

EXPERIMENTAL AND COMPUTATION ANALYSIS OF THE LOADING ON THE FOLDING STAIRCASE

EXPERIMENTÁLNÍ A VÝPOČTOVÁ ANALÝZA NAMÁHÁNÍ SKLÁDACÍCH STROPNÍCH SCHODŮ

Milan Růžicka, František Valenta¹, Pavel Šterba²

The computational analysis of the loading parameters on the folding staircase arm was made. It was verified using static and dynamic experimental strain-gauge measurement. FEM-analysis on the three different models and shape optimisation was performed. The Monte Carlo probabilistic simulation of the loading cases and material parameters was applied. It showed, that the safety factor of the staircase arm increased with a new design and that the reliability is sufficient.

Keywords: folding staircase, loading analysis, shape optimisation, probabilistic simulation

Úvod

Metody experimentální analýzy deformací a napětí, určování tuhosti konstrukcí i měření jejich dynamické odezvy jsou jednou z důležitých etap návrhu a optimalizace konstrukcí. Využití metod integrovaného inženýrství na fakultě strojní ČVUT v Praze lze demonstrovat na problematice posouzení bezpečnosti, experimentálního určení namáhání a analytického výpočtu skládacích schodů vyrobených z hliníkové slitiny. Součástí řešení byl dále výpočet napětí v páce, která tvoří základní stavební prvek schodů, pomocí metody konečných prvků (MKP) za účelem určení bezpečnosti a optimalizace tvaru páky pro návrh nové lící formy.

Schody se skládaly ze 13 schodnic, horního rámu s víkem a zábradlí (stahovací tyč). Výška montáže do stropu místnosti byla předepsána na $H=3200$ mm a roztažení schodů v horizontálním směru na délku $B=146$ cm. Pro dokumentaci slouží pohled na Foto 1.1. Stavební prvky schodů (páky) jsou vyrobeny z hliníkové slitiny GD-AlSi9Cu3 s mezí pevnosti $R_m=275$ MPa a mezí kluzu $R_e=190$ MPa. Pro početní a experimentální kontrolu byly vybrány dva kritické řezy (A-A 12 mm a B-B 62 mm od středu páky, viz obr. 1).

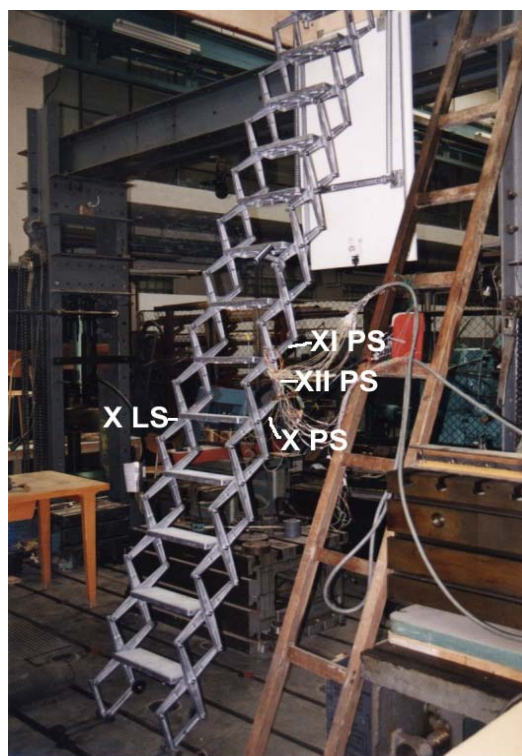


Foto 1 Pohled na schody a vyznačení měřených pák na levé a pravé straně bočnice

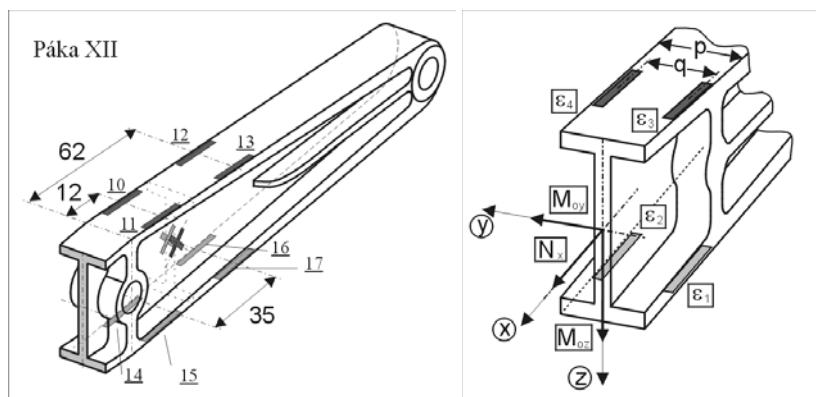
¹ ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Technická 4, 166 07 Praha 6, ruzicka @fsid.cvut.cz

² ÚVMV, Lihovarská 12, 180 68 Praha 9, sterba@uvmv.cz

Experimentální analýza namáhání pák schodů

Statická měření

Pro měření namáhání bylo instalováno 22 tenzometrů v osovém směru na páky č X a XI a XII pro měření normálových složek napětí a dva tenzometrické kříže pro měření napětí v krutu. Bylo použito měřicí ústředny UPM 60 (výrobce firma Hottinger Baldwin Messtechnik, SRN).



Obr. 1 Schéma umístění tenzometrů a zavedení souřadného systému a veličin

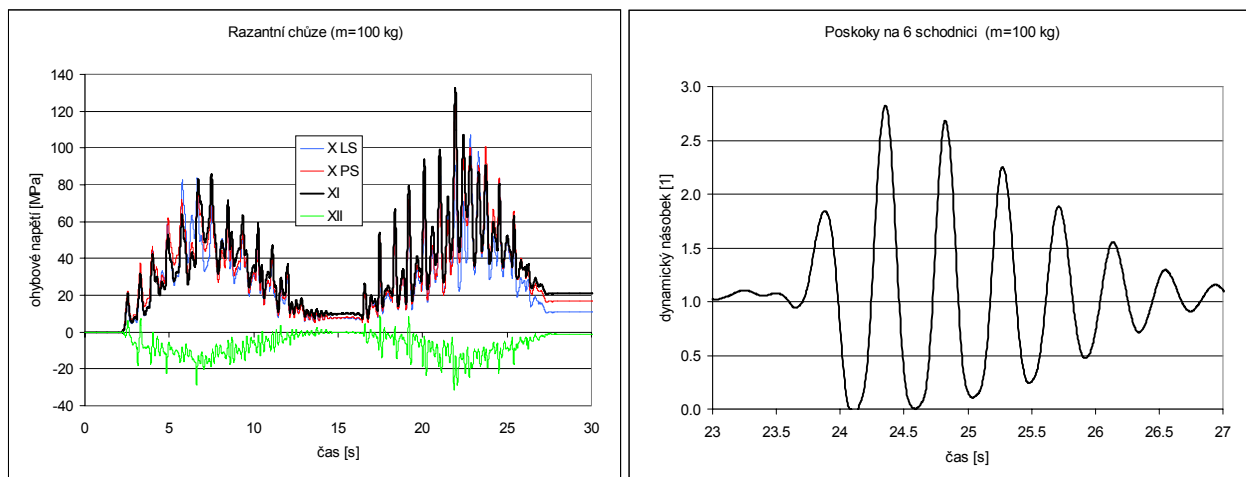
Na základě měřených poměrných deformací ε_1 , ε_2 , ε_3 a ε_4 na čtyřech tenzometrech instalovaných do daného řezu profilu páky byla vyhodnocena napětí od tahové vnitřní síly σ_x a ohybová napětí σ_y a σ_z od ohybových momentů. M_{oz} a M_{oy} . Měření smykového napětí τ bylo prováděno pomocí dvou tenzometrických křížů zapojených do celého mostu.

Měření byla prováděna při různých polohách zátěže a roztažení schodů. Ukázalo se, že vnější páky (které při roztažení zaujímají polohu blízkou vertikální poloze) jsou namáhány ohybovým napětím vůči oběma hlavním osám průřezu. Příčný ohyb vůči ose z v nich může být dokonce větší, než ohyb v vůči ose y . U vnitřních pák naopak převládá ohybové napětí vůči ose y . U této páky je rovněž nižší podíl napětí tahových (tlakových). Největší redukované napětí bylo určeno na páce č. XI to 67,6 MPa (vztaženo k max. zatížení schodů).

Dynamická měření

Statická měření nepodchycují dynamický účinek, který působí při chůzi po schodech. Proto byla realizována měření, kdy je snímán časový záznam při zatěžování, jenž umožní vyhodnotit největší špičky působícího zatížení při chůzi pokusné osoby po schodech. Protože dominantní složku namáhání u vnitřních pák tvoří ohybové napětí vůči ose y , mohly být sledovány čtyři měřicí kanály se zapojením tenzometrů do půlmůstku. Bylo použito dynamické měřicí ústředny DMC Plus (výrobce HBM) s měřicím a vyhodnocovacím softwarem. Vzorkovací frekvence všech dynamických měření byla zvolena 300 Hz, což je dostatečné pro zaznamenání lokálních špiček napětí, které se mohou vyskytnout během chůze po schodech. Zatěžování realizovala testovací osoba s hmotností dokalibrovanou na $m=100$ kg. Bylo měřeno několik režimů (normální chůze, razantní došlapování, poskoky), viz obr. 2.

Z výsledků vyplývá, že dynamický součinitel násobku nominálního napětí činí $k_{dyn}=1,2$. Při razantní chůzi je tento součinitel $k_{dyn}=1,6$ při chůzi nahoru a 1,9 až 2,1 při chůzi dolů. Ještě vyššího dynamického koeficientu $k_{dyn}=2,3$ bylo dosaženo při chůzi směrem dolů s razantním dupnutím, kdy spolupůsobí k silovému účinku nohy i složka vlastní tíhy a navíc se schody dostávaly do rezonance s kroky. Největší dynamický účinek s koeficientem překračujícím hodnotu $k_{dyn}=2,9$ byl vybuzen skoky na schodnici, viz obr. 2. Při značně extrémních skocích byl naměřen 3,9 až 4,1. Pro výpočtový návrh schodů lze doporučit uvažovat dynamický součinitel alespoň 2,0, aby postihoval možnost výskytu rezonančního režimu i při normální chůzi osoby nižší hmotnosti a zvýšení dynamického účinku při chůzi ze schodů dolů.



Obr. 2 Časový záznam napětí na měřených pákách v řezu B-B, detail dynamického násobku

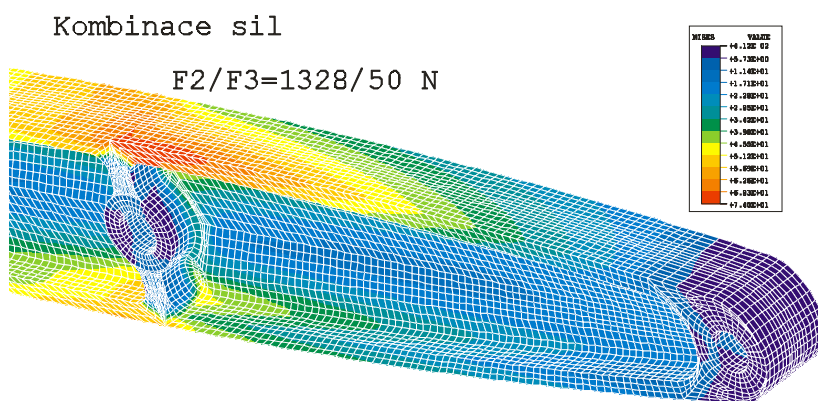
Analytické výpočty namáhání pák schodů

Pro posouzení namáhání pák bočnic schodů byl vypracován počítačový program pro určování silových a momentových účinků, které na ně v místě každého spojení působí. Kromě podmínek globální rovnováhy, z nichž lze určit reakce v uložení schodů je třeba řešit systém n -lineárních rovnic. Počet rovnic vyplývá z počtu polí schodů, které jsou uvažovány až do místa řezu určování vnitřních silových účinků. Např. pro řez vedený za šestým schodem, je uvažováno 12 pák, na které působí celkem 18 neznámých reakcí. Pro každou páku lze napsat dvě složkové rovnice rovnováhy a jednu rovnici momentovou. Dostáváme tak 36 lineárních rovnic, jejichž řešením určíme hledané silové účinky a napětí v kritických řezech. Z analytických výpočtů vyplývá, že pro původní provedení pák bočnic schodů je namáhání v řezu A-A přibližně stejné jako v řezu B-B. Porovnáme-li naměřené hodnoty s výpočty, vychází výpočet mírně nekonzervativní. Např. z naměřených hodnot vychází redukované napětí v řezu B-B u nejnamáhanější páky č. XI pro počítanou variantu zatížení 52,8 MPa, zatímco výpočet dává 47,4 MPa. Provedeme-li výpočet pro nově navržený tvar páky (viz dále), vychází v analogických řezech pokles napětí na 92 % původní hodnoty v řezu A-A a na 85 % v řezu B-B.

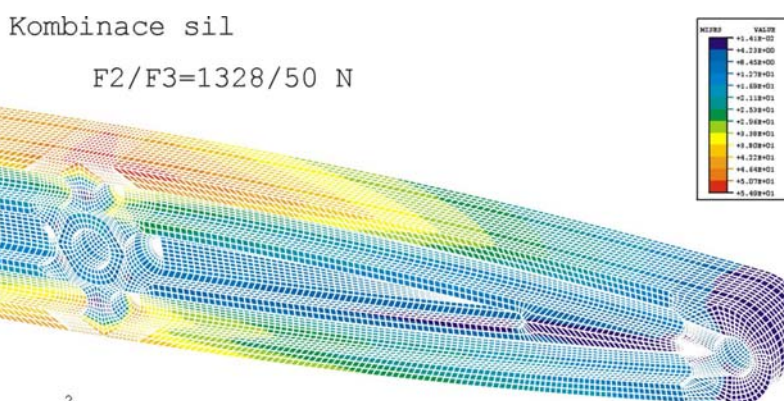
Analýza napětí metodou konečných prvků

Analýza napětí MKP byla provedena za účelem určení možných lokálních koncentrací v radiusech profilu páky bočnice a pro posouzení stavu napjatosti při kombinovaném namáhání páky v jejím reálném tvaru. Zadavatelem byl dodán výkres upraveného tvaru páky, který byl modelován metodou konečných prvků (MKP), pod označením *design 1*. Během řešení se ukázalo, že bude potřebné dále upravit příčný průřez páky tak, aby se zvýšila odolnost vůči příčnému zatížení (ohyb kolem osy z). Při tvarové optimalizaci byly generovány další modely MKP označené jako *design 2* a *design 3*. Návrh dalších variant spočíval v optimalizaci tloušťky pásnic a ve vložení žeber, které vyztužují páky proti ohybu v příčné rovině schodů.

Pro výpočet byl použit program ABAQUS. Materiál byl uvažován jako ideálně elastický, výpočet byl proveden s uvažováním velkých deformací. Model páky byl uložen v otáčivém čepu uprostřed délky páky. Středový čep páky byl fixován tak, aby umožňoval pouze otáčení páky kolem osy čepu. Na jednom konci byly zaváděny silové účinky, druhý konec páky byl opřen o pevnou podporu. Model obsahoval cca 110 000 elementů.



DISPLACEMENT MAGNIFICATION FACTOR = 1.00
 RESTART FILE = kombi STEP 1 INCREMENT 6
 TIME COMPLETED IN THIS STEP 1.00 TOTAL ACCUMULATED TIME 1.00
 ABAQUS VERSION: 5.8-6 DATE: 23-MAY-2001 TIME: 17:39:47



DISPLACEMENT MAGNIFICATION FACTOR = 1.00
 RESTART FILE = paka-u-kombi STEP 1 INCREMENT 6
 TIME COMPLETED IN THIS STEP 1.00 TOTAL ACCUMULATED TIME 1.00
 ABAQUS VERSION: 5.8-6 DATE: 18-OCT-2001 TIME: 17:52:54

Obr. 3 Výsledky MKP (σ_{HMH}) pro varianty *design 1* a *design 3*

Byly počítány tři zatěžovací stavy

1. Simulace ohybu kolem osy y (osa 3) při zatížení „jednotkovou“ silou $F_2 = 1000$ N.
2. Simulace ohybu kolem osy z (osa 2) při zatížení „jednotkovou“ silou $F_3 = 1000$ N.
3. Kombinace obou silových účinků, která byla odvozena od experimentálně určeného namáhání páky původního tvaru $F_2 = 1328$ N, $F_3 = 50$ N.

Některé výsledky výpočtů shrnuje tab. I.

Tab. I Přehled špiček napětí určených na modelech MKP

zatěžovací stav	hodnocená veličina	design 1	design 3	poměr 3/1
1	σ_x	48,1	39,1	0,81
2	σ_x	37,9	22,3	0,58
3	σ_x	72,7	54,7	0,75
3	σ_{MISES}	74,0	54,9	0,73

Je odtud zřejmé, že tvarovou úpravou profilu páky (bez změny její hmotnosti) se výrazně zvýšila tuhost v příčném ohybu páky, což vedlo k poklesu složky napětí v ose x a to až o 42 procent! Pro výsledný zatěžovací stav 3 to představuje pokles namáhání o 27 procent. MKP model původního a výsledného návrhu ukazuje obr. 3.

Analýza možné pravděpodobnosti poruchy

Aby bylo možno odhadnout bezpečnost proti lomu páky bočnice a zvýšení bezpečnosti provedenou úpravou byla simulována metodou Monte Carlo pravděpodobnostní analýza vzniku takového lomu. Při modelování se vycházelo z generování náhodných případů chůze po schodech osoby různé (náhodné) hmotnosti při různém (náhodném) ustavení schodů. Dále byly náhodně vybírány možné režimy chůze po schodech, jimž byl přiřazen experimentálně určený dynamický součinitel. Podle výsledků statických zkoušek výrobce byly náhodně generovány konkrétní pevnostní vlastnosti použitého materiálu nejnamáhanější páky. Pro všechny generované veličiny byla předpokládána platnost Gaussova normálního rozložení pravděpodobnosti. Některé generované parametry a odpovídající napětí v kritickém místě pro dvě varianty výpočtu: pro původní páku a pro upravenou páku **design 3**, udává tab. II.

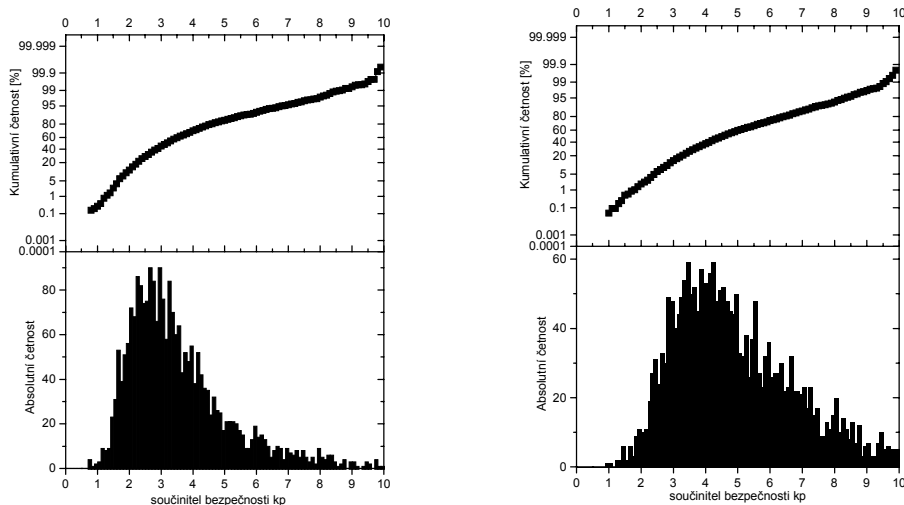
Tab. II Přehled uvažovaných statistických parametrů náhodné simulace

<i>vlastnost</i>	<i>střední hodnota</i>	<i>kvantil pro 1%</i>	<i>směr. odchylka</i>
pevnost materiálu [MPa]	275	240	190
hmotnost osoby [kg]	80	120	17,2
Provozní napětí [MPa] pro m=100 kg (původní páka)	68,6	130	26,4
Provozní napětí [MPa] pro m=100 kg (upravená páka – design 3)	45,5	86,2	17,5

Z náhodně generovaných hodnot pevnosti a okamžitého provozního napětí daného případu použití schodů byl vypočten součinitel bezpečnosti vůči statickému lomu. Bylo vygenerováno celkem 2500 případů použití schodů a tedy stejný počet těchto možných součinitelů. Pro takto získaná data velikosti součinitele pevnosti byla vykreslena absolutní a relativní kumulativní četnost výskytu součinitele dané velikosti. Řešení bylo provedeno pro původní a nově navrženou variantu páky. Toto srovnání ukazuje distribuce zobrazená na obr. 5. Je odtud patrné, zatímco pro původní variantu je modus (nejčetnější hodnota) součinitele bezpečnosti rovna $k_p=2,65$. Pro upravený návrh **design 3** se součinitel bezpečnosti zvýšil na $k_p=3,45$. Pravděpodobnost lomu na při součiniteli $k_p=1$ lze z diagramu odečíst na 0,4% , variantu původní a zatímco pro **design 3** je pouze 0,02%. Znamená to tedy, že pouze u 2 případů z 10 tisícové série výrobků hrozí možnost překročení meze pevnosti při některém režimu provozování takto upravené páky. Tuto pravděpodobnost lze považovat za dostatečně nízkou zejména s ohledem na fakt, že byly uvažovány i extrémní podmínky zatěžování.

Závěr

Integrace klasických analytických metod výpočtu s aplikací MKP a experimentální analýzou namáhání vedla k efektivnímu vytvoření návrhu nového tvaru páky skládacích stropních schodů, podle něhož bude vyráběna nová forma pro přesné lití. Analytické propočítání řady variant bylo podpořeno určením lokálních napětí na modelech MKP, jež bylo experimentálně verifikováno. Pro experimentálně určené zatěžovací podmínky při různém způsobu zatěžování schodů a s uvážením rozptylů pevnostních vlastností materiálu byly analyzována bezpečnost proti porušení. Došlo k jejímu potřebnému navýšení oproti původní variantě výrobku.



Obr. 5 Výsledky simulace součinitele bezpečnosti proti porušení pro původní a novou variantu *design 3* páky bočnic schodů

Literatura:

- [1] Valenta, F. - Růžička, M. - Doubrava, K.: Experimentální a výpočtová analýza namáhání skládacích stropních schodů. [Výzkumná zpráva]. Praha : ČVUT, Fakulta strojní, 2001. ČVUT-FS 2051/01/10. 66 s.
- [2] Boháč, M.: Statistika pro techniky, SNTL, Praha 1984.
- [3] Papuga, J. - Růžička, M. - Španiel, M.: Software Solution of Fatigue Damaging Based on the FE Analysis Results Utilization. In: Abstracts of 8th Inter. Conference on Numerical Methods in Continuum Mechanics. Žilina: University of Žilina, Mechanical Engineering Faculty. 2000. p.138-140. - ISBN 80-968368-1-1

Tento příspěvek byl vypracován za podpory výzkumného záměru J04/98:212200008.