedení lineární statické analýzy. Vypočítaná pseudo - elastická napětí jsou porovnávána s dovoleným napětím. Tato metodika neumožňuje korektně posoudit vliv koncentrací napětí (vruby, změny geometrie, apod.) na pevnost konstrukce a nedokáže odhalit případnou ztrátu stability konstrukce. Výsledky získané podle metodiky uvedené v ČSN EN 12663–1 [1] jsou proto pouze orientační a nelze z nich vyvodit jednoznačné závěry.

Na základě metod současné vědy a techniky je pro vyhodnocení pevnosti kostry kapoty použita nelineární numerická analýza GMNA. Při výpočtu je uvažována geometrická nelinearita (velké posuvy) a materiálová nelinearita (plasticita). Výsledkem nelineární analýzy GMNA je stanovení skutečného mezního stavu (ztráta stability, mezní stav plasticity). Pevnost je vyhodnocena z limitního zatížení, při kterém nastává skutečný mezní stav posuzované konstrukce. Tato metoda se běžně používá pro dimenzování vyhrazených zařízení

(např.: tlakové nádoby, ocelové konstrukce, apod.) v energetickém, chemickém, jaderném a dopravním průmyslu

### Zatížení kostry kapoty

Základní zatěžovací parametry kostry kapoty vychází z ČSN EN 12663–1 [1]. Numerický model je během výpočtu vystaven působení předepsané kombinace zrychlení. Hodnoty a kombinace působícího zrychlení (násobky zrychlení  $g=9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ) pro jednotlivé zatěžovací stavy jsou uvedeny v Tab. 1. Souřadný systém je uveden na Obr. 1.



Obr. 1: Souřadný systém převzatý z ČSN EN 12663–1 [1].

Tab. 1: Hodnoty zrychlení pro vyhodnocení pevnosti podle ČSN EN 12663–1 [1] ( $g=9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ).

Zatěžovací stav LC	Hodnota zrychlení v ose x	Hodnota zrychlení v ose y	Hodnota zrychlení v ose z
1+	0	0	3·g
1 -	0	0	-1·g
2+	3·g	0	0
2 -	-3·g	0	0
3+	0	1·g	0
3 -	0	-1·g	0
4+	3·g	0	1·g
4 -	-3·g	0	1·g
5+	0	1·g	1·g
5 -	0	-1·g	1·g

Mechanické hodnoty materiálu S275 J2H použitého pro výrobu kostry kapoty jsou uvedeny v tabulce 2.

Tab. 2: Mechanické hodnoty materiálu S275 J2H.

T [°C]	E [MPa]	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]
20	2,01E+5	275	430

## Lineární statická analýza

V této kapitole je provedeno posouzení pevnosti na základě metodiky uvedené v ČSN EN 12663–1 [1]. Metoda spočívá v provedení numerické lineární elastické analýzy. Při výpočtu je uvažován pružně - elastický model chování materiálu v celém rozsahu zatížení. Výsledkem jsou tzv. pseudo – elastická napětí. Tato napětí jsou porovnána s dovoleným napětím, které vychází z následující podmínky:

$$\sigma_D = \min\left(\frac{R_{p0,2}^{20}}{S_1}; \frac{R_m^{20}}{S_2}\right) = \min\left(\frac{275}{1,15}; \frac{430}{1,5}\right) = \min(239,13; 286,67) = 239,13 \text{ MPa}$$

kde

$S_1=1,15$  – Součinitel bezpečnosti vzhledem k mezi kluzu

$S_2=1,5$  – Součinitel bezpečnosti vzhledem k mezi pevnosti

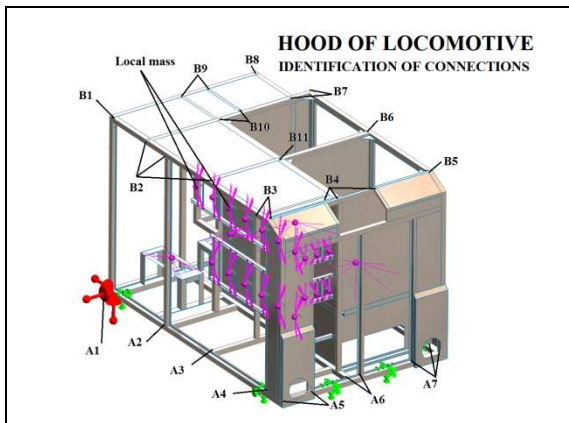
$$\sigma_D \doteq 239 \text{ MPa}$$

Pro vyhodnocení pevnosti je použito ekvivalentní (redukované) napětí podle hypotézy maximálního smykového napětí (Tresca, intenzity)  $\sigma_{intz}$ . Předpis ČSN EN 12663–1 [1] nerozlišuje plochy skořepinového elementu (TOP, MIDDLE, BOTTOM). Napětí je proto konzervativně vyhodnoceno na plochách TOP a BOTTOM.

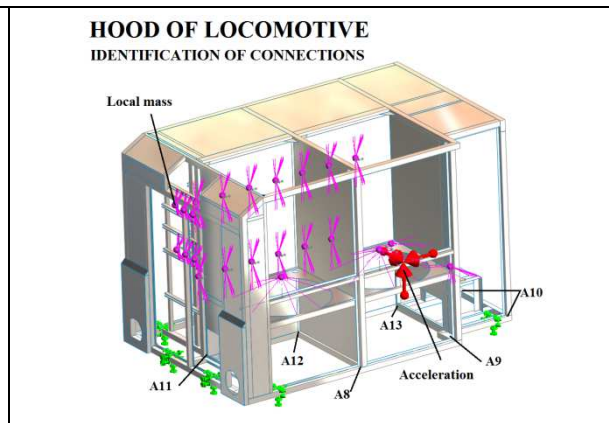
Podmínky pevnosti podle ČSN EN 12663–1 [1] jsou následující:

1. Vypočítané napětí v konstrukci  $\sigma_{intz}$  nesmí překročit dovolené namáhání  $\sigma_D = 239 \text{ MPa}$ .
2. V místních koncentracích napětí může vypočítané pseudo – elastické napětí překročit mez kluzu  $R_{p0,2}=275 \text{ MPa}$ . Oblasti s místními trvalými deformacemi vlivem koncentrace napětí musí být dostatečně malé, aby nevyvolávaly žádné významné trvalé deformace po zániku zatížení.

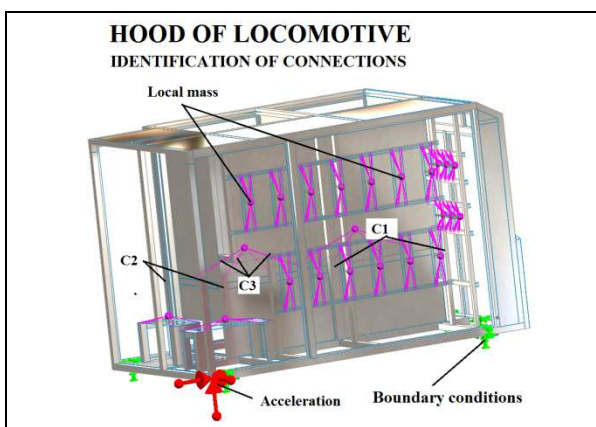
Výpočtový model kapoty lokomotivy je rozsáhlý. Pro snížení nároků na výpočetní prostředky jsou jednotlivé spoje dutých profilů (konstrukční uzly) vyhodnoceny samostatně. Označení jednotlivých spojů je ukázáno na následující straně (Obr. 2 až Obr. 4). Při vyhodnocení konkrétního uzlu je vytvořena zjemněná síť skořepinových elementů pouze v místě spoje. Zbytek konstrukce obsahuje hrubou síť. Pro každý spoj a vybrané zatěžovací stavy (Tab. 1) byly provedeny numerické lineární statické analýzy. Výsledky pro jednotlivé spoje jsou uvedeny v další kapitole.



Obr. 2: Označení spojů.



Obr. 3: Označení spojů.



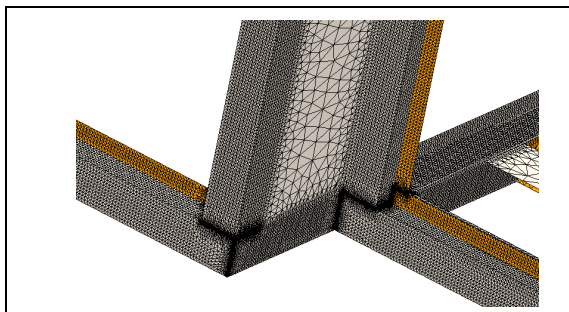
Obr. 4: Označení spojů.



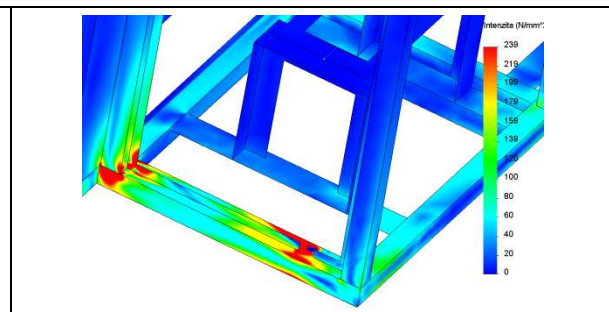
Obr. 5: Reálná konstrukce.

### Lineární statická analýza – vyhodnocení výsledků

V této kapitole jsou ukázány příklady vyhodnocení vybraných konstrukčních uzlů spodní části (označení A), horní části (označení B) a střední části (označení C) kostry kapoty. Výpočtový model je zobrazen na Obr. 2÷Obr. 4. Veškeré spoje jsou vyhodnoceny zvláště pro jednotlivé zatěžovací stavy (Tab. 1). Pro názornost následuje ukázka vyhodnocení spoje A9 a B10 pro zatěžovací stav LC=1+.



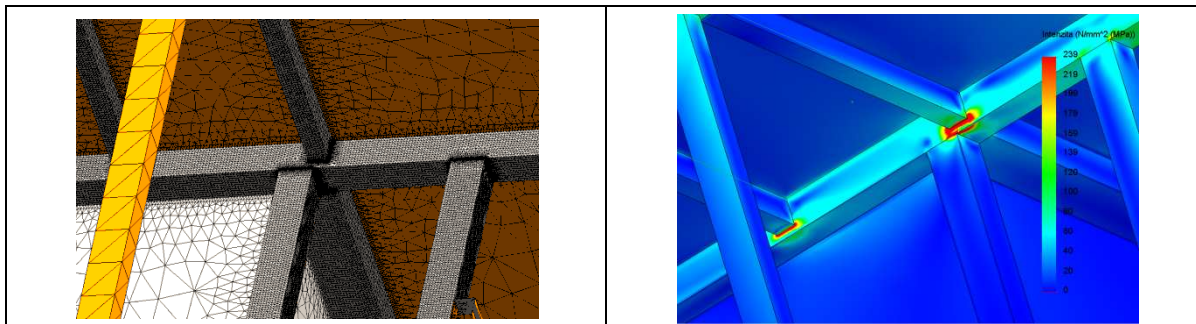
Obr. 6: A9 – Síť konečných prvků.



Obr. 7: A9 – Redukované napětí Tresca - TOP.

Síť konečných prvků je vytvořena parabolickými skořepinovými elementy SHELL6T (Obr. 6, Obr. 8). Deformovaný model s vykresleným redukovaným napětím Tresca na ploše TOP je zobrazen na Obr. 7 a Obr. 9. Na modelu jsou

zřetelné oblasti, kde napětí  $\sigma_{intz}$  přesáhlo dovolené napětí  $\sigma_D = 239 \text{ MPa}$  (oblasti zbarvené červenou barvou). Výsledky pro veškeré kontrolované spoje jsou uvedeny v Tab. 3÷Tab. 4.



Obr. 8: B10 – Síť konečných prvků.

Obr. 9: B10 – Redukované napětí Tresca - TOP.

Tab. 3: Vyhodnocení pevnosti – spodní část kostry kapoty.

Označení uzlů	Zatěžující stav LC=1+	Zatěžující stav LC=2+
A1	VYHOVUJE	VYHOVUJE
A2	VYHOVUJE	VYHOVUJE
A3	VYHOVUJE	VYHOVUJE
A4	<b>NEVYHOVUJE</b>	<b>NEVYHOVUJE</b>
A5	VYHOVUJE	VYHOVUJE
A6	VYHOVUJE	<b>NEVYHOVUJE</b>
A7	<b>NEVYHOVUJE</b>	<b>NEVYHOVUJE</b>
A8	VYHOVUJE	VYHOVUJE
A9	<b>NEVYHOVUJE</b>	<b>NEVYHOVUJE</b>
A10	<b>NEVYHOVUJE</b>	VYHOVUJE
A11	VYHOVUJE	VYHOVUJE
A12	VYHOVUJE	VYHOVUJE
A13	VYHOVUJE	VYHOVUJE

Tab. 4: Vyhodnocení pevnosti – střední část kostry kapoty.

Označení uzlů	Zatěžující stav LC=1+
C1	VYHOVUJE
C2	VYHOVUJE
C3	VYHOVUJE

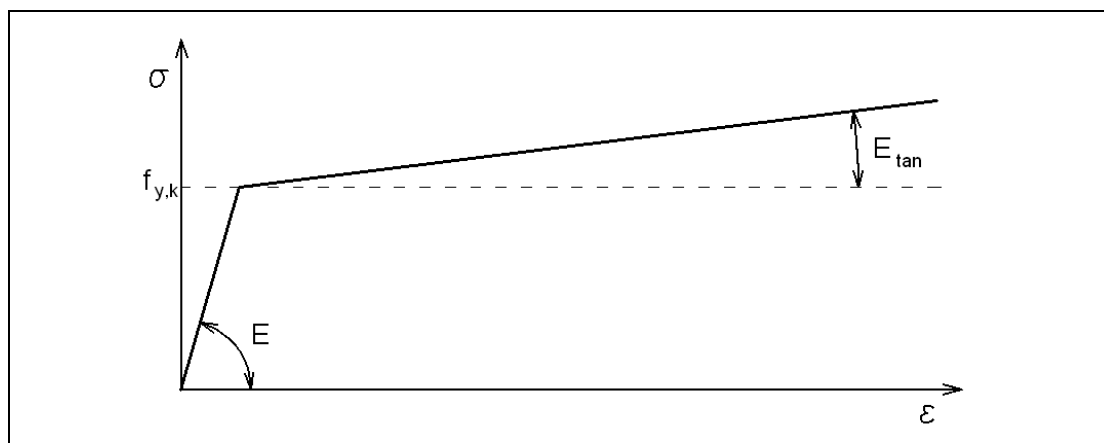
Tab. 5: Vyhodnocení pevnosti – horní část kostry kapoty.

Označení uzlů	Zatěžující stav LC=1+	Zatěžující stav LC=2+	Zatěžující stav LC=3+
B1	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE
B2	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE
B3	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE
B4	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE
B5	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE
B6	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE
B7	<b>NEVYHOVUJE</b>	<b>NEVYHOVUJE</b>	VYHOVUJE
B8	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE
B9	<b>NEVYHOVUJE</b>	<b>NEVYHOVUJE</b>	VYHOVUJE
B10	<b>NEVYHOVUJE</b>	<b>NEVYHOVUJE</b>	VYHOVUJE
B11	VYHOVUJE	<b>NEVYHOVUJE</b>	VYHOVUJE
B12	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE

### Nelineární numerická analýza - GMNA

Tato kapitola obsahuje kontrolu pevnosti a stability numerického modelu kostry kapoty. Model je vystaven působení zrychlení dle daných parametrů (Tab. 1). Při řešení pevnosti a stability jsou uvažovány dvě nelinearity.

- Geometrická nelinearita
- Materiálová nelinearita



Obr. 10: Bilineární model pružně plastického chování materiálu - von Mises.

*Geometrická nelinearita* (velké posuvy) umožňuje odhalit případnou ztrátu stability sledované konstrukce. *Materiálová nelinearita* zohledňuje pružně plastické chování materiálu (plasticitu). Při výpočtu je uvažován von Mises bilineární model pružně plastického chování materiálu (viz Obr. 10). Z důvodu konvergence numerické úlohy je v oblasti plasticity předepsán tangenciální modul zpevnění materiálu  $E_{tan}=E/10^4=20,1 \text{ MPa}$ . Výsledky pro jednotlivé zatěžující případy (viz Tab. 1) jsou uvedeny v následujících kapitolách.

## Fiktivní součinitel bezpečnosti $S_f$

V předpisu ČSN EN 12663–1 [1] jsou uvedeny následující součinitele bezpečnosti:

- $S_1=1,15$  – Součinitel bezpečnosti vzhledem k mezi kluzu
- $S_2=1,50$  – Součinitel bezpečnosti vzhledem k mezi pevnosti
- $S_3=1,50$  – Součinitel bezpečnosti vzhledem k nestabilitě (ztráta stability)

V příloze A (ČSN EN 12663–1 [1]) odstavci b) je pro vyhodnocení pevnosti na základě pružně - plastické analýzy uvedeno použití „zvýšené hodnoty součinitele bezpečnosti  $S_1$ “. Součinitel bezpečnosti  $S_1$  je určen pro vyhodnocení pevnosti konstrukce na základě pseudo – elastických napětí. V tomto případě je mezní stav určen dosažením dovoleného napětí v konstrukci  $\sigma_D = 239 \text{ MPa}$ . Rezerva v únosnosti konstrukce je zaručena nejen součinitelem bezpečnosti  $S_1=1,15$ , ale i samotnou podstatou pružně – plastického chování konstrukce.

Skutečný mezní stav plasticity nastane po vzniku dostatečného počtu plastických kloubů. Potom se konstrukce chová jako kinematický mechanismus. Mezi mezním stavem určeným dosažením dovoleného napětí  $\sigma_D = 239 \text{ MPa}$  a mezním stavem plasticity může být značná rezerva v únosnosti. Pro vyhodnocení pevnosti je proto uvažován součinitel bezpečnosti vzhledem k mezi kluzu  $S=1,5$ .

Pro mezní stav plasticity je součinitel  $S=1,5$  dále upraven o vliv tenkostěnnosti profilu. U plného obdélníkové průřezu je poměr mezi plastickým a elastickým modulem průřezu v ohybu roven  $\eta_1=1,5$ .

$$\eta_1 = \frac{W_{pl1}}{W_{el1}} = 1,5$$

Kde

$w_{pl}$  - plastický modul průřezu v ohybu

$w_{el}$  - elastický modul průřezu v ohybu

U tenkostěnných profilů je při dosažení meze kluzu v krajním vlákně již malá rezerva v únosnosti. Poměr mezi plastickým a elastickým modulem průřezu v ohybu nabývá hodnot  $\eta_2=1,15 \div 1,18$ .

$$\eta_2 = \frac{W_{pl2}}{W_{el2}} = 1,15 \div 1,18$$

Potom fiktivní součinitel bezpečnosti  $S_f$  vychází ze vztahu.

$$S_f = S \cdot \frac{\eta_1}{\eta_2} = 1,5 \cdot \frac{1,5}{1,15} = 1,956$$

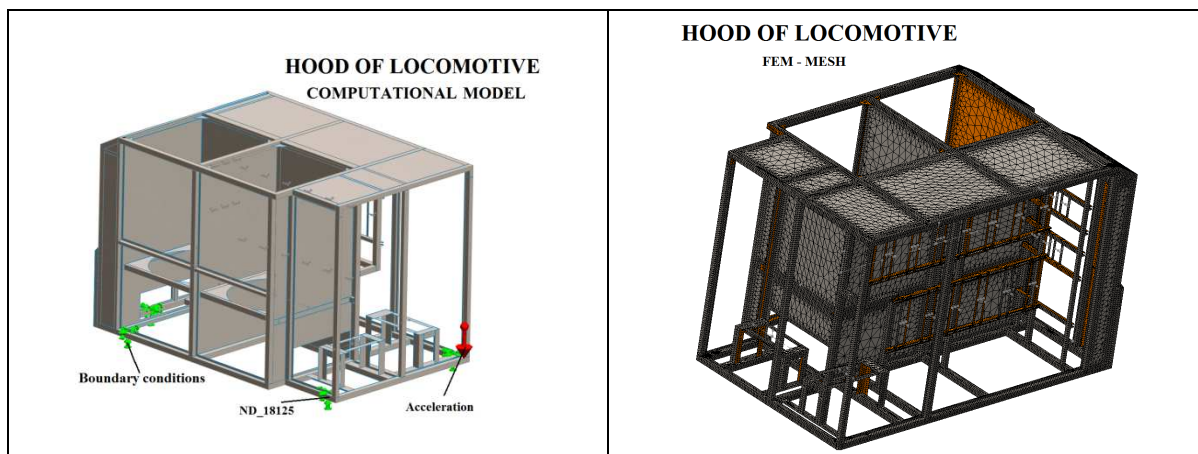
$$S_f \cong 2$$

Fiktivní součinitel bezpečnosti  $S_f=2$  a nelineární numerická analýza GMNA nejsou v předpisu ČSN EN 12663–1 [1] zakotveny. Použití nelineární analýzy spolu s fiktivním součinitelem bezpečnosti pro vyhodnocení kostry kapoty vychází ze současných poznatků vědy a techniky.

## Vertikální zrychlení (zatěžovací stav LC=1+)

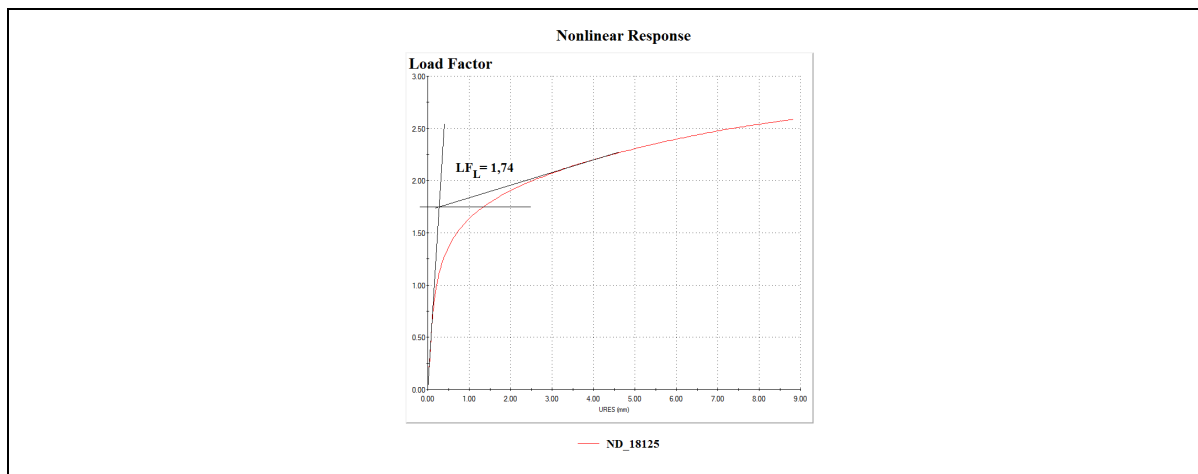
V této kapitole je nalezeno limitní zrychlení  $a_{zL}$  numerického modelu kostry kapoty. Výpočtový model je zobrazen na Obr. 11. Síť konečných prvků je vytvořena skořepinovými elementy SHELL3T (Obr. 12). Model je vystaven působení zrychlení  $a_z=3*g=29,43 \text{ m.s}^{-2}$  ( $g=9,81 \text{ m.s}^{-2}$ ). Numerický výpočet byl řízen strategií přírůstkem oblouku. Další zatížení od navazujících částí jsou zanedbány.

Rovnovážná křivka (viz zatěžující křivka Obr. 13) představuje závislost faktoru zatížení LF (násobek skutečného zatížení) na celkovém posuvu vybraného bodu prvkové sítě **ND\_18125** (Obr. 11).



Obr. 11: Numerický model – LC 1+.

Obr. 12: Síť konečných prvků.



Obr. 13: Rovnovážná křivka – LC 1+.

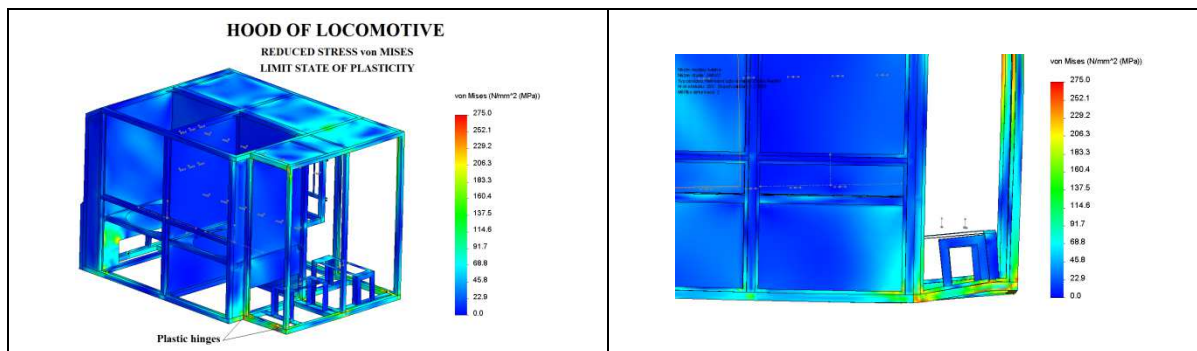
Do faktoru zatížení  $LF \sim 0,8$  vykazuje model lineární chování. Po dosažení tohoto bodu se začnou v konstrukci rozvíjet plastické klouby. Vznik a rozvoj plastických kloubů je doprovázen snížením tuhosti konstrukce. Mezního stavu plasticity je dosaženo ve výpočtovém kroku 55. Hodnota mezního faktoru zatížení je  **$LF_L=1,74$** .

Při nelineárním výpočtu byla uvažována také geometrická nelinearita. Geometrická nelinearita měla za úkol odhalit případnou ztrátu stability konstrukce. Z průběhu rovnovážné křivky (viz Obr. 13) vyplývá, že k žádné ztrátě stability



během zatěžování konstrukce nedošlo. Mezní stav je proto posuzován jako mezní stav plasticity.

Deformovaný model s vykresleným redukovaným napětím von Mises na ploše TOP je zobrazen na Obr. 14 a Obr. 15. Na modelu je zřetelné umístění plastických kloubů (místa, kde napětí dosáhlo meze kluzu materiálu). Následuje vyhodnocení výsledků.



Obr. 14: Redukované napětí von Mises – LC 1-

Obr. 15: Detail plastického kloubu – LC 1-

Limitní (mezní) zrychlení

$$a_{zL} = LF_L \cdot a_z = 1,74 \cdot 29,43 = 51,21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Dovolené zrychlení

$$a_{zD} = \frac{a_{zL}}{S_f} = \frac{51,21}{2} = 25,61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Kde  $S_f = 2$  ... fiktivní součinitel bezpečnosti k mezi kluzu

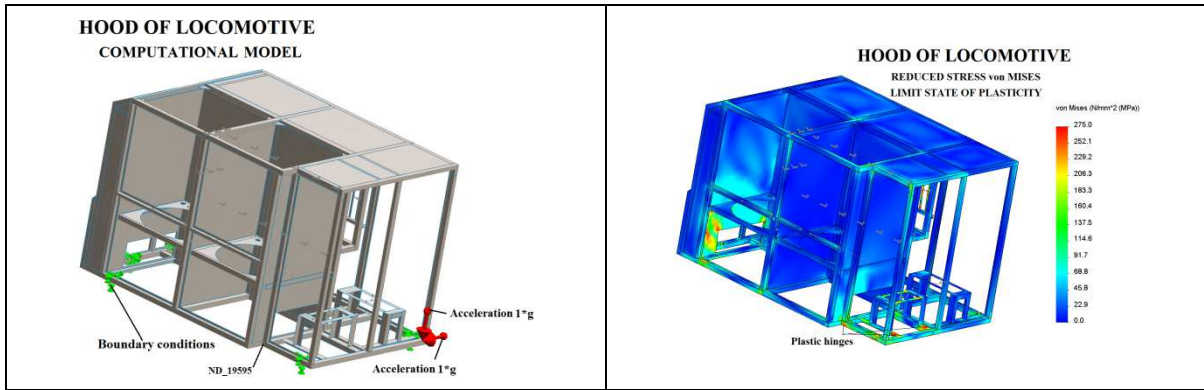
Podmínka pevnosti

$$a_z = 29,43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \not\leq a_{zD} = 25,61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

### Příčné a podélné zrychlení (zatěžovací stav LC=5+ a LC=4+)

Z důvodu rozsahu článku jsou v této kapitole uvedeny pouze výsledky pro další dva zatěžující stavy (LC4+ a LC5+). Postup výpočtu a vyhodnocení jsou shodné jako u předcházející kapitoly (zatěžovací stav LC=1+).

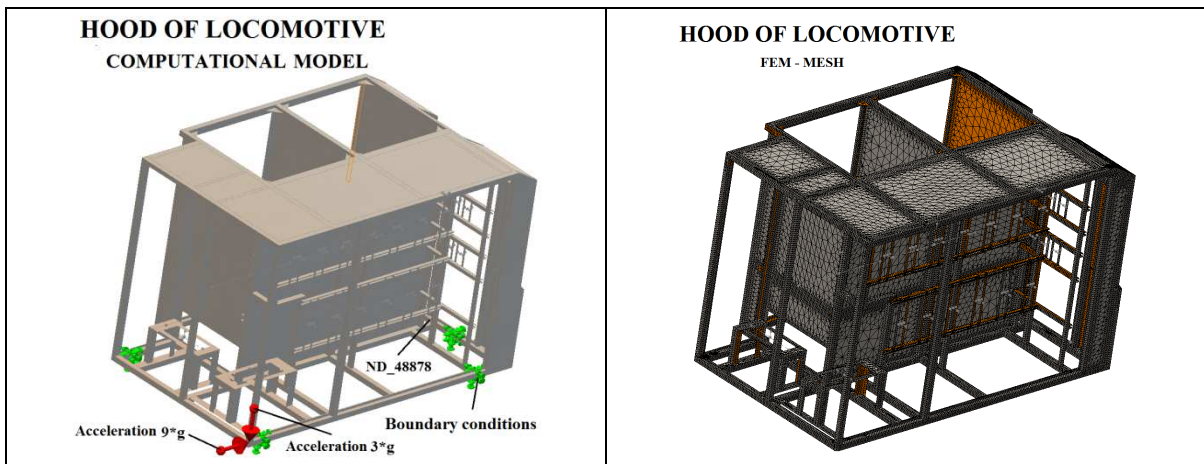
Numerický model příčně zatížené kapoty (LC 5+) je uveden na Obr. 16. Model je vystaven působení kombinace zrychlení  $a_y = 1 \cdot g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ;  $a_z = 1 \cdot g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . Numerický výpočet byl řízen strategií přírůstkem oblouku. Deformovaný model v mezním stavu plasticity s vykresleným redukovaným napětím von Mises na ploše TOP je zobrazen na Obr. 17.



Obr. 16: Numerický model – LC 5+.

Obr. 17: Redukované napětí von Mises–LC 5+.

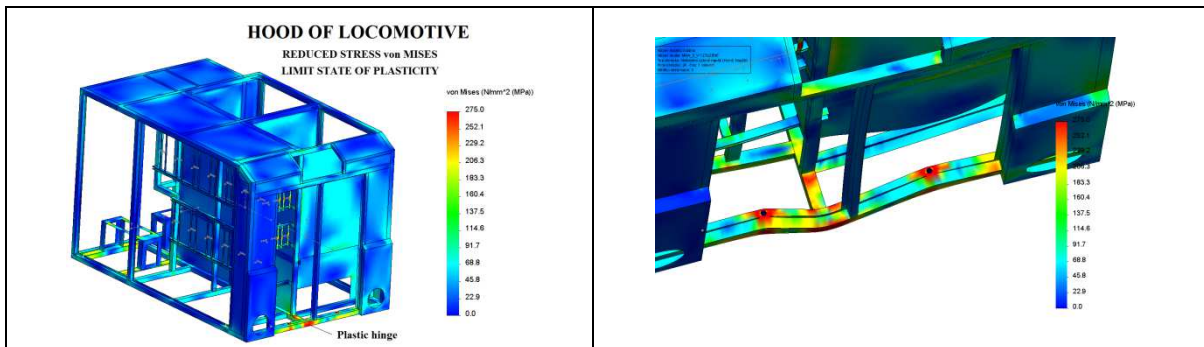
Numerický model podélně zatížené kapoty (LC 4+) je uveden na Obr. 18. Síť konečných prvků je vytvořena skořepinovými elementy SHELL3T (Obr. 19). Numerický výpočet byl řízen strategií přírůstkem síly. Model je vystaven působení kombinace zrychlení  $a_x=9 \cdot g=88,29 \text{ m.s}^{-2}$ ;  $a_z=3 \cdot g=29,43 \text{ m.s}^{-2}$  ( $g=9,81 \text{ m.s}^{-2}$ ).



Obr. 18: Numerický model – LC 4+.

Obr. 19: FEM mesh – LC 4+.

Deformovaný model v mezním stavu plasticity s vykresleným redukovaným napětím von Mises na ploše TOP je zobrazen na Obr. 20. Detail plastického kloubu v místě předního nosníku je ukázán na Obr. 21.



Obr. 20: Redukované napětí von Mises–LC 4+.

Obr. 21: Detail plastického kloubu–LC 4+.

## Nelineární numerická analýza GMNA – souhrn výsledků

V této kapitole je uvedeno vyhodnocení pevnosti kostry kapoty na základě výsledků nelineární numerické analýzy GMNA. Limitní a dovolené zrychlení pro jednotlivé zatěžující stavy jsou uvedeny na následující straně v Tab. 6.

Tab. 6: Limitní a dovolené zatížení pro jednotlivé zatěžující stavy.

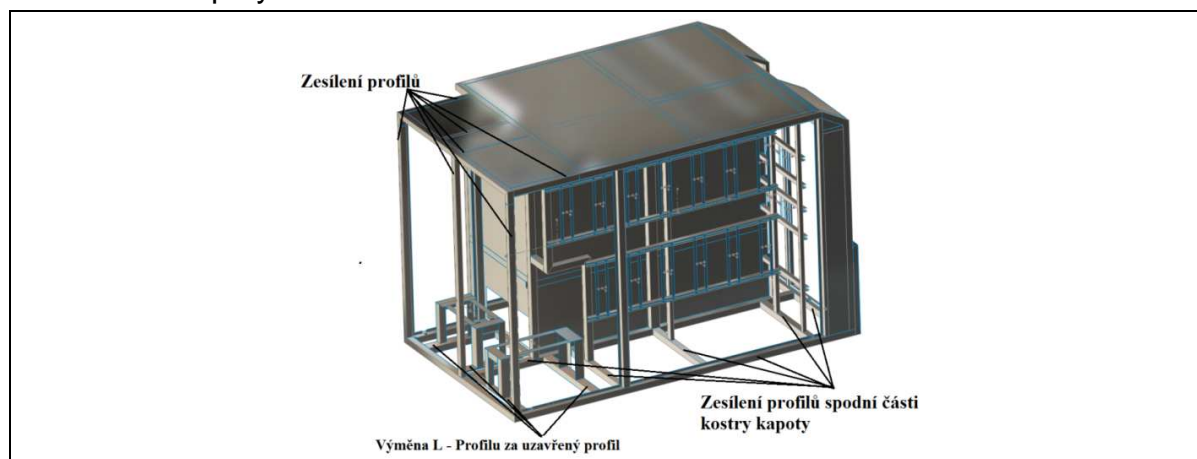
Zatěžující stav	Limitní zrychlení $a_L$ (m/s <sup>2</sup> )	Dovolené zrychlení $a_D$ (m/s <sup>2</sup> )	-	Předepsané zrychlení $a$ (m/s <sup>2</sup> )
LC 1+	$a_{zL} = 51,22$	$a_{zD} = 25,61$	$\neq$	$a_z = 29,43$
LC 4+	$a_{xL} = 52,98$	$a_{xD} = 26,49$	$\neq$	$a_x = 29,43$
LC 5+	$a_{yL} = 25,9$	$a_{yD} = 12,95$	$\geq$	$a_y = 9,81$

Z tab. 6 vyplývá, že pro dané zatížení a při uvažování fiktivního součinitele bezpečnosti  $S_f$  je kostra kapoty mírně poddimenzovaná. Na základě výsledků numerických analýz je překročeno k vyztužení a změně konstrukce navržené kostry kapoty.

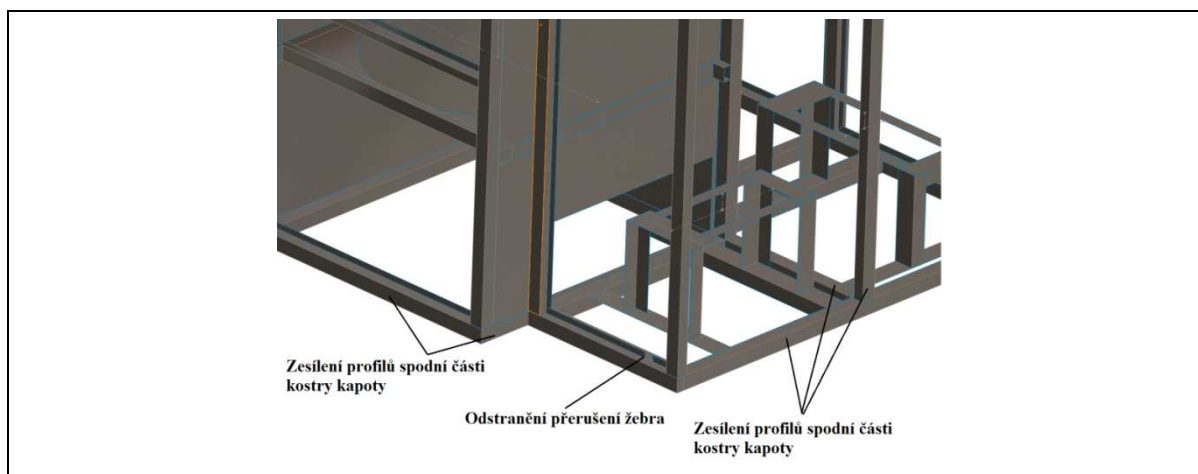
### Návrhy konstrukčních úprav na základě vyhodnocení pevnosti

U konstrukce typu kostra kapoty je mezní stav plasticity způsoben vznikem dostatečného počtu plastických kloubů. Není proto možné provést vyztužení pouze jedné části kostry kapoty. Při konstrukčních úpravách je výhodné vyztužit kostru kapoty jako celek. Zatížení se potom rovnoměrně přerozdělí do celé konstrukce. Konstrukční úpravy jsou znázorněny na Obr. 22 a Obr. 23.

- Změna uzavřených profilů kostry kapoty (zesílení tloušťky, změna geometrických rozměrů profilu, apod.).
- Při konstrukci kostry kapoty jsou použity také L - profily. Tyto profily působí jako výztužná žebra. V místech uchycení kostry kapoty k rámu lokomotivy jsou L profily přerušeny zřejmě z důvodu montáže šroubů. Přerušování výztužných žebíků snižuje únosnost konstrukce. Proto je nutné, aby L - profily (výztužná žebra) byly nepřerušované po celém obvodu.
- Při konstrukci kostry kapoty používat pouze jeden typ tenkostěnného uzavřeného profilu. Výpočtový rozměr svaru nesmí být nižší, než je minimální tloušťka stěny svařovaných profilů. Tento požadavek je nutné splnit i za cenu změny typu a konstrukce svarových spojů kostry kapoty.



Obr. 22: Návrh konstrukčních úprav - pevnost



Obr. 23: Návrh konstrukčních úprav - pevnost

## Závěr

Cílem tohoto článku bylo vyhodnocení pevnosti kostry kapoty železniční lokomotivy. Pro vyhodnocení pevnosti kostry kapoty byly použity metodika zakotvená v ČSN EN 12663–1 [1] a nelineární numerická analýza GMNA. Metodika zakotvená v ČSN EN 12663–1 [1] spočívá porovnání vypočítaných pseudo - elastických napětí s dovoleným namáháním. Tato metodika neumožňuje korektně posoudit vliv koncentrací napětí (vruby, změny geometrie, apod.) na pevnost konstrukce a nedokáže odhalit případnou ztrátu stability konstrukce. Výsledky získané podle metodiky uvedené v ČSN EN 12663–1 [1] jsou proto pouze orientační a nelze z nich vyvodit jednoznačné závěry.

Na základě metod současné vědy a techniky byla pro vyhodnocení pevnosti kostry kapoty použita nelineární numerická analýza GMNA. Na základě výsledků analýzy GMNA byla pevnost kostry kapoty vyhodnocena z limitního zatížení, při kterém nastává skutečný mezní stav posuzované konstrukce. V závěru článku jsou uvedeny doporučené konstrukční úpravy, které vychází z výsledků nelineární numerické analýzy. V další etapě řešení úlohy bude provedeno vyhodnocení únavy v místech svarových spojů a nová kontrola pevnosti upravené konstrukce.

### *Acknowledgment*

*This article was elaborated with the support of MPO project reg. No. FR-TI2/562.*

## LITERATURA

- [1] ČSN EN 12663 - 1. Železniční aplikace – Pevnostní požadavky na konstrukce skříňů kolejových vozidel- Část 1: Lokomotivy a vozidla osobní dopravy. Česká technická norma. Český normalizační institut, Říjen 2010.
- [2] FEM Computer program COSMOSWorks 2010 - Advanced Professional. SolidWorks Corporation.
- [3] ČSN 73 1401. Navrhování ocelových konstrukcí. Česká technická norma. Český normalizační institut, 1998.
- [4] ČSN EN 15085-3. Železniční aplikace – Svařování železničních kolejových vozidel a jejich částí – Část 3: Konstrukční požadavky. Česká technická norma. Český normalizační institut, Duben 2008.