

Experimentálna Analýza Napětí 2007

APPLICATION OF EXPERIMENTAL METHODS OF MECHANICS TO CONVERTER AS AN EXTRAORDINARY COMPLEX MECHATRONICAL SYSTEM WITH MANY FAILURES IN MECHANICAL ELEMENTS

UPLATNENIE EXPERIMENTÁLNYCH METÓD MECHANIKY NA KONVERTORE AKO MIMORIADNE ZLOŽITEJ MECHATRONICKEJ SÚSTAVE S RADOM PORÚCH MECHANICKÝCH PRVKOV

František Trebuňa¹, František Šimčák, Jozef Bocko, Patrik Šarga, Peter Trebuňa,
Jozef Tomčík

Abstract: During operation of new converter number of cracks in supporting structure of torsion system of pedestal were identified. This system ensures flow of tilt moment from converter vessel to converter pedestal. In the paper results of numerical and experimental analysis of forces and stresses in torsion system as well as in pedestal during operation of converter are given. It describes also remedies for further safe operation of the converter.

Keywords: converter, pedestal of torsion system, numerical and experimental stress analysis.

1. Úvod

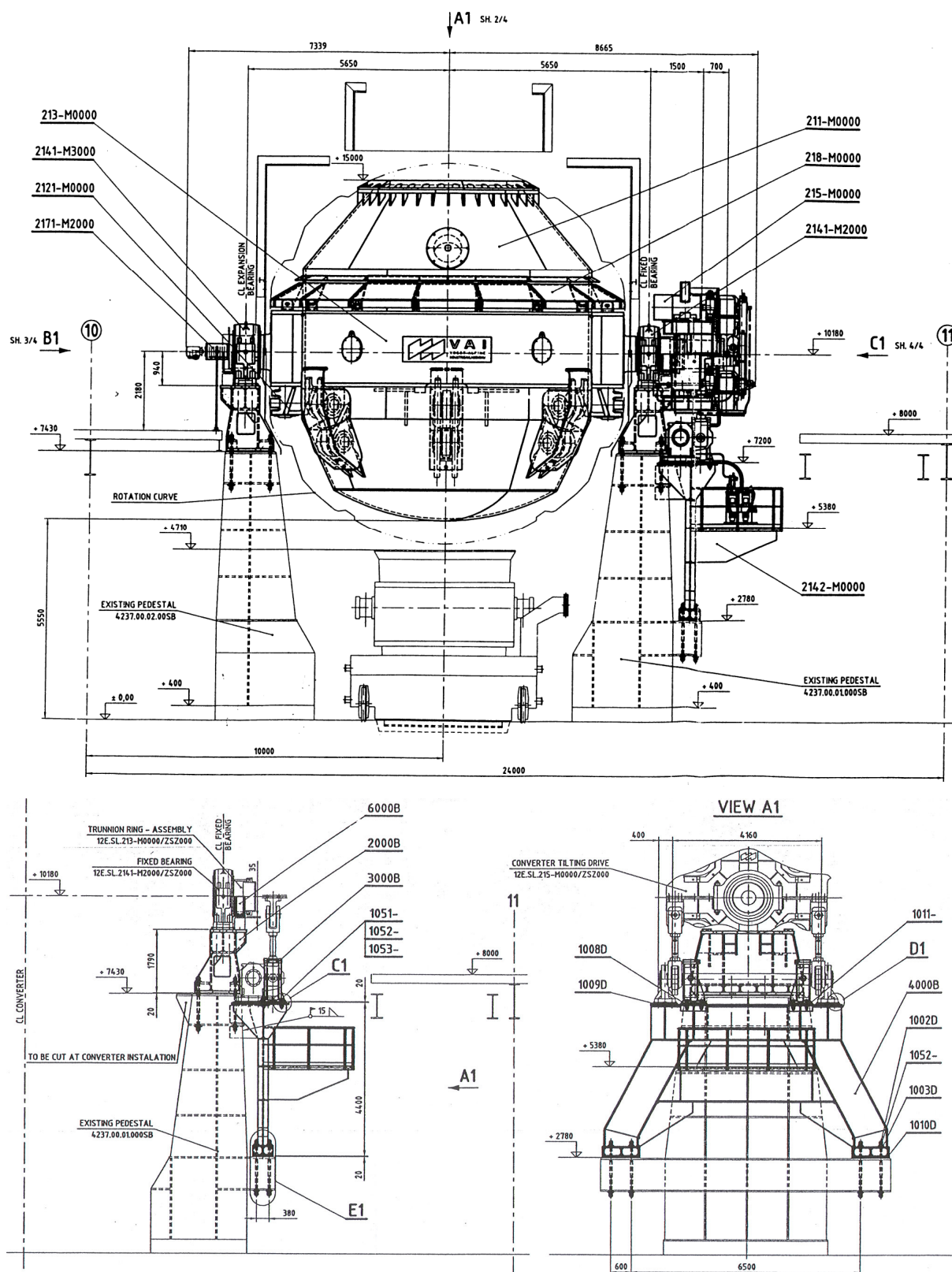
Zvyšovanie výkonov technologických zariadení v nadväznosti na inováciu ich konštrukčných uzlov často vyvoláva zvyšovanie namáhania nosných prvkov. Aj keď sú inovácie spojené so zavádzaním najnovších riadiacich a regulačných systémov, tieto často nie sú schopné zamedziť vzniku porúch mechanických prvkov v dôsledku preťaženia [3,4,5].

Po uvedení do prevádzky novopostaveného konvertora bolo zistené, že došlo k vzniku trhlin v nosnej konštrukcii podstavca torznej sústavy konvertora, ktorá zabezpečuje prenos klopneho momentu konvertorovej nádoby do stojana konvertora. Na základe rozsiahlych analýz s využitím numerických aj experimentálnych metód mechaniky boli zistené príčiny poruchy a navrhnuté úpravy zaručujúce ďalšie bezpečné prevádzkovanie konvertora aj pri výskyte mimoriadnych prevádzkových stavov.

2. Popis činnosti konvertora a miesta poruchy

Schéma konvertora s torznou sústavou je na obr.1.

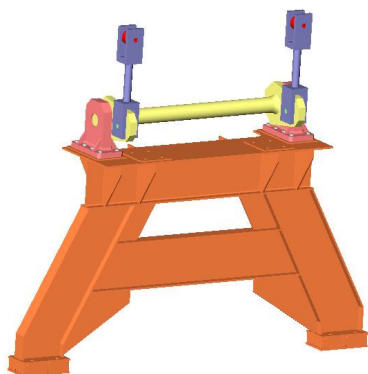
¹ Dr.h.c. mult. prof. Ing. František Trebuňa, CSc., TU v Košiciach, SjF, KAMaM, Letná 9, 042 00 Košice, tel.: +421556022462, e-mail: frantisek.trebuna@tuke.sk, prof. Ing. František Šimčák, CSc. 0556022458, frantisek.simcak@tuke.sk, doc. Ing. Jozef Bocko, CSc. 0556022920, jozef.bocko@tuke.sk, Ing. Patrik Šarga, PhD. 055602454, patrik.sarga@tuke.sk, Ing. Peter Trebuňa, PhD. KMaE, 0556023235, peter.trebuna@tuke.sk, Ing. Jozef Tomčík, 0556022719, jozef.tomcik@tuke.sk



Obr. 1. Schéma konvertora s torznou sústavou

Počas prevádzky konvertora torzná sústava zachytáva primárne zaťaženie od klopných momentov hlavnej prevodovky pohonu konvertora a tiež sekundárne zaťaženie od kmitania kovového kúpeľa počas skujňovacieho procesu v konvertorovej nádobe. Toto zaťaženie je prenášané cez vzperné tyče z prevodovky do torznej tyče a prostredníctvom vertikálnych konzol (ložiskových domčekov) do podstavca (obr.2).

Pri inšpekčnej prehliadke podstavca boli zistené trhliny na zvare medzi vertikálnou konzolou, výstužným rebrom a pásnicou I nosníka podstavca na strane odpichu a na stojine I nosníka (obr.3).



Obr. 2. Model torznej sústavy konvertora s podstavcom



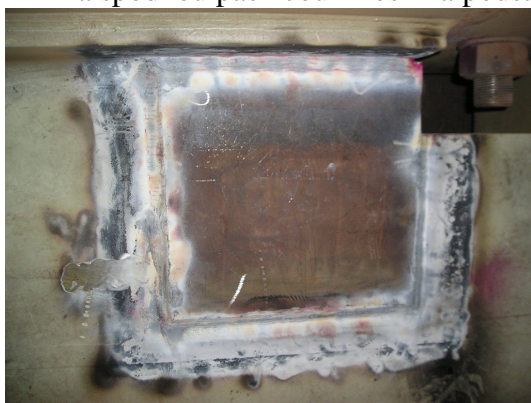
Obr. 3. Trhliny na podstavci torznej sústavy konvertora v mieste zvaru medzi vertikálnou konzolou a pásnicou a na stojine I nosníka

Kvôli zabezpečeniu ďalšieho prevádzkovania konvertora boli realizované nasledovné okamžité opatrenia [1]

- prasknutý zvar medzi vertikálnou konzolou a pásnicou I nosníka bol vypálený a opätovne zavarený,
- na mieste prasklín v stojine I nosníka boli obojstranne privarené dve oceľové platne kútovými zvarmi po celom obvode (obr.4a).

Následne po konzultácii s výrobcou zariadenia boli realizované ďalšie úpravy podstavca

- pre posilnenie krátkych zvarov medzi vertikálnou konzolou (spájajúcou podstavec so stojanom konvertora) a pásnicou I nosníka boli privarené dve horizontálne oceľové platne z oboch strán (obr.4b),
- vykonalo sa zosilnenie štyrmi šikmými výstuhami medzi konvertorovým stojanom a spodnou pásnicou I nosníka podstavca (obr.4b).



a)

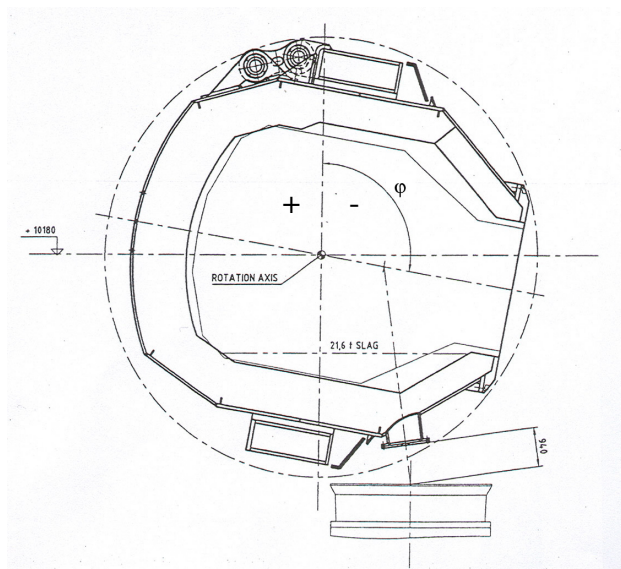


b)

Obr. 4. Úpravy realizované pre zabezpečenie ďalšej prevádzky konvertora a) privarené platne na miesta trhlín stojiny I nosníka, b) zosilnenie horizontálnou platňou a šikmou výstuhou

Podľa údajov výrobcu konvertora hodnota klopného momentu pôsobiaceho na torznú sústavu je závislá na uhlu náklonu φ nádoby konvertora (obr.5). Maximálna hodnota klopného momentu pri bežnej prevádzke konvertora by nemala prekročiť hodnotu 2000 kNm. Pri neštandardných stavoch konvertora (zrútená výmurovka kužeľa, stuhnutý kúpeľ

v konvertore) sú hodnoty maximálnych klopných momentov vyššie a môžu dosiahnuť veľkosť až 6322 kNm.



Obr. 5. Uhol φ náklonu nádoby konvertora

Pri tejto hodnote klopného momentu sily vo vzperných tyčiach torznej sústavy, ktorých vzdialenosť je 4 m, môžu dosiahnuť hodnotu 1580,5 kN.

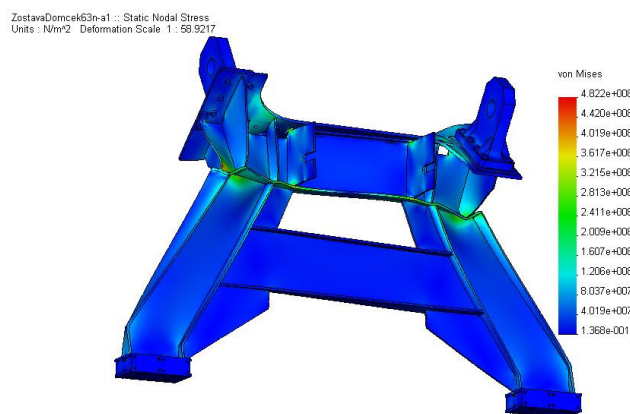
Kvôli identifikácii silového zaťaženia torznej sústavy bola realizovaná podrobná analýza momentov štyroch elektromotorov ktoré poháňajú veľké ozubené koleso konvertora. Bolo pritom skúmané obdobie, počas ktorého pravdepodobne došlo k iniciácii trhlín v podstavci torznej sústavy. Jednalo sa o časový interval z obdobia búrania výmurovky konvertora s rozborom prevádzkových podmienok pred búraním ,počas búrania výmurovky, ako aj počas normálnej prevádzky po inštalovaní novej výmurovky konvertora.

Ako ukázal rozbor, extrémne hodnoty momentov určených z elektrických veličín sa vyskytli pri otáčaní konvertorovej nádoby počas búrania (až do 10 000 kNm). Avšak aj počas bežnej prevádzky pred a po búraní výmurovky hodnoty momentov dosahovali krátkodobo veľkosť až 8 000 kNm, čo odporovalo údajom výrobcu, podľa ktorého by klopný moment počas bežnej prevádzky nemal prekročiť 2000 kNm.

Ako však bolo rozborom zistené, vzhľadom na to, že systém motor – prevodovka – brzda vytvára uzavretý silový tok, silové účinky z motorov sa pri zapnutej brzde neprenášajú do torzného systému. Je teda zrejmé, že hodnoty momentov určené z elektrických veličín sú výrazne vyššie a so zreteľom na skutočnosť, že pri presne definovanej polohe konvertorovej nádoby je táto držaná brzdami (takže momenty určené z elektrických veličín sú nulové) nemožno tieto veličiny považovať za relevantné pre určenie zaťaženia torzného systému. Tak isto pri zmene polohy konvertorovej nádoby veľkosti momentov určené z elektrických veličín sú funkciou súčinnosti motorov a bŕzd. V závislosti od tejto súčinnosti môže byť moment určený z elektrických veličín v danom okamžiku niekoľkonásobne vyšší ako je skutočný klopný moment pôsobiaci na torznú sústavu. Z uvedeného dôvodu nie je možné limitovať bezpečnú prevádzku prvkov torzného systému hodnotou momentu určeného z elektrických veličín.

3. Analýza napät'ových pomerov v podstavci torznej sústavy metódou konečných prvkov

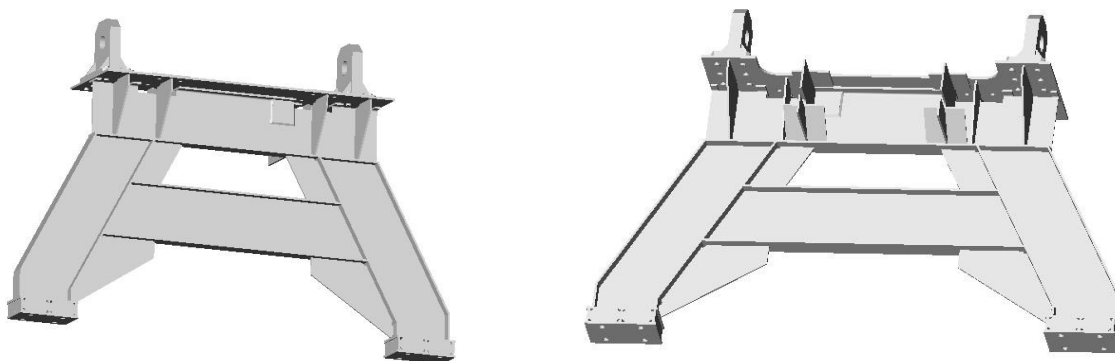
Pre analýzu napät'ových pomerov podstavca a ďalších prvkov torznej sústavy bola využitá metóda konečných prvkov. Výpočty boli vykonané za predpokladu lineárneho správania sa materiálu, oblasti skrutkových spojov boli uvažované ako kontaktná úloha, pričom výpočty boli realizované ako pre pôvodnú konštrukciu podstavca, tak aj pre konštrukciu podstavca s uvedenými úpravami [6,7]. Pri výpočte bol uvažovaný maximálny klopný moment 6322 kNm udávaný výrobcom zariadenia. Na obr.6 sú polia redukovaných napätí v podstavci pôvodnej konštrukcie bez úprav. Z obrázku vyplýva, že v miestach maximálnych hodnôt napätí vznikajú plastické deformácie, nakoľko podstavec je vyrobený z ocelových plechov akosti 11371.



Obr. 6. Polia redukovaných napätí v pôvodnej konštrukcii stojana pri klopnom momente 6322 kNm

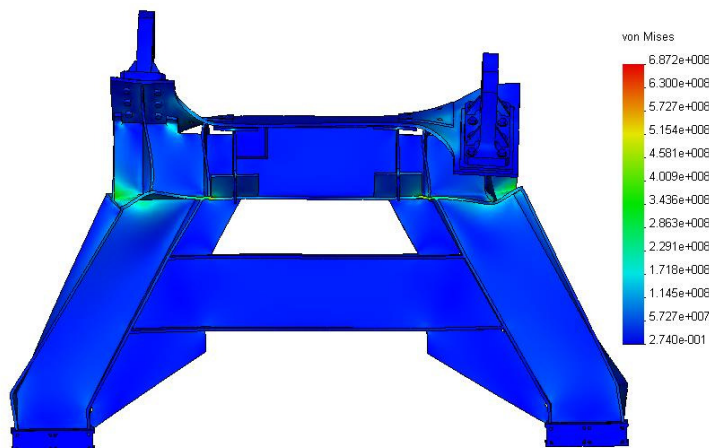
Miesta extrémnych namáhání sa pritom vyskytujú na koncoch stojiny I profilu v mieste jej pripojenia k nohám podstavca a v mieste privarenia vertikálnej konzoly k hornej pásnici I nosníka teda tam, kde došlo k vzniku a následne k šíreniu trhliny. Ako vyplynulo z ďalších výpočtov s modelom s umelo vytvorenou trhlinou v tomto mieste, sekundárne trhliny vznikli v stojine I profilu z dôvodu vzniku ťahových napätí po predchádzajúcom porušení zvaru medzi pásnicou a vertikálnou konzolou (obr.3).

Na obr.7 je výpočtový model podstavca po realizácii úprav uvedených v časti 2 (preplátovanie miest vzniku trhlín, privarenie dvoch horizontálnych dosiek pre posilnenie zvarov medzi vertikálnou konzolou a pásnicou I profilu ako aj privarenie štyroch šikmých výstuh medzi stojanom konvertora a spodnou pásnicou I profilu nosníka podstavca – pozri obr.4).



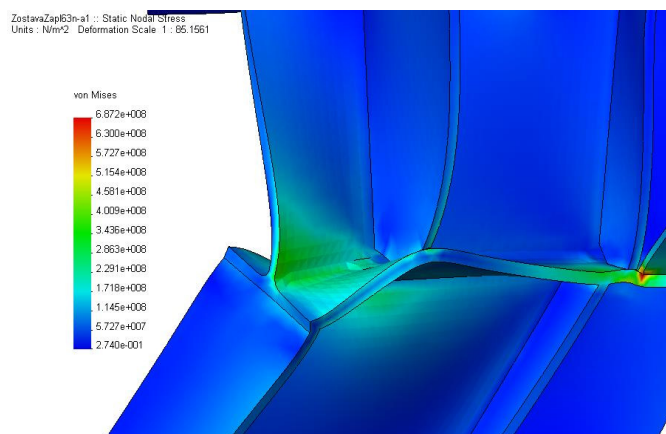
Obr. 7. Model podstavca po úpravách realizovaných podľa časti 2

Na obr.8 je pole redukovaných napätí v podstavci torznej sústavy po uvedených úpravách pri klopnom momente 6322 kN.



Obr. 8. Pole redukovaných napätí v upravenom podstavci torznej sústavy

Ako vyplýva z obr.8 realizáciou navrhnutých úprav síce došlo k zníženiu napätí v miestach výskytu trhlín, avšak súčasne došlo k zvýšeniu napätia v mieste spojenia nohy podstavca a I nosníka (obr.9), pričom maximálne hodnoty napätí boli o 43% vyššie ako maximálne hodnoty napätí pred úpravou.



Obr. 9. Pole redukovaných napätí v mieste spojenia nohy podstavca a I nosníka – podstavec po úprave.

4. Tenzometrické meranie síl vo vzperných tyčiach, klopného momentu a napät'ových pomerov v podstavci torznej sústavy

Na základe analýzy napät'ových pomerov metódou konečných prvkov boli zvolené nasledovné miesta aplikácie tenzometrických snímačov

- oslabené miesta vzperných tyčí ($\varnothing$ 135 mm) – obr.10, typ snímačov LY 11-10/120, pre určenie osových síl a tým aj hodnoty klopného momentu,
- vybrané miesta na spodnej pásnici I nosníka (obr.11) pre určenie jednoosových normálových napätí v miestach extrémnych namáhání po realizácii úprav podstavca (obr.9), typ snímačov LY 11-10/120,
- miesta extrémnych šmykových napätí v stojine I nosníka (obr.12) určených metódou konečných prvkov (obr.9), tenzometrické snímače XY 21-6/A20.

Tenzometrické merania boli realizované pri nasledovných pracovných režimoch konvertora

- klopie konvertora s prázdnu konvertorovou nádobou,
- sádzanie konvertora šrotom a surovým železom ($+45^{\circ}$ až $+65^{\circ}$),
- priebeh skúňovacieho procesu (nádob konvertora vo vertikálnej polohe – hrdlom hore),
- vzorkovacia poloha (85°),
- liatie konvertorovej ocele (-85° až -105°),
- odpich trosky (100° až 150°),
- čistenie hrdla konvertora.



Obr. 10. Tenzometrické snímače na ľavej a pravej vzpernej tyči

Okrem uvedených režimov, požadovaných prevádzkovateľom zariadenia, boli realizované ďalšie merania súvisiace s pracovnými režimami konvertora vyskytujúcimi sa v priebehu celej tavby.



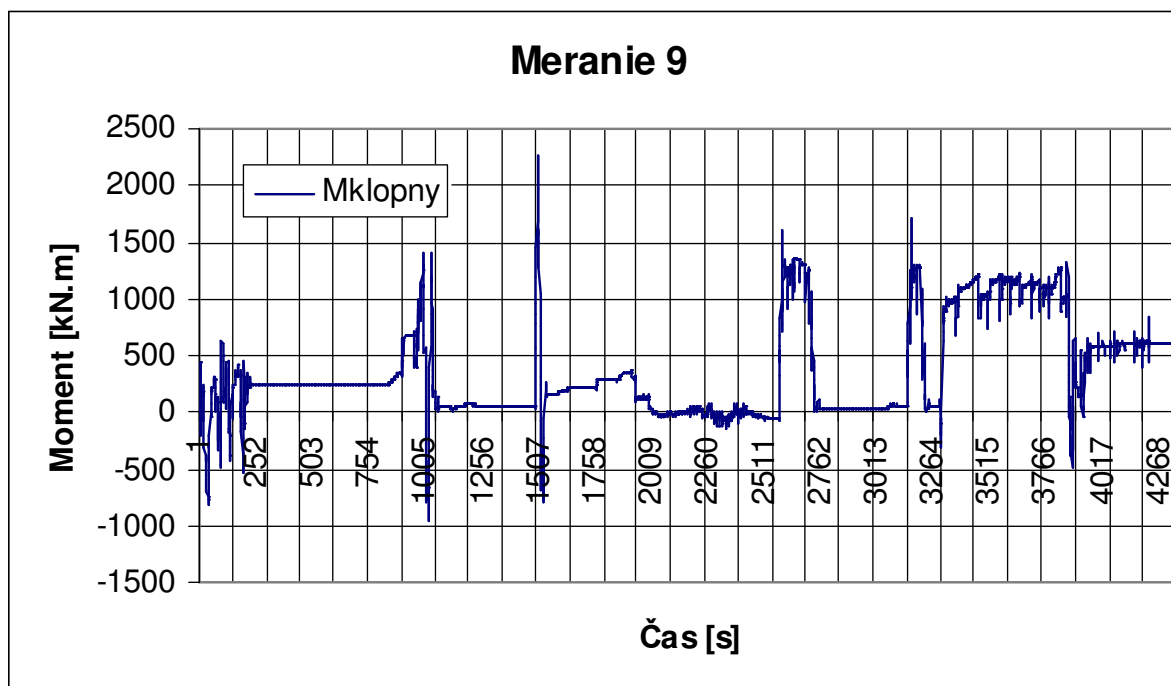
Obr. 11. Tenzometrické snímače vo vybraných miestach spodnej pásnice I nosníka



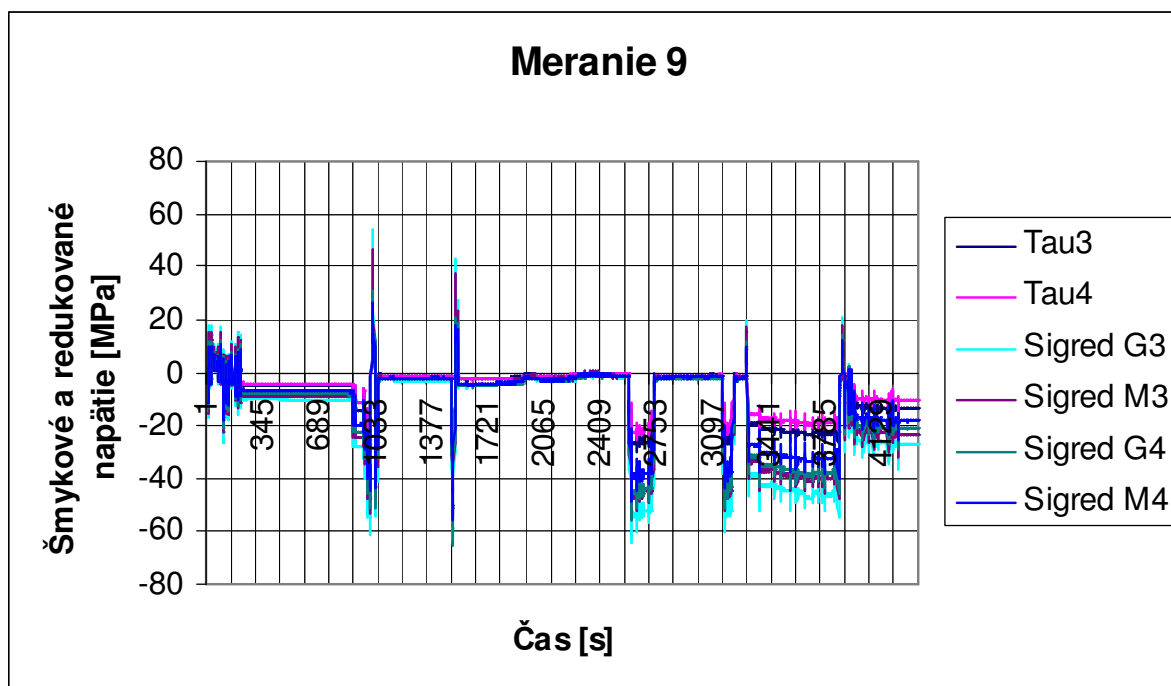
Obr. 12. Tenzometrické snímače v miestach extrémnych šmykových napätí

Merania so vzorkovacou frekvenciou 1 Hz boli realizované počas štyroch taviieb, pričom každé meranie zahŕňalo sypanie šrotu a jeho premiešanie, liatie surového železa, premiešanie naklápaním, fúkanie, preklápanie, opätovné fúkanie, odber vzorky, ďalšie preklápanie, odpich a vylatie trosky s nasledovným preklápaním konvertorovej nádoby.

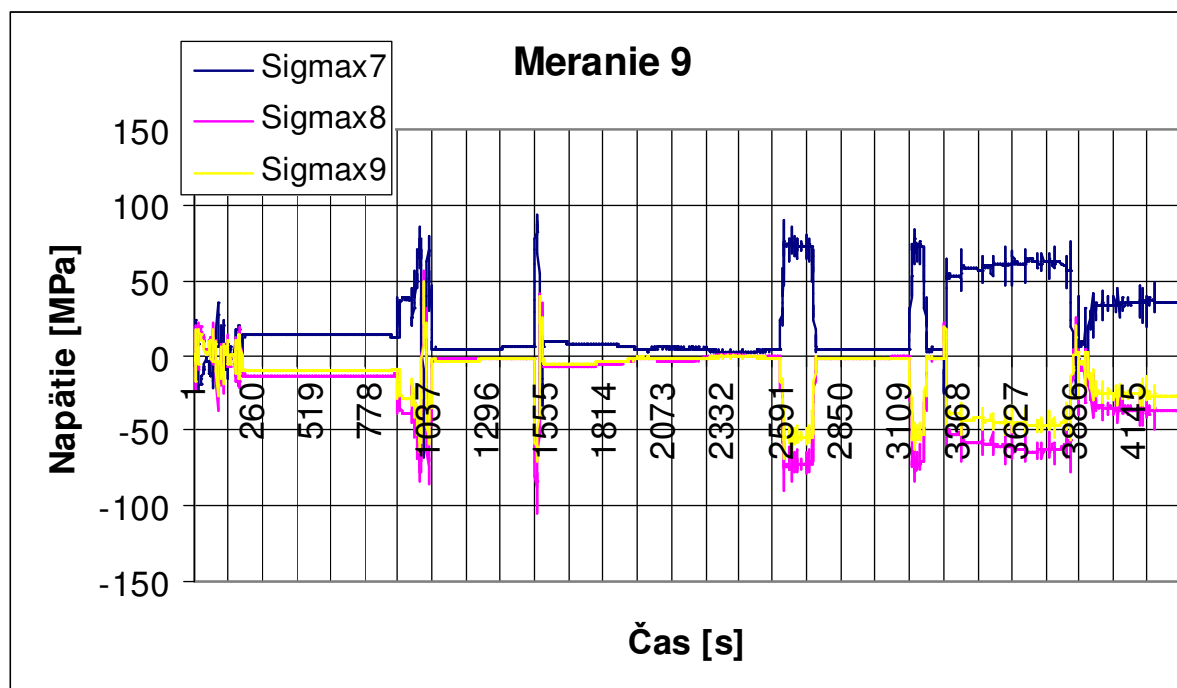
Na obr.13, 14 a 15 sú príklady časových priebehov klopných momentov, šmykových a redukovaných napätí v stojine I profilu ako aj normálových napätí v pásnici I profilu podstavca torznej sústavy konvertora v priebehu jednej tavby.



Obr. 13. Časový priebeh klopných momentov

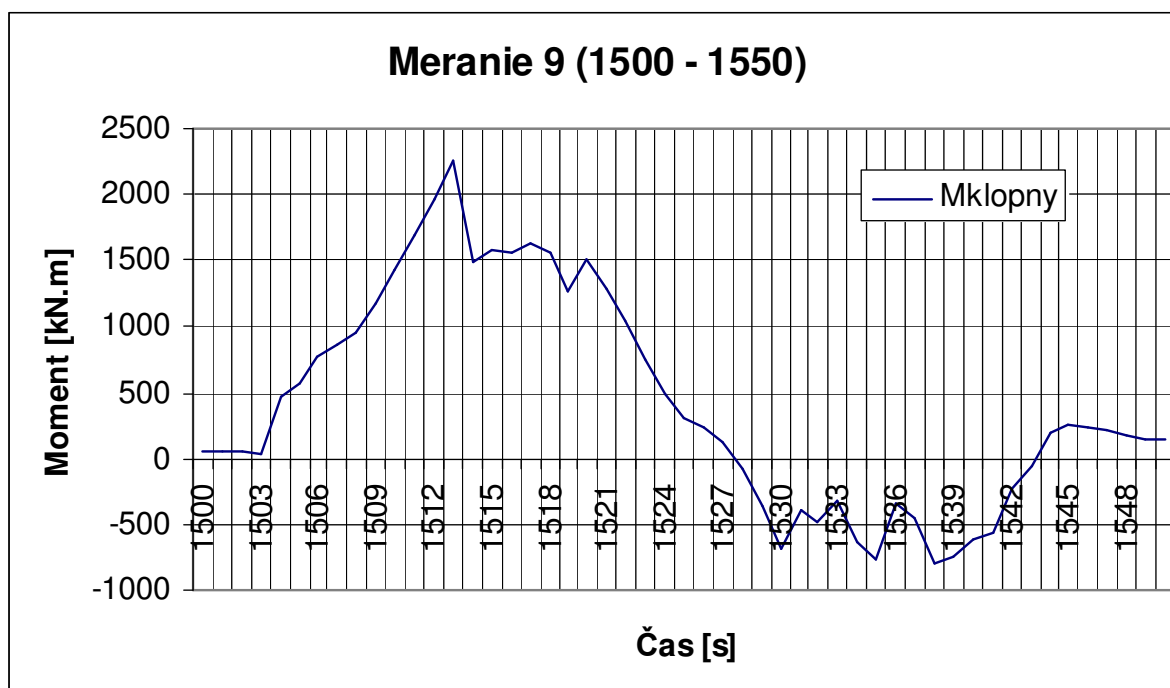


Obr. 14. Časový priebeh šmykových a redukovaných napätí v stojine I profilu podstavca

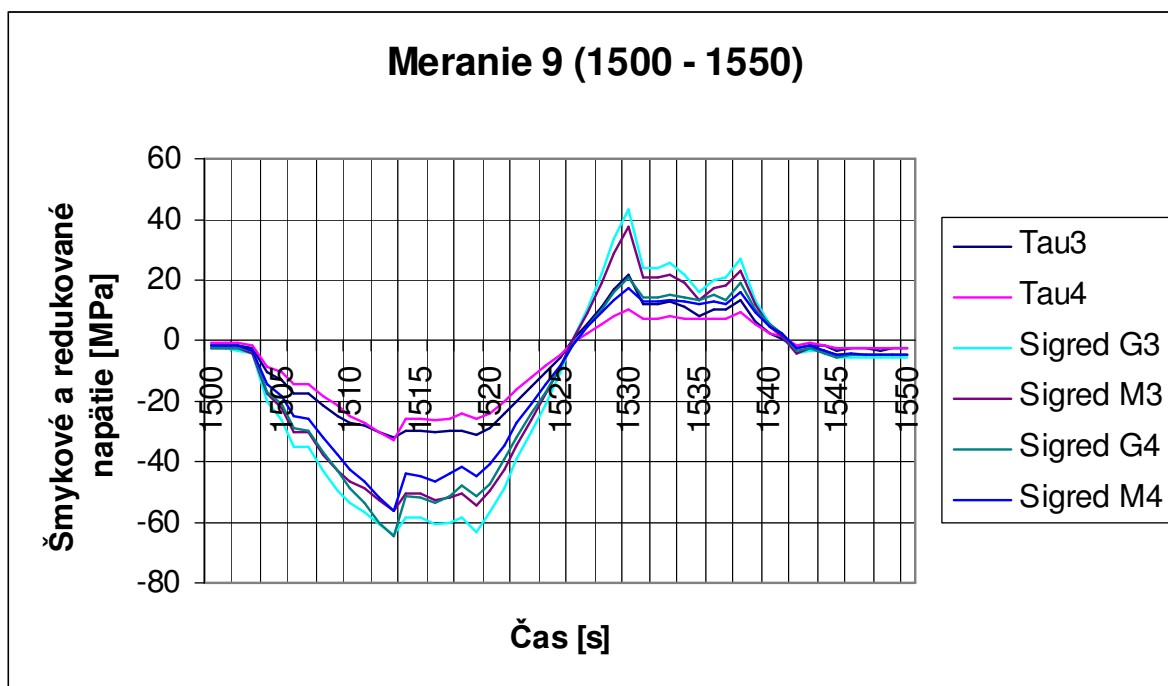


Obr. 15. Časový priebeh normálových napätí v pásnici I profilu podstavca

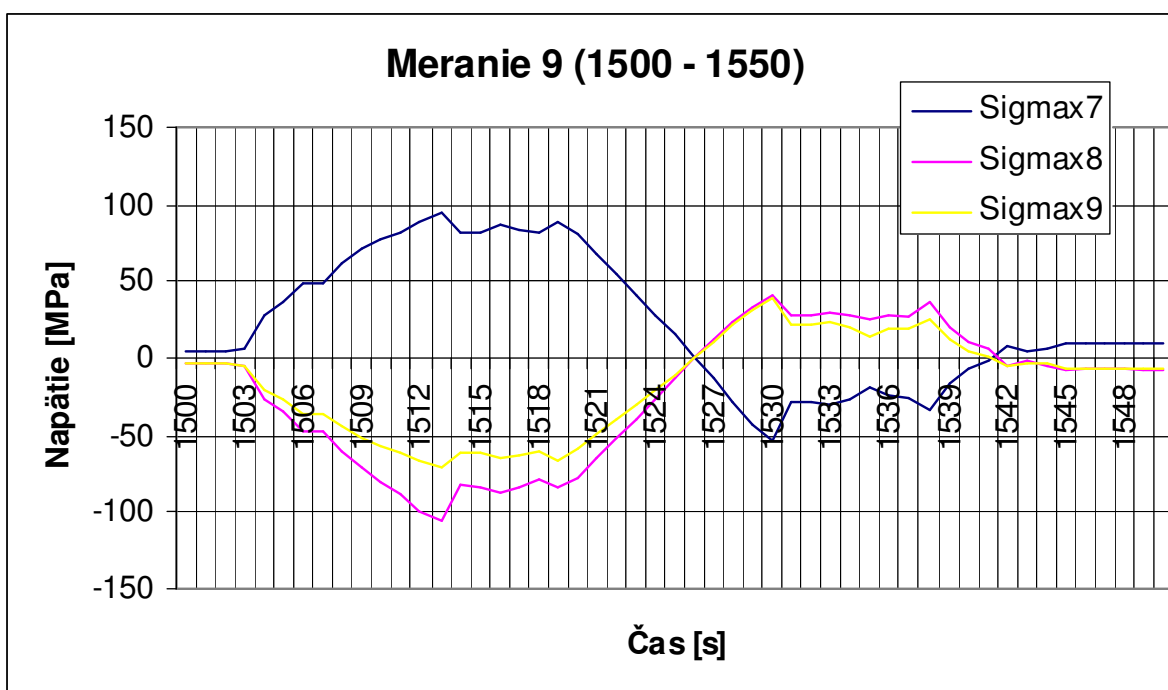
Na obr. 16, 17 a 18 sú časové priebehy tých istých veličín vo vybranom časovom úseku tej istej tavby počas premiešania po fúkaní.



Obr. 16. Časový priebeh klopných momentov počas premiešania po fúkaní



Obr. 17. Časový priebeh šmykových a redukovaných napätí v stojine I profilu podstavca počas premiešania pri fúkaní



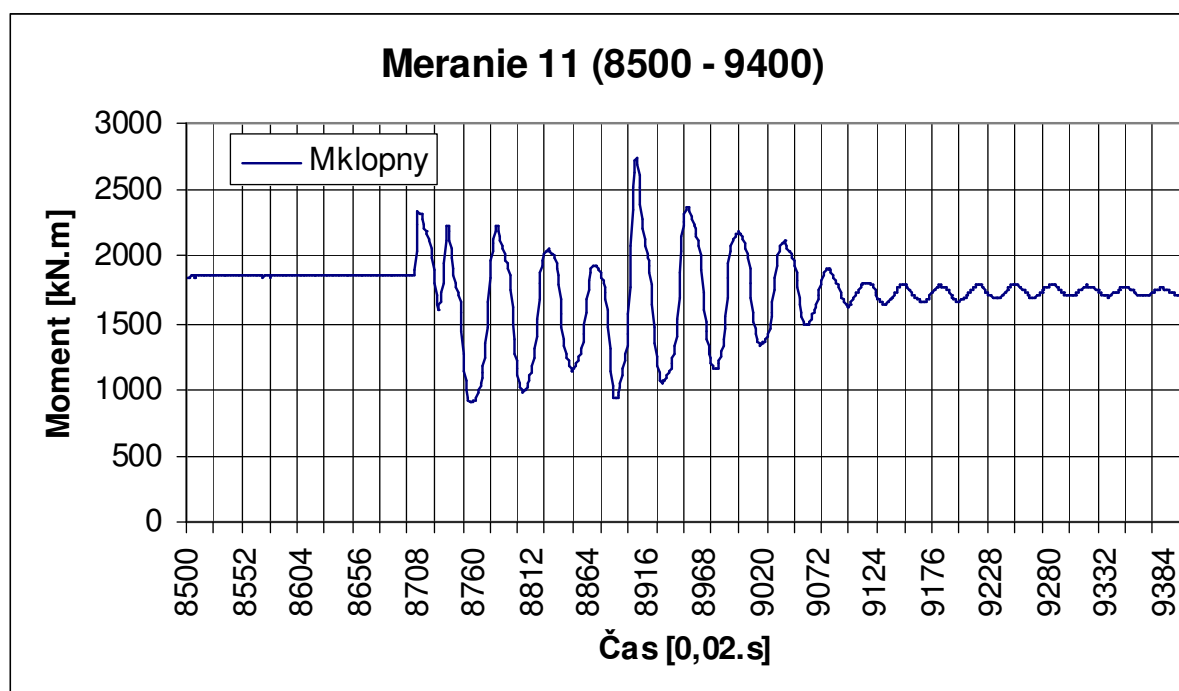
Obr. 18. Časový priebeh normálových napätí v pásnici I profilu podstavca počas premiešania pri fúkaní

Ako vyplýva z prezentovaných výsledkov maximálny klopný moment dosiahol hodnotu 2257 kNm, maximálne napätie v stojine hodnotu cca 30 MPa (šmykové napätie) resp. 65 MPa (redukované napätie) a maximálne normálové napätie v pásnici cca 100 MPa.

Uvedené hodnoty predstavovali tiež maximálne veľkosti experimentálne určených veličín počas všetkých meraní pri vzorkovacej frekvencii 1 Hz.

Vzhľadom na veľmi rýchle časové zmeny hodnôt klopného momentu hlavne v okolí extrémnych hodnôt bolo realizované meranie počas jednej tavby so vzorkovacou frekvenciou 50 Hz. Analýzou nameraných veličín boli zistené oveľa rýchlejšie časové zmeny sledovaných veličín, ktoré sa však svojimi maximálnymi hodnotami podstatne neodlišovali od hodnôt veličín nameraných pri frekvencii 1 Hz. Ako príklad je uvedený priebeh klopného momentu v okamihu odpichu pri prestavovaní uhlu náklonu konvertorovej nádoby (obr.19) z ktorého vyplýva značná dynamiku procesu s maximálnou hodnotou 2750 kNm, čo bol najväčší klopný moment určený meraním. Úmerne so vzrastom klopného momentu pritom vzrástli aj maximálne hodnoty normálových a šmykových napätí.

Z porovnania hodnôt klopných momentov určených meraním a hodnôt momentov určených z elektrických veličín opäť vyplynulo, že výstupy získané z hnacích elektromotorov nie je možné využiť pri určovaní zaťažujúcich účinkov pôsobiacich na torzný systém.



Obr.19 Časový priebeh klopného momentu pri odpichu (vzorkovacia frekvencia 50 Hz)

5. Návrh opatrení na zníženie napätí v podstavci

Ako vyplynulo z výsledkov merania pri bežných prevádzkových podmienkach bola zistená maximálna hodnota klopného momentu 2750 kNm, pričom meraním určené napätia v I profile neprekročili 135 MPa. Keďže však neštandardné stavy pri prevádzke konvertora pripúšťajú vznik maximálneho klopného momentu o hodnote 6322 kNm a experimentálnym meraním nebolo možné postihnúť lokálne špičky napätí v I profile podstavca torznej sústavy, je možné napätia určené v predchádzajúcej časti pomocou MKP považovať za reálne. Z uvedeného dôvodu boli navrhnuté tri varianty úpravy konštrukcie podstavca torzného systému.

Prvý spočíva v odstránení štyroch existujúcich šikmých plechov a ich nahradení dvoma plechmi a dvoma čelnými výstuhami pre zníženie šmykových napätí v stojine a pre odstránenie koncentrátorov v mieste medzi vertikálnym rebrom a šikmou plochou na spodnej pásnici I nosníka. Druhý variant predpokladá zníženie hladín šmykových napätí vyvolaných krútením otvorených častí prierezu podstavca vytvorením jednonásobne uzavretej konštrukcie na koncoch podstavca. Kombinácia prvého a druhého variantu umožňuje realizovať takmer

dokonalú konštrukciu z hľadiska namáhania avšak kvôli kontrole a uťahovaniu skrutkových spojov bude nutné v privarených čelách, resp. plechoch navrhnuť otvory, ktoré umožnia kontrolu prípadne utiahnutie skrutkových spojov, alebo privariť matice a uťahovanie vykonávať prostredníctvom skrutiek.

Pre uvedené tri varianty boli realizované rozsiahle numerické výpočty využitím MKP, ktoré potvrdili vhodnosť navrhovaných úprav.

6. Záver

Na základe podrobnej analýzy podkladových materiálov týkajúcich sa vzniknutej poruchy na podstavci torznej sústavy vypracovaných prevádzkovateľom zariadenia, viacnásobných konzultácií, modelovania torznej sústavy, následnej analýzy metódou konečných prvkov a experimentálneho merania riešiteľa dospeli k jednoznačnému záveru že k vzniku trhlin na podstavci došlo v dôsledku preťaženia, ktoré však nie je možné kvantifikovať zo záznamu momentov určených z merania elektrických veličín v okamihu spadnutia zliatku ani z momentov v okamihu preklopenia konvertora so spadnutým zliatkem z toho dôvodu, že hodnoty momentov na jednotlivých elektromotoroch nie sú bezprostrednými zaťažujúcimi veličinami podstavca. Uvedené tvrdenie sa opiera o fakt, že pri rozbere záznamov momentov na jednotlivých motoroch i výsledného momentu sa extrémne hodnoty vyskytujú pri presne definovanej polohe konvertorovej nádoby. V okamihu keď konvertorová nádoba je držaná brzdami, moment určený z elektrických veličín je nulový, avšak rovnováhu konvertorovej nádoby musí zabezpečovať moment pôsobiaci proti klopnému momentu na torznú sústavu. Z uvedeného dôvodu moment určený z elektrických veličín nemožno považovať za identický s klopným momentom.

Analýzou metódou konečných prvkov pôvodnej konštrukcie podstavca bolo zistené, že prvá trhlina vznikla v mieste pripojenia vertikálnej konzoly k hornej pásnici I nosníka podstavca. Pri maximálnom klopnom momente definovanom dodávateľom zariadenia redukované napätie v tomto mieste prevyšovalo pevnosť materiálu. V prípade že pri búraní výmurovky klopný moment dosiahol resp. prekročil medznú hodnotu nastalo porušenie uvedeného zvaru. Simuláciou nosnej sústavy s porušením zvaru bolo dokázané, že napäťové pomery v stojine I nosníka v mieste otvoru sa natoľko zmenili, že táto zmena v hladinách napätí vyvolala trhliny v stojine tak ako to bolo opísané v správe prevádzkovateľa.

Privarením záplat na stojinu a horizontálnych plechov z dôvodu predĺženia účinnej dĺžky zvarov medzi vertikálnou konzolou a pásnicou I nosníka, ale i privarením šikmých výstuh k vertikálnej stojine a k stojanu bola realizovaná oprava podstavca.

Analýza MKP takto upraveného podstavca pri zaťažení uvedenom v predchádzajúcom ukázala, že navrhnutá a zrealizovaná úprava nie je vhodná, nakoľko hodnota maximálneho napätia vzrástla cca o 40%. Analýzou bolo zistené miesto extrémneho namáhania na spodnej pásnici I nosníka.

Po vykonaní experimentálnej analýzy napätosti tenzomerickým meraním pri definovaných prevádzkových aj simulovaných zaťaženiach riešiteľa dospeli k záveru, že hodnoty klopných momentov uvádzané dodávateľom zariadenia sú ako po kvalitatívnej tak aj po kvantitatívnej stránke správne a pri bežnej prevádzke neprekračujú hodnoty stanovené výrobcom. Na druhej strane hodnoty momentov určené z elektrických parametrov motorov štyroch prevodoviek nedefinujú veľkosti zaťaženia mechanických častí torzného systému. Uvedené údaje nemožno teda považovať za limitujúce pre obmedzenie resp. vznik nebezpečného stavu.

Autori z uvedeného dôvodu navrhli tri varianty úpravy podstavca torznej sústavy podľa kapitoly 5 článku.

Pre obmedzenie možnosti preťaženia torznej sústavy je možné navrhnuť obmedzovač sily od klopného momentu, uložený namiesto čapov vzpernej tyče, pričom toto obmedzenie môže byť definované ako pre prípad bežnej prevádzky, tak aj pre prípad nízkocyklových zaťažení s vysokými hladinami klopných momentov napríklad pri búraní výmurovky, resp. pri havarijných preklopeniach konvertorovej nádoby.

PodĎakovanie: Autori ďakujú vedeckej grantovej agentúre VEGA MŠ SR za podporu v rámci riešenia projektov č.1/2187/05 a č.1/4163/07.

Literatúra

- [1] Tomaško, M.: *Správa z opravy torzného systému KK1, KK3*. DZ Oceliarne, Kyslíkové konvertory č.1 a 3. USS Košice, 2006.
- [2] Trebuňa, F. a kol.: *Analýza povrchových stavov konvertora č.1. Záverečná správa*. TU v Košiciach, december 2006.
- [3] Trebuňa, F. a kol.: *Kmitanie stojana konvertora, návrhy prípadných konštrukčných úprav a ich overenie. Priebežná správa, I. etapa*. TU v Košiciach, máj 2005.
- [4] Trebuňa, F. a kol.: *Návrhy konštrukčných úprav na stojane KK1. Priebežná správa, II. etapa*. TU v Košiciach, jún 2005.
- [5] Trebuňa, F. a kol.: *Kmitanie stojana konvertora, návrhy konštrukčných úprav pre realizáciu, overenie ich dopadov a funkčnosti meraním po realizácii. Záverečná správa*. TU v Košiciach, júl 2005.
- [6] Trebuňa, F., Bigoš, P.: *Intenzifikácia technickej spôsobilosti ťažkých nosných konštrukcií*. VIENALA, Košice, 1998.
- [7] Trebuňa, F., Šimčák, F.: *Odolnosť prvkov mechanických sústav*. Emilena, Košice, 2004.