

Experimentálna Analýza Napätí 2007

FLAT SPRINGS AS CRITICAL PARTS OF PRODUCTION LINE FOR CONTINUOUS CASTING

LISTOVÉ PRUŽINY AKO KRITICKÉ UZLY KONTILINKY

František Trebuňa¹, František Šimčák, Jozef Bocko, Oskar Ostertag, Daniel Kováč, Patrik Šarga, Michal Kelemen, Juraj Bajus, Pavol Moščák, Vladislav Berinštet

Abstract: At the first look very simple and for several hundred years used elastic element can be critical part in complex equipment where its failure invokes extraordinary high losses. In the paper is given a treatment for the solution of this problem by experimental methods and resulting proposal for its final solution.

Keywords: continuous casting of steel slabs, flat springs, experimental methods of mechanics, identification of crack reasons.

1. Úvod

Kontinuálna výroba brám je v súčasnosti najpoužívanjšou metódou, pri ktorej tuhnutím ocele dochádza k výrobe dlhých oceľových produktov. Základný princíp kontilatia spočíva v tom, že tekutá oceľ sa na začiatku naleje z panvy do medzipanvy a potom je distribuovaná cez určitý počet vtokov vo vertikálnom smere do medených foriem chladených vodou. Teplo sa odvádza cez meď do vody čím dochádza k tuhnutiu povrchovej vrstvy tekutej ocele. Aby sa zabránilo prilipnutiu tuhnucej vrstvy na medené platne, je nevyhnutné mazanie a kmitanie kryštalizátora ktoré je pri jednotlivých rýchlostiach liatia riadené počítačom. Frekvencia kmitov je viazaná s rýchlosťou liatia a výškou zdvihu.

Kmitanie je vyvolávané mechanizmom kmitania kryštalizátora, pričom súvis medzi rýchlosťou liatia a frekvenciou je definovaný vzťahom

$$v = 2 h f ,$$

kde v je rýchlosť liatia,

h - výška zdvihu,

f - frekvencia zdvihu.

Počas liatia dochádza k porušeniu listových pružín. Sledovanie praskavosti v priebehu dvoch rokov ukázalo, že rozptyl počtu liatí do porušenia listovej pružiny bol od 126 do 6348, ale sledované počty pružín neboli z hľadiska štatistického spracovania dostatočné, preto z toho nebolo možné vyvodiť relevantné závery.

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. Oskar Ostertag, PhD. 0556022466, oskar.ostertag@tuke.sk, Ing. Daniel Kováč, PhD. 055602453, daniel.kovac@tuke.sk, Ing. Patrik Šarga, PhD. 055602454, patrik.sarga@tuke.sk, Ing. Michal Kelemen, PhD., 0556022388, michal.kelemen@tuke.sk, Ing. Juraj Bajus, 0556022584, juraj.bajus@tuke.sk, Ing. Pavol Moščák, 0556022443, pavol.moscak@tuke.sk, Ing. Vladislav Berinštet, 0556022584, vladislav.berinstet@tuke.sk

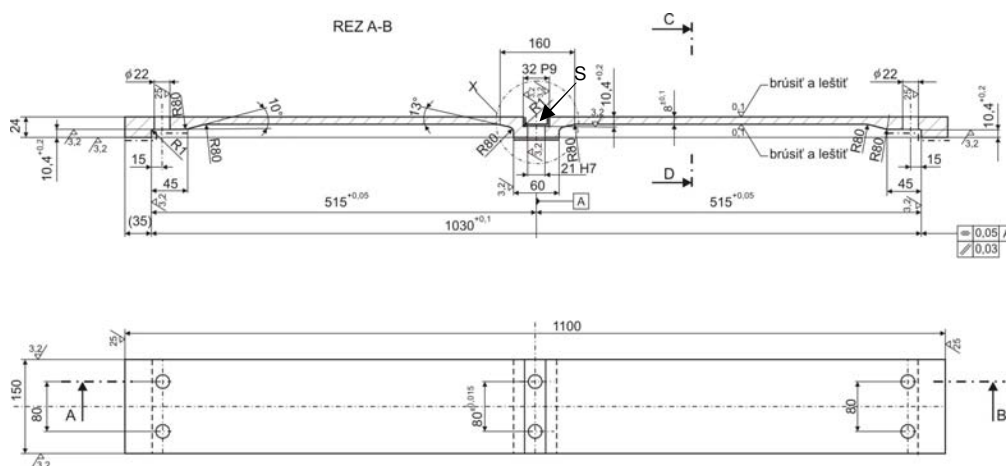
V roku 2006 došlo na jednom zariadení k dvanástim lomom listových pružín, pričom 80% lomov bolo na strane pohonu. K porušeniu listových pružín dochádza pri rôznych počtoch liatí. Rozdiely sa prejavujú i medzi dvoma zariadeniami pre plynulé odlievanie brám, čo pravdepodobne súvisí s rozdielnym polomerom, s rozdielnou priemernou šírkou liatia, s rozdielnou rýchlosťou liatia, s rozdielnou frekvenciou kmitania, s rozdielnou excentricitou, priemerným počtom prestavení ale i s akosťou ocele. Uloženie listových pružín sa líši i v uhle sklonu uloženia pružiny pričom sú rozdielne aj konštrukcie kardanov (ich dĺžky).

Pre riešenie uvedenej problematiky bol zvolený nasledovný postup prác:

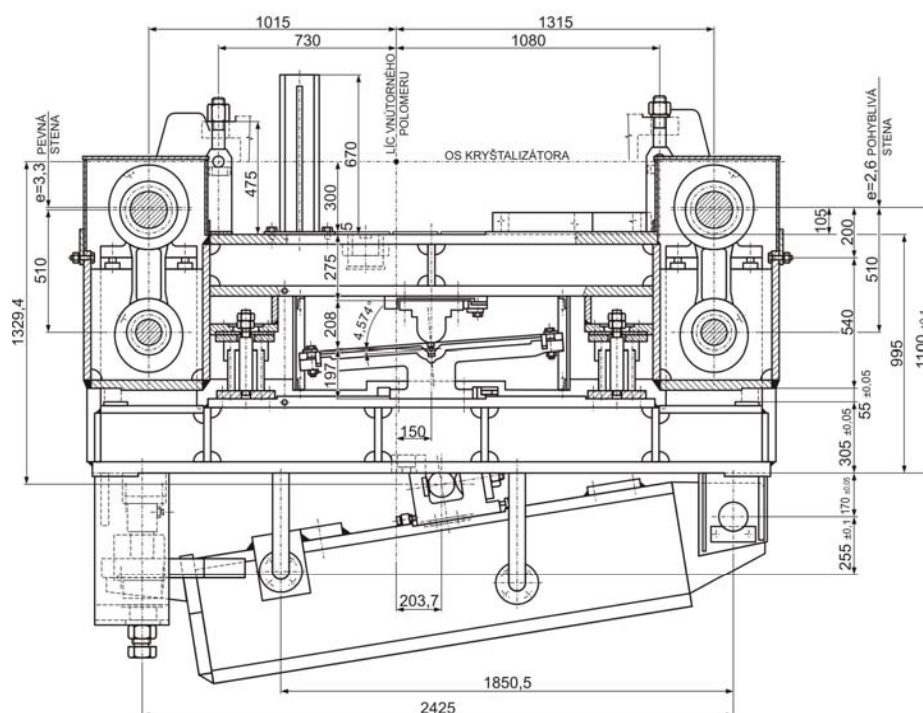
- Určenie zvyškových napätí v zlomenej a neporušenej listovej pružine v miestach vzniku maximálnych a minimálnych normálových napätí od ohybu.
- Vykonanie skúšok životnosti na únavovom stroji PWY na vzorkách vyrobených z porušenej pružiny, pričom vzorky budú vyrobené z častí listovej pružiny so zmenenou hrúbkou a z časti pružiny konštantného prierezu. Hladiny napätia budú kontrolované prostredníctvom naaplikovaného tenzometrického snímača na skúšobnej vzorke.
- Vykonanie napäťových skúšok v pružine pri definovanom utiahnutí skrutkových spojov a zaťažovaní listovej pružiny prostredníctvom držiakov. Určenie zmien napätí v závislosti na veľkosti ťahovacieho momentu v skrutkách v mieste pripojenia k nosiču.
- Namodelovanie listovej pružiny a určenie napäťových pomerov metódou konečných prvkov.
- Určenie rozloženia napätí v miestach koncentrátorov metódou photostress a metódou transmisnej fotoelasticimetrie.
- Vykonanie tenzometrického merania na listových pružinách na oboch stranách oboch liniek pre plynulé odlievanie brám. Pri meraniach v rámci tejto etapy budú určené závislosti napäťových zmien pri rôznych frekvenciách a následne vykonané prevádzkové merania pre dve listové pružiny súčasne.
- Zohľadnenie skutočných mechanických vlastností listových pružín v analýze dosiahnutých výsledkov.
- Posúdenie vhodnosti použitého materiálu a geometrie listových pružín prípadný návrh zmien.

2. Tvar a materiál listovej pružiny a jej zabudovanie do systému mechanizmu kmitania

Základné rozmery listovej pružiny sú na obr.1. Detail upevnenia a nastavenia pružiny je na obr.2.



Obr. 1. Tvar a rozmery listovej pružiny



Obr. 2. Uloženie listovej pružiny v mechanizme kmitania

Ako je zrejmé z obr.2 veľkosť priehybu listovej pružiny v polovičke rozpätia je rovná strednej hodnote excentricít nastavených na excentroch mechanizmu kmitania. Teda ak na jednom excentri je nastavená excentricita 3,3 mm a na druhom 2,6 mm priehyb v prostriedku listovej pružiny je 2,95 mm.

Veľkosť namáhania listovej pružiny bude teda okrem geometrických rozmerov pružiny, materiálových charakteristík listovej pružiny, spôsobu upevnenia koncov i väzby k aktívnemu členu vyvolávajúcejmu priehyb pružiny priamo funkciou tohto priehybu. Na druhej strane napätie v pružine bude závisieť nielen od ohybového namáhania, ale aj od veľkosti zložky posunutia bodov aktívnej väzby v smere osi listovej pružiny a tiež od zvyškových napätí, ktoré môžu byť v listovej pružine vyvolané technológiou výroby (mechanickým, chemicko-tepelným spracovaním) ale aj prípadným preťažením listovej pružiny v priebehu prevádzky.

Materiál pružiny je oceľ X4 Cr Ni Mo 16 5V s označením 1.4418 s nasledovnými mechanickými vlastnosťami:

$$R_m = 900 \div 1050 \text{ MPa}, \quad R_e > 700 \text{ MPa}, \quad A_5 \text{ min } 16\%.$$

Analýzou príčin poškodenia listovej pružiny bolo zistené, že listová pružina bola porušená krehkým lomom v strednej časti v mieste ukončenia rádiusu v ktorej podľa tejto analýzy je koncentrátor napätia.

Analýza preukázala, že obsahy Cr, Ni, Mo v použítom materiáli sú nižšie ako limitné hodnoty udané v norme a tiež hodnoty pevnosti sú pod spodnou hranicou. Mikroštruktúra je tvorená hrubšími popustenými ihlicami martenzitu s pomerne veľkým austenitickým zrnom, čo môže byť vyvolané vysokou teplotou kalenia a to má za následok vyššiu krehkosť. K lomu listového pera došlo vo väčšine prípadov vo vzdialenosti 80 až 90 mm od stredu.

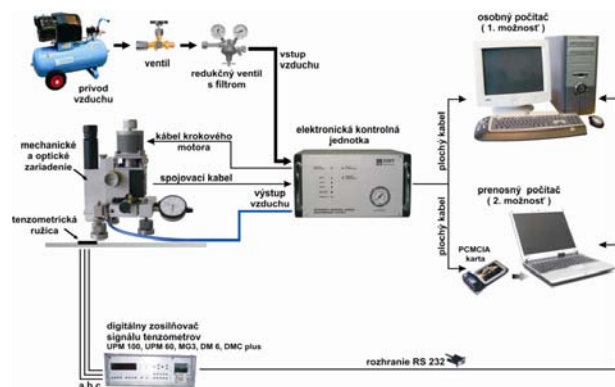
Z analýzy lomovej plochy vyplýva, že je pomerne hladká a málo členitá. Iniciácia lomu bola na spodnom povrchu pružiny, pričom lom bol v stredovej oblasti interkryštalický. Mikroštruktúra je tvorená hrubšími popustenými ihlicami martenzitu s viditeľnými hranicami pôvodného austenitického zrna, pričom v strednej oblasti je zrejмый mechanizmus transkryštalického tvárneho porušenia martenzitu.

3. Uplatnenie metód experimentálnej mechaniky pre identifikáciu príčin praskania

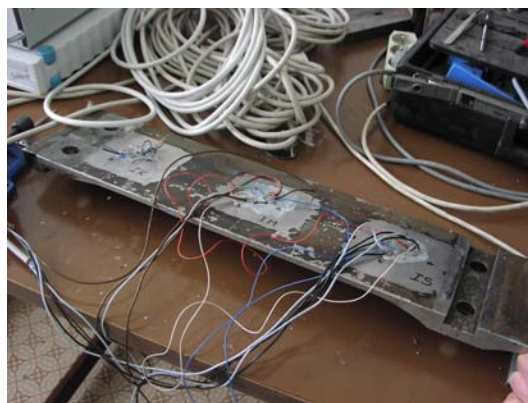
3.1 Meranie zvyškových napätí

Merací a vyhodnocovací reťazec pozostáva zo systému SINT MTS 3000 pre meranie zvyškových napätí, tenzometrickej meracej aparatury SPIDER 8, resp. tenzometrickej aparatury P3, zdroja tlakového vzduchu, redukčného ventilu s filtrom a počítača s programovým produktom RESTAN. Schéma meracieho reťazca je na obr.3.

Meranie veľkosti a smerov zvyškových napätí bolo v prvej fáze realizované na zlomenej listovej pružine v miestach maximálneho a minimálneho namáhania od ohybového momentu a tiež v mieste v ktorom je namáhanie od ohybu nulové. Na obr.4 sú zachytené naaplikované tenzometrické snímače pre metódu odvrtávania.



Obr. 3. Schéma zapojenia experimentálneho zariadenia s digitálnym zosilňovačom signálu tenzometrov



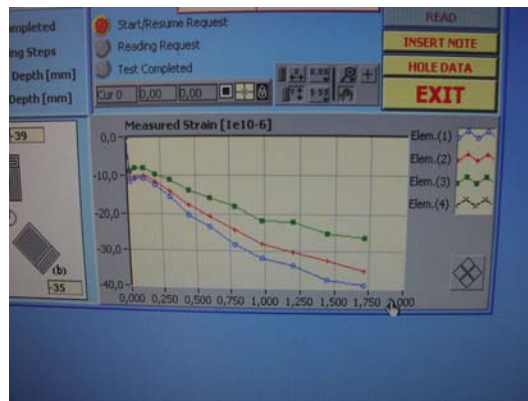
Obr. 4. Miesta aplikácie snímačov RY 61 pre metódu odvrtávania

Pre meranie boli použité tenzometre fy HBM 1-RY 61 – 1,5/120 s ohmickou hodnotou 120 Ω a k – faktorom 1,93 , série A 393/02. Na aplikáciu tenzometrov bolo použité tenzometrické lepidlo X60 a ochranný povlak SG250.

Riadenie procesu odvrtávania a jeho sledovanie je na obr.5. Namerané priebehy pomerných deformácií v závislosti na hĺbke odvrtania sú na obr.6.

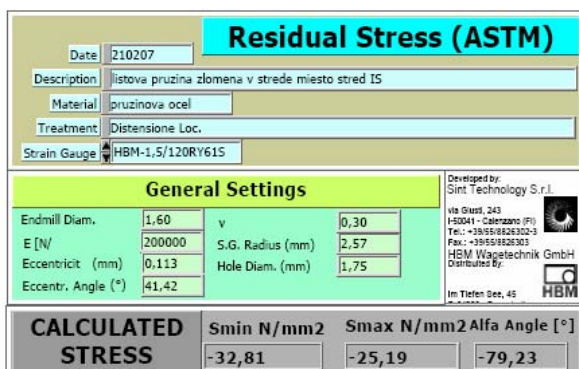


Obr. 5. Riadenie procesu odvrťavania

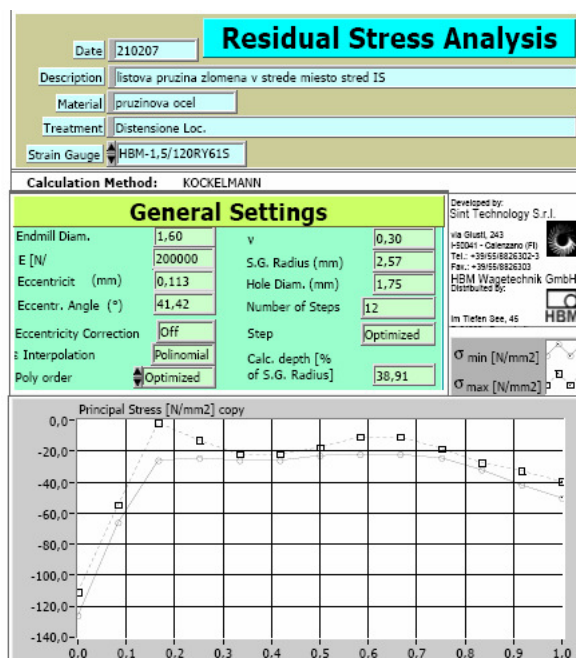


Obr. 6. Znáznornenie nameraných hodnôt pomernej deformácie pri inkrementálnom odvrťavaní

Na obr.7 a obr.8 sú protokoly z vyhodnotenia zvyškových napätí podľa ASTM E 837 01 a podľa metódy Kockelmann.



Obr. 7. Zvyškové napätia určené podľa ASTM E 837 01



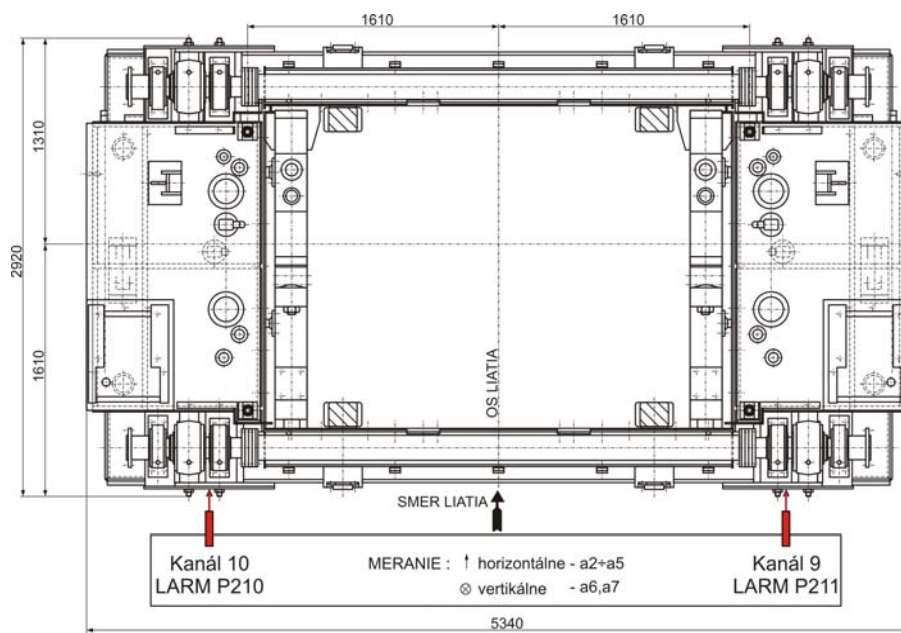
Obr. 8. Priebehy zvyškových napätí po hĺbke odvrťavania určené podľa Kockelmannovej metódy

3.2 Meranie a analýza posunutí

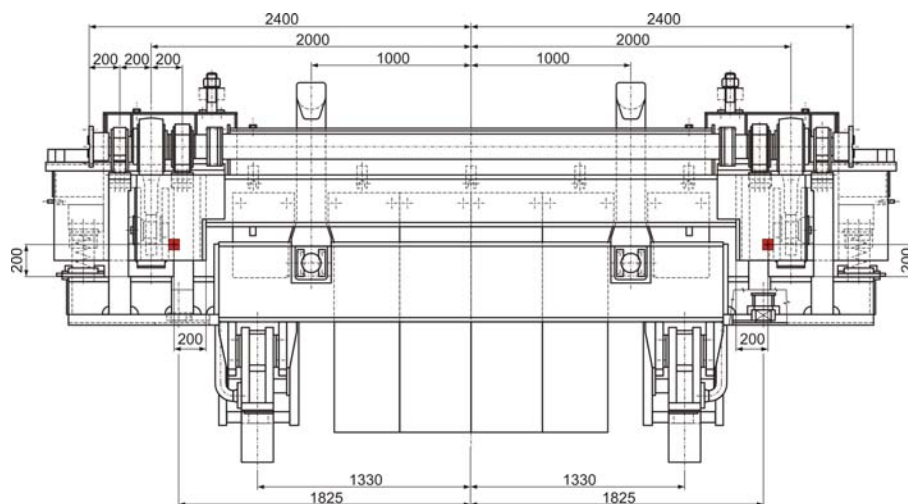
Pre meranie časových priebehov posuvov zariadenia mechanizmu kmitania na skúšobnom ráme boli použité dva inkrementálne snímače LARM MSL 30.

Meracie hroty oboch snímačov boli opreté o bočnú dosku rámu resp. pomocnú dosku nainštalovanú na zariadenie pre účely merania posuvov. Schéma umiestnenia a zapojenie snímačov na meracie kanály je na obr.9.

Pretože meranie posuvov bolo uskutočnené ako pre horizontálny smer – v smere liatia, tak aj pre vertikálny smer bolo potrebné zabezpečiť upevnenie snímačov a kontakt ako v horizontálnom tak aj vertikálnom smere (obr.10a,b).



a)



b)

Obr. 9. Umiestnenie meracích snímačov LARM MSL 30 a označenie kanálov



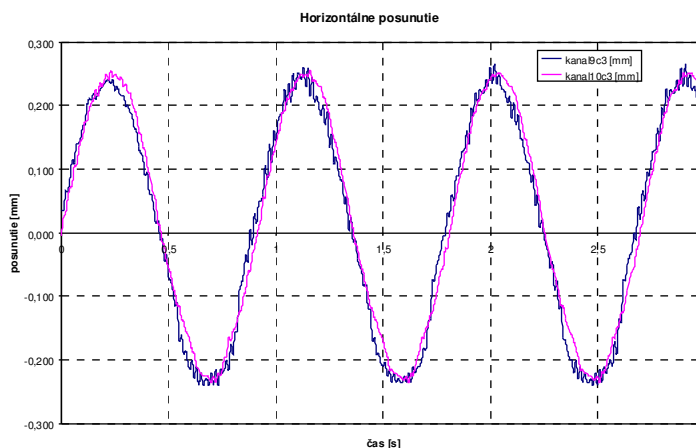
a)



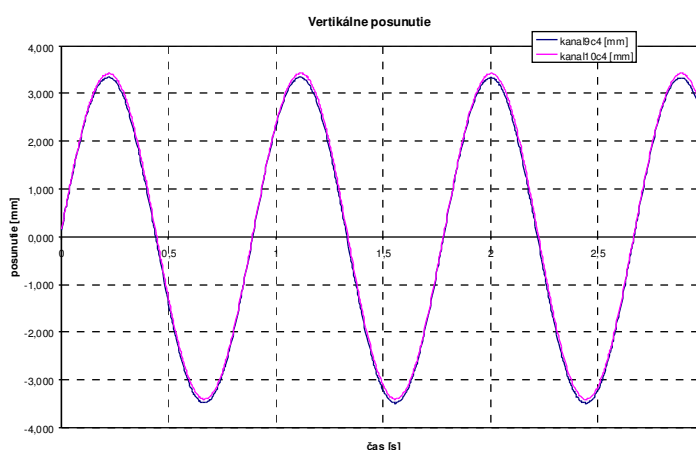
b)

Obr. 10. Poloha snímača pre meranie a) horizontálnych posuvov, b) vertikálnych posuvov

Zo súboru meraní na ráme vyberáme dva časové priebehy posuvov vo vertikálnom a horizontálnom smere. Rozšírená neistota merania pre uvedené snímače je $U = \pm 0,01$ mm. (Neistota meraní je určená v zmysle platných smerníc MSA 104 a MSA 105 o vykazovaní neistôt.) Vzorkovanie pri meraní bolo 0,01 sek. Príklady časových priebehov z týchto meraní sú na obr.11 a obr.12.



Obr. 11. Časový priebeh posunutí v horizontálnom smere



Obr. 12. Časový priebeh posunutí vo vertikálnom smere

3.3 Meranie a analýza kmitania

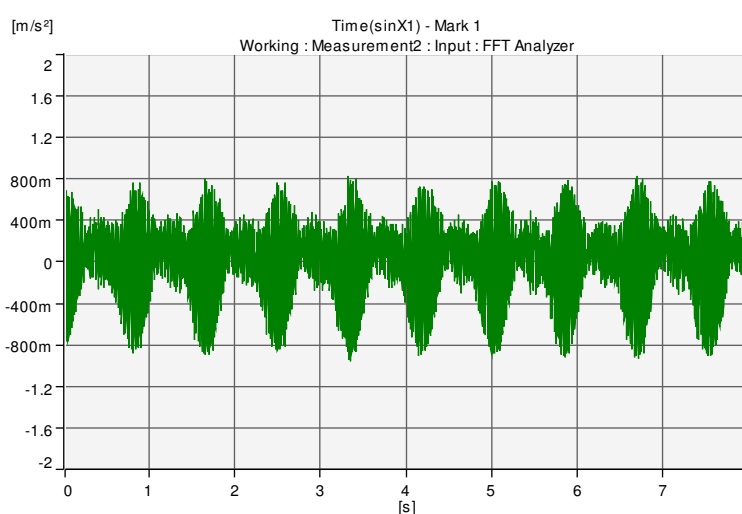
Analýza namáhania listových pružín a zistenie príčin ich praskania vyžadovala postaviť metodiku merania a analýzy kmitania tak, aby bolo možné zistiť príčiny v rozdielnom počte prasknutých pružín na strane pohonu a na opačnej strane a tiež závislosti na uhle sklonu pružiny prípadne ďalších parametrov. Preto bolo nevyhnutné merania vykonať na oboch mechanizmoch kmitania. Na oboch stranách mechanizmu kmitania boli nainštalované jednozložkové snímače zrýchlenia pre určenie časových priebehov a ich frekvenčnú analýzu. Snímačmi boli merané zrýchlenia v smeroch osí a kolmo na rovinu listovej pružiny.

Merania sa realizovali tak, že najprv bolo vykonané meranie v jednom smere na oboch stranách rámu a potom boli smery natočené o 90° . Na obr.13 je miesto aplikácie snímača zrýchlenia na listovej pružine.

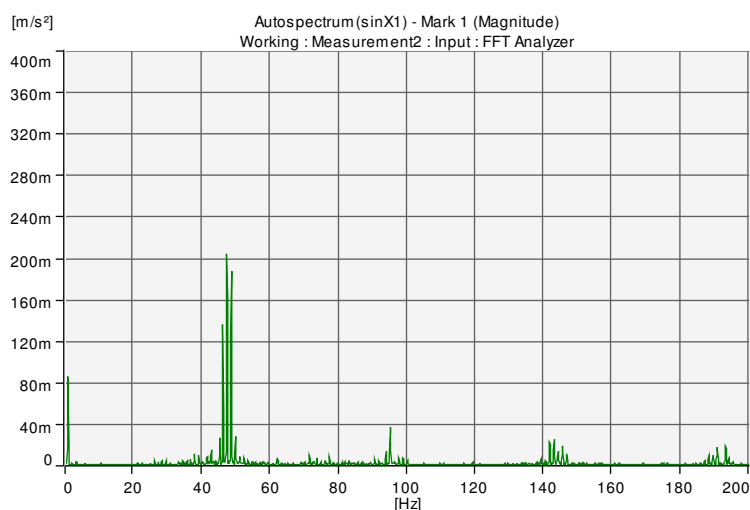


Obr. 13. Jednozložkový snímač zrýchlenia nainštalovaný na listovej pružine

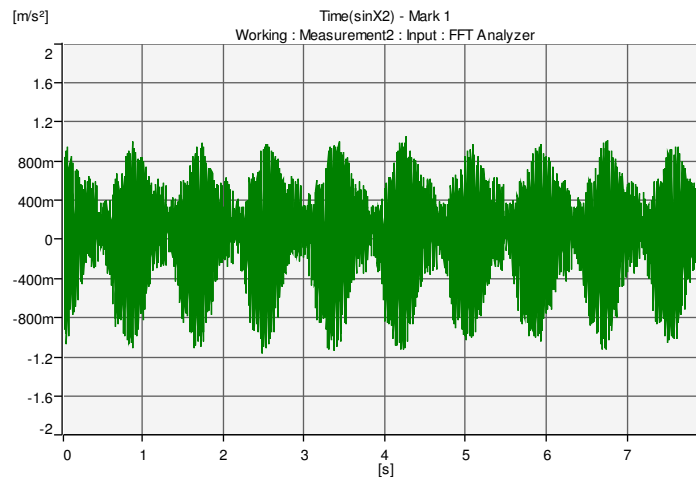
Na obr.14 až obr.17 sú časové priebehy zrýchlení a tiež frekvenčné spektrá amplitúd zrýchlení pri meraní kmitania rámu.



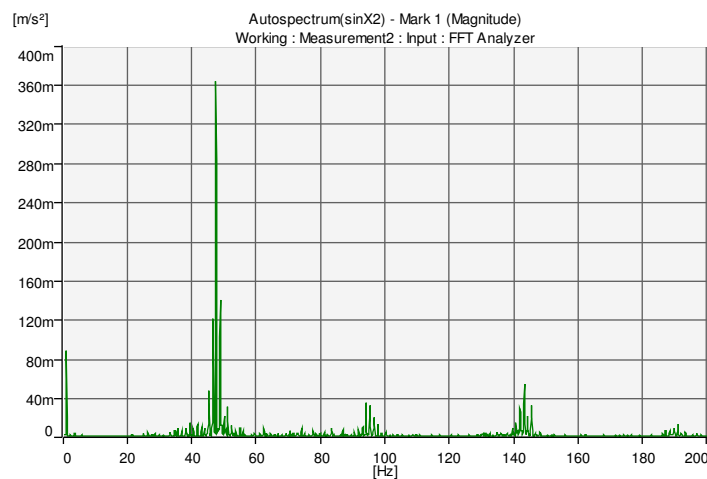
Obr. 14. Časová závislosť zrýchlenia v smere kolmom na rovinu listovej pružiny na strane bez pohonu



Obr. 15. Frekvenčná závislosť amplitúd zrýchlenia v smere kolmom na rovinu listovej pružiny na strane bez pohonu



Obr. 16. Časová závislosť zrýchlenia v smere kolmom na rovinu listovej pružiny na strane pohonu

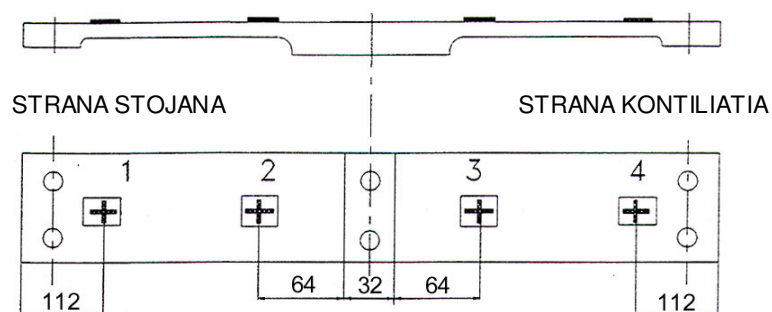


Obr. 17. Frekvenčná závislosť amplitúd zrýchlenia v smere kolmom na rovinu listovej pružiny na strane pohonu

Z analýzy kmitania je zrejmé, že zložky amplitúdy na strane pohonu sú výrazne vyššie v čom je možné vidieť príčinu častejšieho výskytu prasklín listových pružín na strane pohonu.

3.4 Tenzometrické meranie

Pre určenie napätosti v predpokladaných miestach maximálnych namáhání listovej pružiny so zreteľom na presne definované okrajové podmienky boli nainštalované na dvoch neporušených (funkčných) listových pružinách označených symbolmi II a III po štyri tenzometrické kríže s dvoma tenzometrickými mriežkami podľa obr.18.

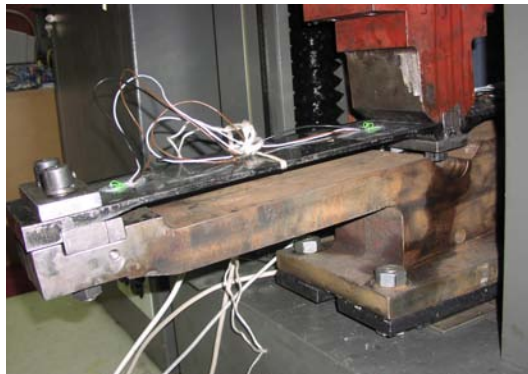


Obr. 18. Nainštalované tenzometrické kríže na listových pružinách II a III

V miestach X.1 a X.4 boli na obidvoch pružinách použité tenzometrické kríže 1-XY91-10/120 s deformačným faktorom $k = 2,05$ a v miestach X.2 a X.3 boli kvôli vyššiemu gradientu napätí získanom z MKP použité tenzometrické kríže s kratšou mernou základňou 1-XY91-6/120 s deformačným faktorom $k = 2,0$.

3.4.1 Tenzometrické meranie napätosti v listovej pružine pri pevnom uložení a definovanej vertikálnej deformácii listovej pružiny v trhacom stroji

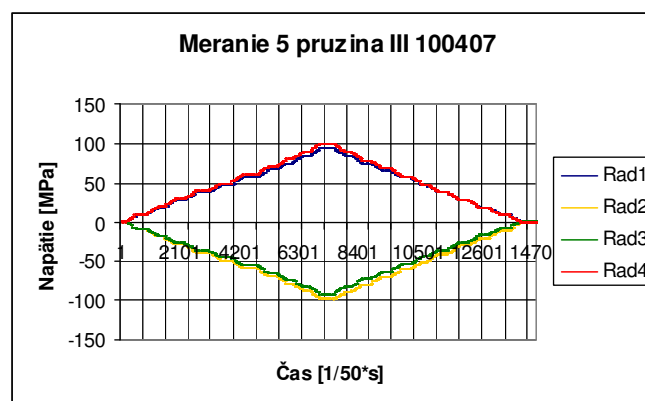
Pre vykonanie meraní na listových pružinách v trhacom stroji bol vyrobený prípravok umožňujúci pevne prichytenie upevňovacieho zariadenia listovej pružiny v trhačke, pretože listová pružina nie je v horizontálnej polohe a osová zložka sily by tak mohla vyvolať posunutie upevňovacieho zariadenia zo stojanu trhačky. Spôsob uloženia upevňovacieho zariadenia aj s listovou pružinou je na obr.19.



Obr. 19. Listová pružina II s naaplikovanými tenzometrickými snímačmi v trhačke

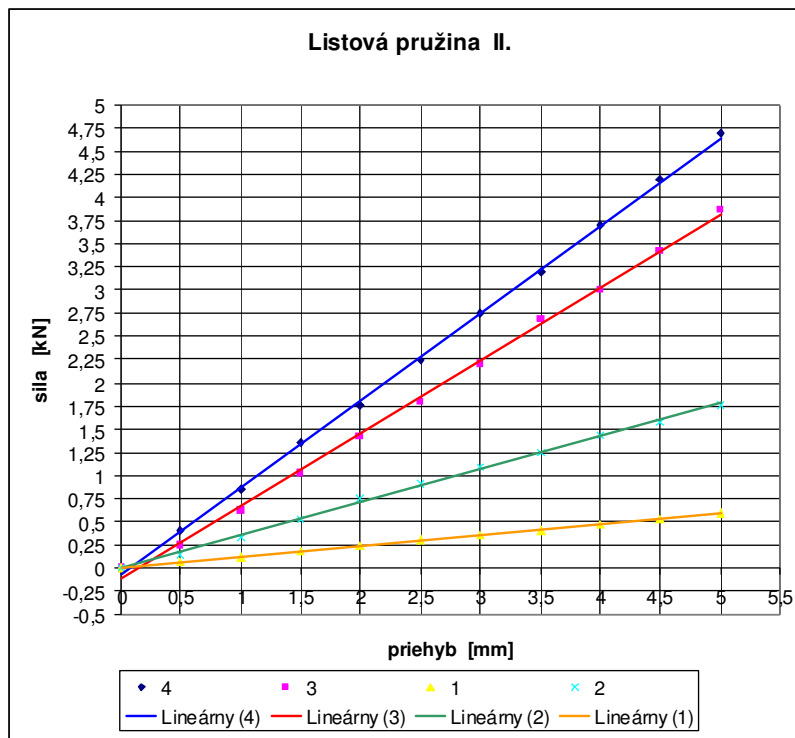
Metodika merania bola, so zreteľom na potrebu použitia rozdielnych hlavíc a snímačov pri meraní s namáhaním na tlak a ťah, postavená len pre skúšky s tlakovou silou. Pretože riešitelia predpokladali, že spôsob väzby medzi pružinou a upevňovacím zariadením, ale aj predpätie pružiny má veľmi veľký vplyv na súvis medzi veľkosťou deformácie a sily potrebnej na vyvolanie predpísaného priehybu, boli tieto predpoklady testované experimentálne.

Listová pružina bola voľne položená na upevňovacie zariadenie pričom predpínacie klíny boli úplne voľné. Skrutky na koncoch listovej pružiny boli tak isto úplne voľné. Po prisunutí traverzy trhačky do tesnej blízkosti listovej pružiny a vyvážení tenzometrickej aparatury sa začalo vlastné meranie. Záznamy na obrázkoch z jednotlivých meraní reprezentujú veľkosti napätí v osovom smere listovej pružiny v miestach 1 až 4 (obr.20), pričom jednotlivé stupne odpovedajú zmene hodnoty priehybu o 0,5 mm. Meranie bolo vykonané ako pri zaťažovaní tak aj pri odľahčovaní.



Obr. 20. Časový priebeh napätí v pružine III v miestach 1,2,3,4

Určenie závislosti medzi deformáciou a potrebnou silou na dosiahnutie tejto deformácie (obr.21) bolo realizované tak, že pri jednotlivých hodnotách priehybu boli odčítané hodnoty sily potrebné na jeho vyvolanie.



Obr. 21. Závislosť sily na priehybe pri jednotlivých spôsoboch utiahnutia pružiny pre pružinu II

Ďalším parametrom, pri ktorom bola uvedená zisťovaná závislosť, bolo uloženie listovej pružiny na upínacie zariadenie a utiahnutie štyroch skrutiek na koncoch pružiny predpísaným ťahovacím momentom. Meranie týchto závislostí bolo tiež vykonané pri voľne položenej listovej pružine bez jej predopnutia predpínacími klinmi, ktoré je na kalibračných závislostiach označené číslom 1. Ďalšie zistenie závislosti bolo vykonané pri predpätí listovej pružiny vykonanom predpínacími klinmi prostredníctvom horizontálnych skrutiek ťahovacím momentom 50 Nm. Toto meranie je označené symbolom 2. Meranie realizované pri predopnutí skrutiek pripájajúcich listovú pružinu k upínaciemu zariadeniu (vertikálnych skrutiek) ťahovacím momentom 100 Nm je označené číslom 3. Pri ďalšom meraní boli vertikálne skrutky utiahnuté momentom 200 Nm. Merania boli vykonané pri postupnom raste priehybu o 0,5 mm až do hodnoty priehybu 5 mm a následne dochádzalo k postupnému uvoľňovaniu – odľahčovaniu po 0,5 mm až do úplného odľahčenia.

Na obr.21 je závislosť veľkosti sily na priehybe pri jednotlivých upnutiach listovej pružiny II popísaných symbolmi 1 až 4.

3.4.2 Meranie namáhania pružín v ráme zariadenia pre plynulé odlievanie brám

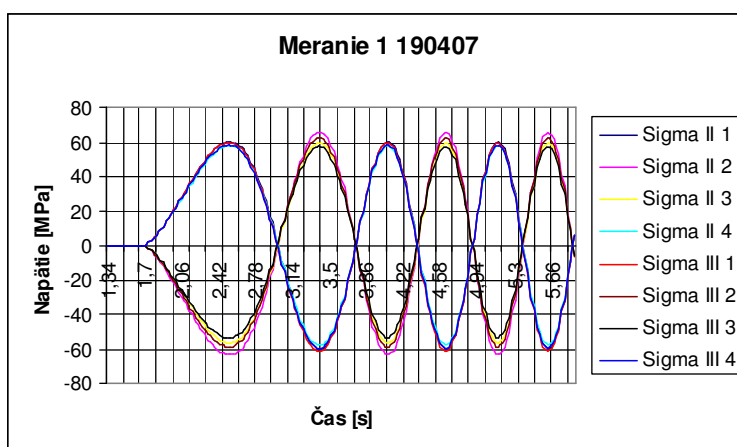
Pružiny II a III po očiachovaní v trhacom stroji boli po inštalácii na upínacie zariadenia nainštalované do rámu a podrobené skúšaniam (pozri obr.22).

Meranie bolo realizované na skúšobnom stende. Pružina III bola zabudovaná na stranu pohonu, pričom pri oboch pružinách bola dodržaná zásada, že snímač označený číslom 4 bol nainštalovaný na strane kontilinky. Po vynulovaní jednotlivých tenzometrov bolo meraním zistené, že maximálne hodnoty napätí registrované všetkými tenzometrickými krížmi sa pri kmitaní rámu nachádzajú približne na tých istých úrovniach a rozdiely sa

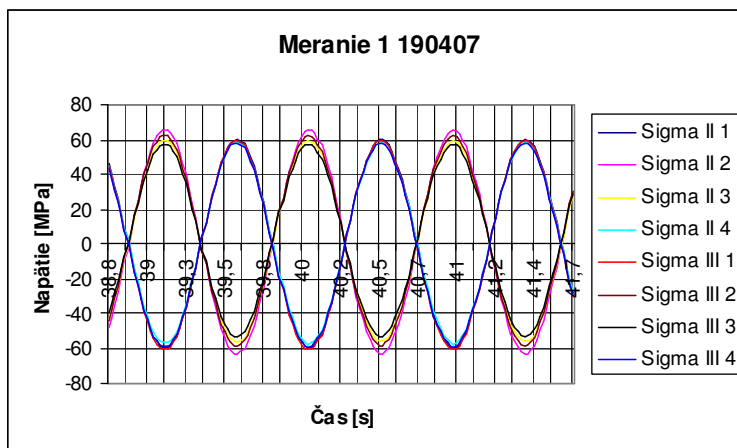
prejavujú v znamienkach napätí, pričom napätia v miestach krajných snímačov majú opačné znamienka ako napätia v miestach snímačov v blízkosti stredu listovej pružiny. Táto skutočnosť je zrejmá z obr.23 a obr.24. kde je časový záznam z merania pri kmitaní rámu.



Obr. 22. Listová pružina III s naaplikovanými tenzometrami zabudovaná do rámu



Obr. 23. Nábeh časového záznamu z merania napätia pri kmitaní rámu

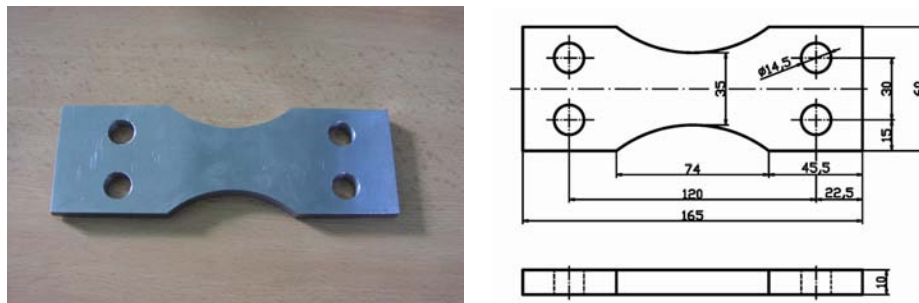


Obr. 24. Časový záznam priebehu napätí z merania pri kmitaní rámu

Merania boli realizované s rámom bez kompenzátorov, s kompenzátorami a následne i s kryštalizátorom. Charakter a veľkosti nameraných napätí ostali nemenné takže týmto postupom bol vylúčený vplyv vertikálneho zaťaženia na veľkosť namáhania listových pružín.

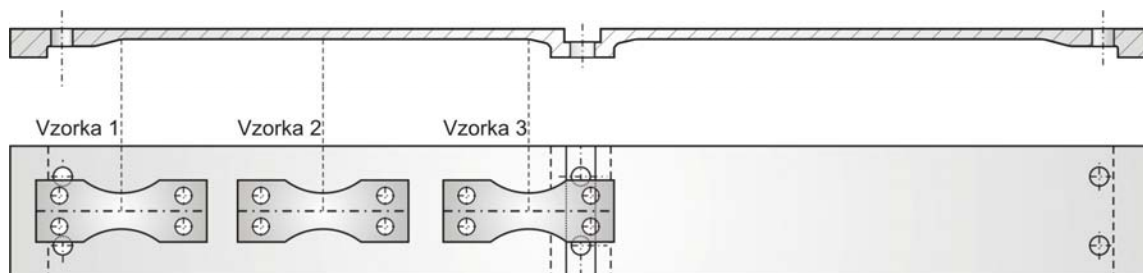
4. Skúšky životnosti na vzorkách vyrobených z porušenej listovej pružiny

Pre skúšky životnosti listovej pružiny boli zvolené postupy využívajúce skúšobný stroj rady PWY od firmy SCHENCK. Pretože listová pružina pri správnom nastavení je zaťažovaná striedavo súmerným ohybom bol tento postup použitý aj pre tento stroj. Pre vzorky boli zvolené rozmery podľa obr.25.



Obr. 25. Rozmery vzorky pre plochý ohyb

Pre zohľadnenie vrubových účinkov boli vzorky s rozmermi podľa obr.25 vyrobené z listovej pružiny IV podľa schémy na obr.26.



Obr. 26. Schéma výberu vzoriek pre skúšky životnosti z listovej pružiny s trhlinou na okraji

Na rovinných plochách vzoriek 1 až 3 boli v najužšom priereze nainštalované tenzometrické snímače 1-XY91-10/120 s konštantou deformačnej citlivosti $k=2,05$ a s ohmickou hodnotou 120Ω . Tenzometrická mriežka kolmá na os vzorky slúžila pre teplotnú kompenzáciu ale zároveň v zmysle rozšíreného Hookeovho zákona zahrňovala aj vplyv priečnej deformácie. Polohy vzoriek 1 a 3 boli volené tak, aby koncentrátor napätia vyvolaný zmenou hrúbky pružiny bol v najužšom priereze vzorky (obr.27 a obr.28).

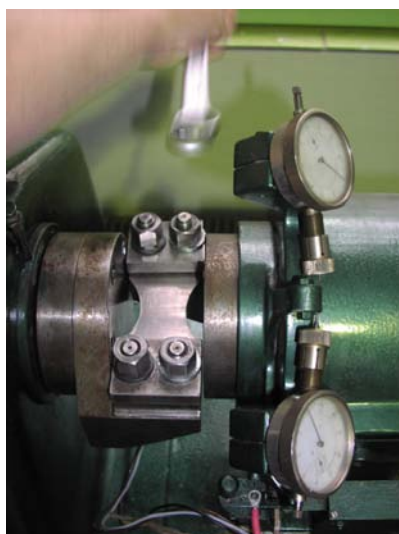


Obr. 27. Vzorka 1 pre skúšku životnosti vybraná z kraja pružiny



Obr. 28. Vzorka 3 pre skúšku životnosti vybraná zo strednej časti listovej pružiny

Na obr.29 je upevnenie skúšobnej vzorky v čeľustiach skúšobného stroja PWY.



Obr. 29. Upevnenie skúšobnej vzorky v skúšobnom stroji PWY

Skúšky životnosti listovej pružiny vychádzali z medze únavy materiálu listovej pružiny podľa Štátneho výskumného ústavu materiálov v Prahe, ktorá pri namáhaní na ohyb striedavo súmerným cyklom je

$$\sigma_{co} = 0,43 R_m .$$

Ak uvažujeme údaje o mechanických vlastnostiach materiálu listových pružín uvedené v kapitole 2, maximálna pevnosť materiálu pružiny dosahuje hodnotu

$$R_m = 1050 \text{ MPa}$$

a teda

$$\sigma_{co} = 0,43 \cdot 1050 = 452 \text{ MPa} .$$

Uvedená hodnota medze únavy platí za predpokladu, že povrch vzorky je leštený. Krajná vzorka bola preto po upevnení do skúšobného stroja podľa obr.29 namáhaná striedavo súmerným ohybom s amplitúdou napätia odpovedajúcou hodnote medze únavy pri striedavo súmernom ohybe. Po vykonaní $2,6786 \cdot 10^6$ zaťažujúcich cyklov bolo jasne preukázané, že medza únavy tohto materiálu prevyšuje túto hodnotu. Ďalej boli zvyšované amplitúdy napätí podľa tabuľky č.1. Po určitom počte cyklov pri definovaných amplitúdach nedošlo k porušeniu vzorky aj keď amplitúdy napätí dosiahli resp. prekročili medzu klzu. Merania potvrdili, že i po prekročení minimálnej pevnosti určenej výrobcom bola vzorka s vrubom (krajná vzorka č.1) porušená až po 1700 cykloch, hoci predtým bola postupne zaťažovaná blokmi zaťaženia, ktoré kumulovali poškodenie vzorky.

Analogicky boli skúšané vzorky 2 a 3. K ich poškodeniu došlo pri dosiahnutí resp. prekročení minimálnej pevnosti až po 7400 cykloch pri hladkej vzorke a 6200 cykloch pri vzorke 3 zo strednej časti listovej pružiny.

Vzorka a meranie	Počet dielikov na odchýlkomerí	M Moment [Nm]	σ Max. nap. [MPa]	Stav počítadla	Počet cyklov	Poznámka
Krajná s vrubom	230 = ± 115	± 170 Nm	± 452	49521400 52200000	2,6786.10 ⁶	Meracie zar. 400 Nm
Krajná s vrubom	280 = ± 140	± 204 Nm	± 547	52200000 52367300	167300	400 Nm
Krajná s vrubom	125 = ± 62,5	± 235 Nm	± 630	52367300 52374700	7400	1000 Nm
Krajná s vrubom	140 = ± 70	± 262 Nm	± 700	52364700 52378700	4000	1000 Nm
Krajná s vrubom	150 = ± 75	± 280 Nm	± 750	52378700 52383500	4800	1000 Nm
Krajná s vrubom	164 = ± 82	± 310 Nm	± 830	52383500 52389300	5800	1000 Nm
Krajná s vrubom	174 = ± 87	± 325 Nm	± 870	52389300 52391300	2000	1000 Nm
Krajná s vrubom	182 = ± 91	± 335 Nm	± 897	52391300 52393000	1700	1000 Nm Lom
Vzorka rovná	192 = ± 96	± 355 Nm	± 951	52401600 52409000	7400	1000 Nm Lom
Vzorka s vrubom stred	182 = ± 91	± 335 Nm	± 897	52393800 52400000	6200	1000 Nm Lom

Tab. 1 Nastavené parametre a počet cyklov striedavo súmerného zaťaženia

Na obr.30 je znázornený lom vzorky 1. Z lomovej plochy je zrejmé, že sú v nej obsiahnuté vmestky viditeľné voľným okom ktoré vznikli s najväčšou pravdepodobnosťou nesprávnou technológiou výroby. Nehomogénna štruktúra materiálu sa vyskytuje vo viacerých bodoch priečného prierezu (pozri obr.30).

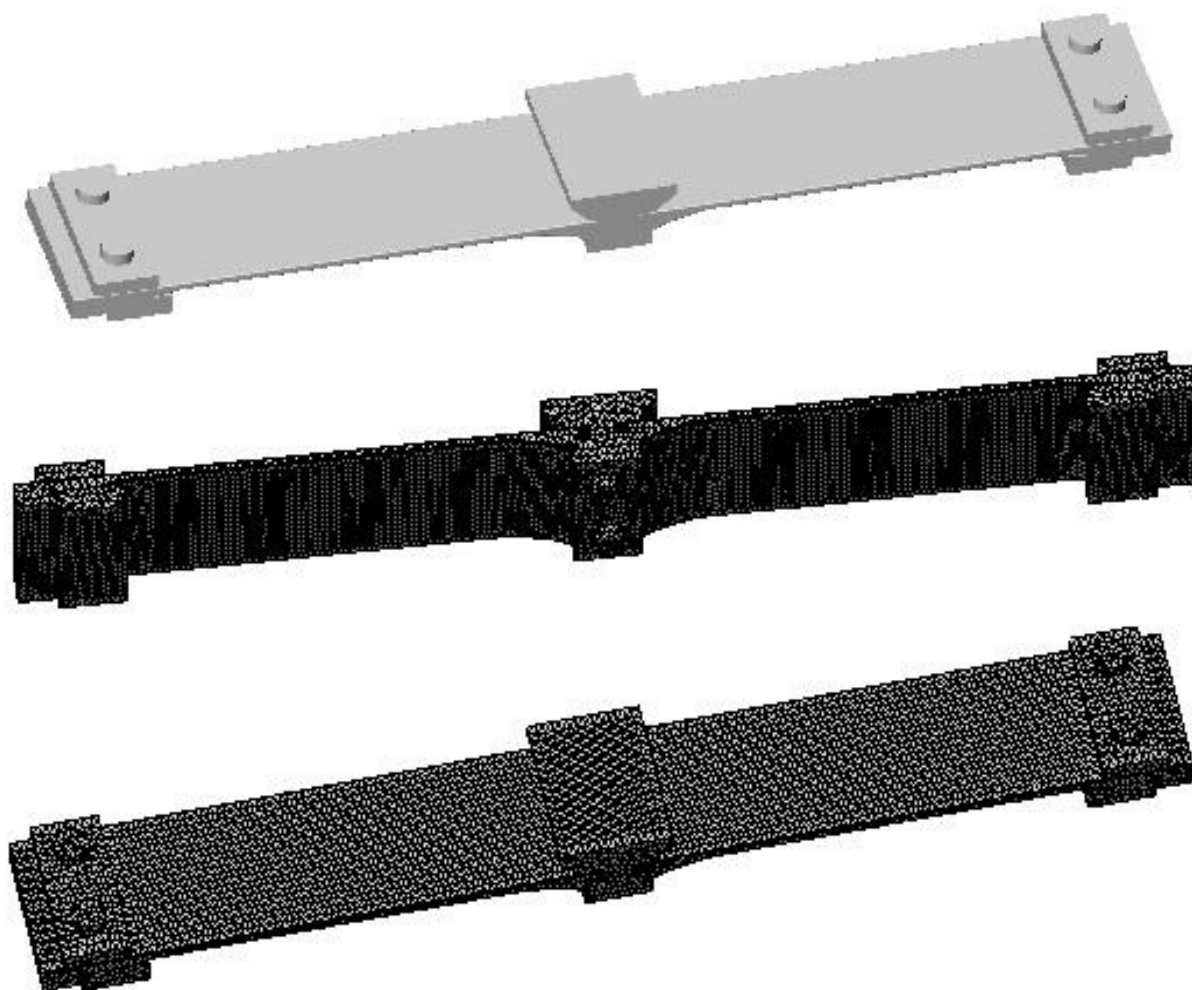


Obr. 30. Lomová plocha krajnej vzorky č.1

5. Modelová analýza MKP

Pre analýzu napätových a deformačných pomerov v listovej pružine boli použité profesionálne programové produkty pre metódu konečných prvkov, ktorých licencie vlastní Katedra aplikovanej mechaniky a mechatroniky, Strojníckej fakulty Technickej univerzity v Košiciach. Pomocou metódy konečných prvkov bola namodelovaná listová pružina s väzbami na koncoch aj v stredovej časti dostatočne verifikované experimentom.

Model pružiny a rozdelenie na konečné prvky je na obr.31. Počet prvkov na ktoré bola listová pružina rozdelená je 60 289 a počet uzlov 97 664.



Obr. 31. Rozdelenie pružiny na konečné prvky (pohľad zospodu i zvrchu)

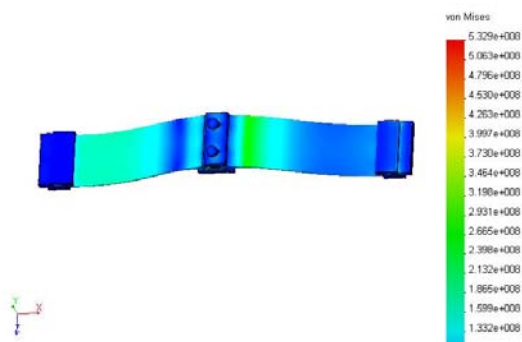
Z výkresovej dokumentácie a z prevádzkových pokynov podľa excentricít nastavených na strane otočného stojana i na strane kontilinky vyplýva, že deformácia listovej pružiny v stredovej časti vo vertikálnom smere je 2,95 mm. Pre tento vertikálny priehyb ako deformačný parameter boli riešené otázky napäťových pomerov na listovej pružine. Pre listovú pružinu ktorej os zvierá s horizontálnou rovinou uhol $5,71^\circ$ sú na obr.32 a obr.33 znázornené napäťové polia odpovedajúce maximálnej hodnote vertikálneho posunutia 2,95 mm.

Zost-4295u5 - Static Nodal Stress
Units : N/mm² Deformation Scale 1 : 34.0754



Obr. 32. Pole redukovaných napätí na hornej strane pružiny

Zost-4295u5 - Static Nodal Stress
Units : N/mm² Deformation Scale 1 : 34.0754



Obr. 33. Pole redukovaných napätí na spodnej strane pružiny

6. Záver

Analýzou dosiahnutých výsledkov ktoré vyplynuli z analytických, numerických a experimentálnych postupov bolo zistené, že listové pružiny v mechanizme kmitania sú z hľadiska bezpečného prevádzkovania pri bežných pracovných režimoch vyrobené z vyhovujúceho materiálu a ich rozmery a uloženie by mali v plnom rozsahu zabezpečovať správnu činnosť kontilinky.

Poruchy – lomy týchto pružín dokumentujú, že stavy pri ktorých dochádza k týmto javom nie sú bežnými prevádzkovými stavmi a preto nie je potrebné meniť rozmery a materiál pružín ani spôsob ich uloženia ale odstrániť javy ktoré vyvolávajú nadmerné zaťaženia, predovšetkým v okamihu ich spúšťania.

Pod'akovanie: Autori ďakujú grantovej agentúre MŠ SR za podporu v rámci riešenia projektu č.APVV-99-045105.

Literatúra

- [1] ASTM Standard E 837-01. *Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2002.
- [2] Fürbacher, I. a kol.: *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty*. VERLAG DASHÖFER, 1999.
- [3] TECH NOTE 503-6. *Measurement of Residual Stresses By The Hole-Drilling Strain Gage Method*. Measurement Group, Inc. 2003
- [4] Trebuňa, F. a kol.: *Riešenie problematiky praskania plochých pružín rámov kmitania ZPO. Záverečná správa*. TU v Košiciach. 2007
- [5] Trebuňa, F., Šimčák, F.: *Kvantifikácia zvyškových napätí tenzometrickými metódami*. Grafotlač Prešov, 2005.