

# ANALÝZA ZLOMENÉHO ZÁVESNÉHO OKA

## ANALYSIS OF DAMAGED MOUNTING LUG

Marian HAZLINGER, Roman MORAVČÍK

*Autor:* **Doc. Ing. Marian Hazlinger, CSc., Ing. Roman Moravčík, PhD.**  
*Pracovisko:* **Ústav materiálov, Katedra materiálového inžinierstva,  
Materiálovotechnologická fakulta STU**  
*Adresa:* **J. Bottu 25, 917 24 Trnava**  
*Tel.:* **+421 918 646 038**  
*e-mail:* **[marian.hazlinger@stuba.sk](mailto:marian.hazlinger@stuba.sk), [roman.moravcik@stuba.sk](mailto:roman.moravcik@stuba.sk)**

### Abstract

*Článok sa zaoberá analýzou zlomeného závesného oka s využitím fraktografickej, metalografickej a chemickej analýzy. Analyzovali sa príčiny krehkého porušenia súčiastky, ktorá má v praxi spĺňať určité požadované pevnostné vlastnosti. Príčin krehkého porušenia závesného oka bolo identifikovaných viacero.*

*The article deals with the analysis of damaged mounting lug by using of the fractographic, metallographic and chemical analysis. Brittle failure causes of mounting lug are analysed. Mounting lug must fulfil the some strength properties in praxis. Several different brittle failure causes of the mounting lug were identified.*

### Key words

*transkryštalický krehký lom, fraktografia, analýza mikroštruktúry, skrehnutie materiálu, starnutie ocele*

*transgranular brittle fracture, fractography, microstructure analysis, material embrittlement steel, ageing.*

### Úvod

Lom patrí k najdôležitejším materiálovým charakteristikám kovových materiálov. Najvýstižnejšie ho možno definovať ako nevratnú kohéziu častíc materiálu v určitej jeho časti alebo v celom priereze telesa. Lomom sa teleso rozdelí na dve alebo viac častí, pričom sa vytvárajú nové povrchy – lomové plochy. Iniciácia a šírenie lomov môžu byť ovplyvnené viacerými faktormi. Medzi základné patrí samotný materiál súčiastky, ale aj technologické procesy pri jeho spracovaní [1 ÷ 5]. Často sa obidva tieto základné faktory podceňujú, obzvlášť sa neprikladá patričný dôraz na správnosť technologického spracovania materiálu súčiastky. Poškodenými zinkovanými súčiastkami sa zaoberajú aj rôzni autori vo svojich prácach [6 ÷ 8].

## Analýza zlomenej súčiastky

Pohľad na predloženú zlomenú súčiastku – závesné oko, ktoré sa zlomilo pri aplikácii (montáži) v praxi, hneď na začiatku používania, je uvedený na obr. 1. Zlomenie súčiastky je veľmi nebezpečné, pretože závesné oko má v praxi splniť požadované pevnostné vlastnosti, využíva sa pri stavbe konštrukcií zabezpečujúcich osvetlenie. Cieľom analýzy bolo zistiť príčinu poškodenia súčiastky.

Makroskopicky lomová plocha súčiastky (obr. 2) vykazuje znaky krehkého porušenia. Z vonkajšej strany súčiastky v blízkosti lomu (obr. 3) boli súbežne s okrajom lomu pozorované viaceré povrchové trhlinky na žiarovo zinkovanej vrstve (montážou v praxi bola súčiastka deformovaná a na vonkajšej strane pásu spôsobili ťahové napätia porušenie zinkovanej vrstvy).



**Obr. 1.** Celkový pohľad na zlomenú súčiastku



**Obr. 2.** Makroskopický pohľad na lomovú plochu menšej časti závesného oka



**Obr. 3.** Plocha pásu v blízkosti lomu. Z vonkajšej strany pásu pozorovať trhliny na žiarovo zinkovanej vrstve.

Závesné oko bolo vyrobené z materiálu S235JRG2. Chemické zloženie materiálu analyzované prístrojom Spectrotest vyhovovalo predpisu v norme, a je uvedené v tabuľke 1.

chemický prvok	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	W	B
obsah prvku [hm. %]	0,17	0,51	0,17	0,013	0,013	0,03	0,04	0,011	0,0001

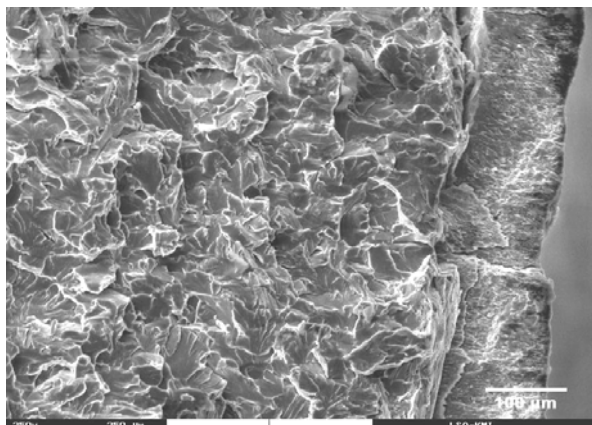
chemický prvok	Cu	Mo	V	Ti	Al	Sn	N	Pb	As
obsah prvku [hm. %]	0,06	0,01	0,001	0,001	0,003	0,001	0,0065	0,002	0,001

Technologický postup výroby závesného oka bol nasledovný:

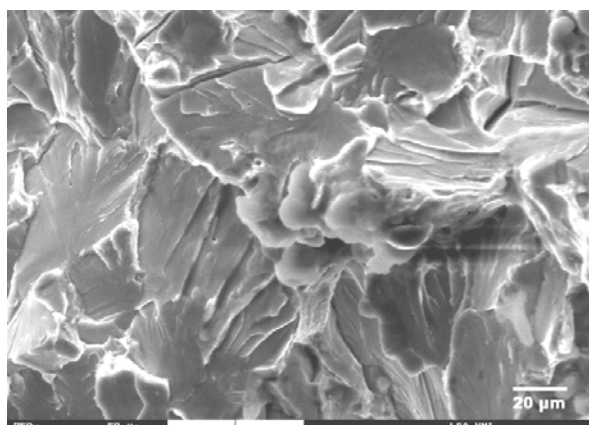
- delenie oceľového pásu 50x8mm na dĺžku 447 mm,
- vrtanie otvorov  $\phi$  18 mm a  $\phi$  21 mm,
- ohnutie oceľového pásu podľa výkresu v špeciálnom prípravku pod lisom LEN 100,
- privarenie skrutky M20 x 40,
- žiarové zinkovanie v odstredivke pozostávajúce:
  - v odmastení závesného oka,
  - čas morenia 1 - 2 hodiny v kyseline,
  - sušenie v sušičke pri teplote 450 °C, čas ~ 15 minút,
  - ponorenie do kúpeľa P-Zn70 ~ 1 minútu,
  - odstredenie a ponorenie do vody.

Vzorka z lomovej plochy závesného oka bola odrezaná rozbrusovacím kotúčom s chladením vodou, očistená acetónom v ultrazvukovej čističke a analyzovaná riadkovacím elektrónovým mikroskopom typ TESLA BS 300.

Na obr. 4 je uvedená lomová plocha, kde možno vpravo na fotografii pozorovať povrchovú žiarovo zinkovanú vrstvu. Podrobnejšie analýzy povrchových vrstiev boli analyzované v nasledovných prácach [9 ÷ 11]. Lomová plocha ocele závesného oka (obr. 5) vykazuje štiepny mikromechanizmus porušenia, zodpovedajúci typickému krehkému lomu [12].



**Obr. 4.** Lomová plocha základného materiálu a vpravo žiarovo zinkovanej vrstvy, REM

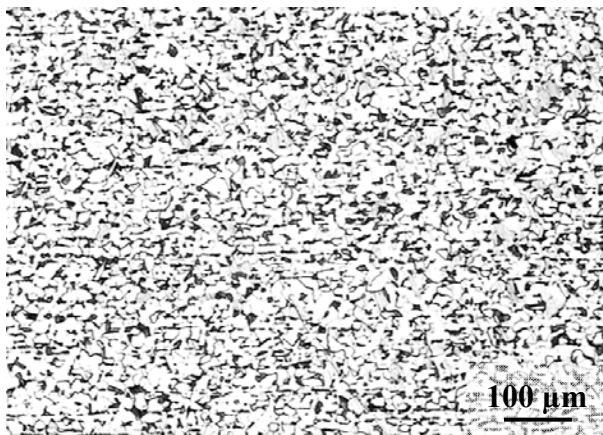


**Obr. 5.** Krehký lom ocele závesného oka so štiepnym mikromechanizmom porušenia, REM

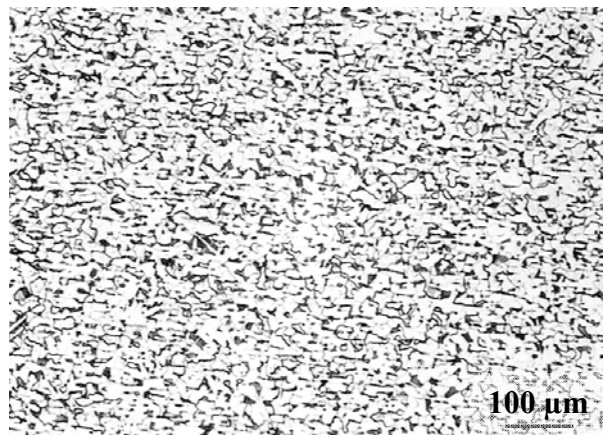
Vzorky pre analýzu mikroštruktúry boli odobraté v pozdĺžnom a priečnom smere zlomenej súčiastky, zaliate do Duracrylu, pripravené brúsením za mokra, leštené diamantovými pastami a naleptané 3 % -ným Nitalom. Analýza sa uskutočnila s využitím svetelného mikroskopu typ Neophot 30 pri zväčšení 100 až 1000x. Mikroštruktúra základného materiálu v priečnom

a pozdĺžnom smere je jemnozrnná feriticko-perlitická (obr. 6 a 7) a vyhovuje oceli S235JRG2 s nízkym obsahom uhlíka.

Príčin poškodenia závesného oka je s najväčšou pravdepodobnosťou viac. Jedným z pravdepodobných dôvodov prečo vznikol krehký lom, je negatívny vplyv dusíka. Dusík v oceliach s nízkym obsahom uhlíka spôsobuje starnutie, a tým zvyšuje náchylnosť ocele na krehký lom. Dusík sa do ocele dostáva pri výrobe ocelí. Pri izbových teplotách sa vylučuje na hraniciach zŕn a na sklzových rovinách v podobe nitridu  $Fe_4N$  a spôsobuje starnutie ocele. Predpokladalo sa, že materiál závesného oka bol vystavený podmienkam starnutia, a z toho dôvodu sa aplikovalo tepelné spracovanie, ktoré malo za úlohu simulovať podmienky urýchleného starnutia materiálu. Pred tepelným spracovaním bola na odobratej vzorke zo súčiastky vyhodnotená tvrdosť metódou Vickers prístrojom typ Zwick 3212 podľa normy STN ISO 409-1 pri zaťažení 98 N. Rovinná plocha bola pred meraním pripravená brúsením za mokra. Hodnoty tvrdosti východiskového materiálu sú uvedené v tabuľke 2.



**Obr. 6.** Jemnozrnná feriticko-perlitická mikroštruktúra, pozdĺžny smer, leptané 3% Nital



**Obr. 7.** Jemnozrnná feriticko-perlitická mikroštruktúra, priečny smer, leptané 3% Nital

Potom sa realizovalo tepelné spracovanie – žihanie na teplote 600 °C s výdržou 40 minút. Použitá bola laboratórna elektrická komorová pec. Po uplynutí času žihania bola súčiastka rýchlo ochladená do studenej vody, aby sa získal presýtený tuhý roztok. Z povrchu vzorky bolo cca 1,5 mm odobraté frézovaním z dôvodu eliminácie ovplyvneného povrchu súčiastky pri žihaní. Po brúsení plochy vzorky na brúsnych papieroch 120 až 1200 za mokra bola vyhodnotená tvrdosť bezprostredne po žihaní, a potom neskôr po uplynutí 400 a 900 hodín od procesu žihania. Namerané hodnoty sú na porovnanie s východiskovým stavom uvedené v tabuľke 2.

HODNOTY TVRDOSTI VZORKY VÝCHODISKOVÉHO STAVU, STAVU PO ŽÍHANÍ A PO UPLYNUTÍ ČASOVÉHO INTERVALU 400 A 900 HODÍN

Tabuľka 2

stav vzorky	tvrdosť HV 10					priemerná hodnota
východiskový stav	216	219	215	216	216	216
stav po žíhaní	180	177	185	181	172	179
po uplynutí časového intervalu 400 hodín	181	183	185	193	193	187
po uplynutí časového intervalu 900 hodín	194	193	196	196	196	195

### Diskusia dosiahnutých výsledkov

Cieľom analýzy bolo zistiť príčinu zlomenia závesného oka. Každý lom reálne využívaných súčiastok v praxi je veľmi nebezpečný, ale zvlášť, ak sa jedná o krehký lom a pevnostnú súčiastku, ktorou je aj analyzovaná súčiastka závesného oka. Chemické zloženie ocele vyhovovalo materiálu S235JRG2. Z fraktografickej analýzy sa preukázal krehký lom s typickými fazetami a stupňami štiepenia, ktorý vznikol v mieste ohýbanej časti súčiastky. Lom sa šírila transkrystalicky v celom priereze ocele.

Z hľadiska skrehnutia súčiastky je potrebné uvažovať deformačné starnutie, ktoré sa prejavuje po plastickej deformácii za studena spevnením materiálu z dôvodu zvýšenia hustoty dislokácií, znížením plasticity (závesné oko bolo vyrobené tvárnením oceľového pásu za studena) a následným zohriatím materiálu na teplotu 450 °C v procese žiarového zinkovania. Takýmto postupom sa zvyšuje náchylnosť súčiastky na starnutie.

Starnutie ocelí s nízkym obsahom uhlíka je spôsobené vplyvom uhlíka, ale najmä dusíka, ktorý so železom tvorí nitrídy  $Fe_4N$  vylučujúce sa v oceli na hraniciach zŕn a na sklzových rovinách. Z chemického zloženia ocele sa preukázal obsah dusíka 0,0065 hm. %, ktorý pri tomto obsahu v oceli môže spôsobiť starnutie [13]. Preukázalo sa to aj po tepelnom spracovaní – žíhaní vzorky. Tvrdosť materiálu bezprostredne po žíhaní klesla, a potom sa postupne s časom zvyšovala.

Ďalší výrazný vplyv na skrehnutí ocele závesného oka mal pravdepodobne vodík. Súčiastka bola podľa technologického postupu pred žiarovým zinkovaním morená v kyseline. Morením sa očistí povrch súčiastky pre proces zinkovania, avšak atomárny vodík veľmi rýchlo difunduje do materiálu a po ochladzovaní spôsobuje jeho skrehnutie. Rekombináciou atomárneho vodíka v materiáli môže vzniknúť molekulárny vodík, ktorý nemá takú schopnosť difúzie, v dôsledku čoho vzniká lokálne vysoký tlak, ktorý spôsobuje v materiáli vznik trhliniek. V technologickom postupe výroby súčiastky je určený čas sušenia 15 minút, čo je veľmi krátky čas pre vydifundovanie vodíka z ocele. Z hľadiska predikcie krehkého porušenia by bolo potrebné predĺžiť čas sušenia, aby vodík mal dostatočný čas z ocele vydifundovať. Jednoznačne v technologickom postupe výroby závesného oka chýba žíhanie na odstránenie vodíkovej krehkosti!

Deformačné starnutie materiálu urýchlené ohrevom v procese žiarového zinkovania, a aj starnutie materiálu dôsledkom dusíka zvyšujú prechodovú teplotu ocele, v dôsledku čoho môže pri zaťažení vzniknúť krehký lom aj pri teplote miestnosti.

Materiál súčiastky závesného oka nie je optimálny. Vyrobená oceľ by mala byť dezoxidovaná hliníkom. Hliník ako stabilizačný prvok vytvára s dusíkom stabilnejšie nitridy, ktoré sú pre oceľ priaznivé, a tým zvyšuje odolnosť ocele proti starnutiu. Podľa nemeckého materiálového listu F&S 1.4.036.01 pre ocele odolné proti starnutiu sa uvádza obsah hliníka  $0,020 \div 0,080$  hm. %. Uvedené ocele sa používajú na výrobu súčiastok určených pre automobilový priemysel.

Ocele odolné proti starnutiu možno získať znížením obsahu dusíka v oceliach pod 0,003 hm. %, alebo väzbou dusíka na stabilnú nitridickú fázu, napr. karbonitrid titánu, nióbu, vanádu alebo nitrid hliníka [13].

Mikrolegované ocele majú zvyčajne feriticko–perlitickú štruktúru. Sú to jemnozrné ocele s malou prísadou prvkov Al, Ti, Nb a V (súčet spolu max. 0,15 hm. %). Podstata mikrolegujúcich prvkov súvisí s ich afinitou k uhlíku a dusíku, s rozpustnosťou karbidov, nitridov a karbonitridov v austenite a schopnosťou precipitovať vo forme disperzných častíc v austenite a vo ferite a spôsobiť spevnenie rôznymi mechanizmami [14]. Precipitáty majú tri základné priaznivé vplyvy:

- okrem uhlíka viažu aj intersticiálny dusík, a tým je oceľ odolná voči starnutiu. Taktiež chemické viazanie uhlíka je z hľadiska zvariteľnosti priaznivý faktor, pretože znižuje sa jeho obsah v tuhom roztoku,
- precipitáty zvyšujú pevnosť ocele mechanizmom disperzného spevnenia,
- prítomnosť precipitátov vhodnej veľkosti (~ do 50 nm) zabraňuje migrácii hraníc zŕn po rekryštalizácii a zabraňuje tak rastu zŕn.

Z hľadiska tvárnenia materiálu za studena je vhodné doplniť do výrobného postupu aj defektoskopickú kontrolu vytvarovaných súčiastok. Spevnením materiálu v procese plastickej deformácie a znížením plasticity môžu vzniknúť trhlinky, z ktorých následne v ďalšom výrobnom procese súčiastok, a najmä pri mechanickom zaťažení materiálu v praxi, sa môžu šíriť trhliny a vzniknúť lomy súčiastok.

## Záver

Poškodenie súčiastky s názvom závesné oko pravdepodobne súvisí s viacerými faktormi. Prvým faktorom je samotný materiál, ktorý obsahuje určité množstvo dusíku, a ktorý spôsobuje v takýchto oceliach starnutie. Druhým faktorom ovplyvňujúcim poškodenie je nevhodný technologický postup spracovania materiálu súčiastky, ktorý umožňuje samotný proces urýchleného deformačného starnutia ocele, ale aj zadržanie vodíka po morení v materiáli, čo výrazne prispieva ku skrehnutiu ocele s nízkym obsahom uhlíka.

Je potrebné dbať na výber materiálu pre zhotovenie súčiastky, ale samozrejmosťou je správne určený technologický postup celého spracovania materiálu, aby súčiastka vhodne plnila svoje určenie.

### Zoznam bibliografických odkazov:

- [1] PUŠKÁR, A., HAZLINGER, M. *Porušovanie a lomy súčastí*. Žilina: EDIS ŽU, 2000.
- [2] HAZLINGER, M., MORAVČÍK, R. *Degradačné procesy a predikcia životnosti. Elektronické skriptum*. Trnava: AlumniPress, 2007. ISBN 978-80-8096-031-5
- [3] BEZECNÝ, J. *Vznik trhlín a lomov pri tepelnom spracovaní ocelí*. Trenčín: Trenčianska univerzita A. Dubčeka, 2007.
- [4] HAZLINGER, M. Využitie inštrumentovanej rázovej skúšky pre hodnotenie odolnosti ocelí proti krehkému lomu. In *Vedecké práce MTF STU, zväzok 2*. Bratislava, Vydavateľstvo STU, 1994, s. 123.

- [5] ASM Handbook: Failure Analysis and Prevention. Volume 11, Materials Park, OH 44073-0002, American Society for Metals, 2002.
- [6] CHAO, J., PEŇA, C. Failure analysis of zinc-plated self-drilling screws used to assemble metallic grille panels on a building façade. *Engineering Failure Analysis* (2007) - In press.
- [7] LEŠKO, A., KOLLÁROVÁ, M., PARILÁK, L. Deformation and fracture of hot dip galvanized steel sheets. In *Kovové materiály*, 2002, vol. 40, no. 1, pp. 1 – 10.
- [8] ASM Handbook: Fractography. Volume 12, Materials Park, American Society for Metals, Second Printing, 1992.
- [9] Žiarové zinkovanie. (interný predpis firmy UMAKOV) [online]. [cit. 2008-03-12]. Dostupné na internete <<http://www.umakov.sk/sluzby/zinkovanie.html>>
- [10] ŠVEC, P., SEJČ, P. Zmeny v štruktúre Zn – povlaku pri oblúkovom spájkovaní pozinkovaných plechov. In *Acta Mechanica Slovaca*, 2-B/2004, s. 437-442.
- [11] ŠVEC, P., SEJČ, P. Štúdium celistvosti Zn-vrstvy MIG/MAG spájkovaných spojov pozinkovaných plechov. In *Technológia 2003*, zborník abstraktov. Bratislava: Sjf STU, 2003, s. 105.
- [12] PALČEK, P., CHALUPOVÁ, M. Fraktografia a mikrofraktografia konštrukčných materiálov. In *Materiálové inžinierstvo*, roč. 9, 2002, č. 3, s. 57.
- [13] HRIVŇÁK, I. *Štarnutie ocelí s nízkym obsahom uhlíka. Posterový panel*. KMI MTF STU, Bottova 25, Trnava.
- [14] SKOČOVSKÝ, P., KONEČNÁ, R. *Nové konštrukčné materiály*. Žilina: ŽU, 1996.
- [15] Kusý, Martin – Battezzati, Livio - Riello, Pietro: Partial substitution of Ni or La with Zr or Ti in ternary amorphous Al87Li7La6 [2004-02-12]. In PROSICE: Properties and Applications of Nanocrystalline Alloys from Amorphous Precursors [online]. 2004 (<https://www.arw.sav.ak>)
- [16] Janovec, Jozef – Dománková, Mária – Grgáč, Peter – Gömöry, Fedor – Kusý, Martin: *Progresívne materiály a technológie*. – 1. vyd. – Trnava: AlumniPress, 2008. – 226 s. – E-skriptá. – ISBN 978-80-8096-6 (<https://is.stuba.sk>)
- [17] Das, Jayanta – Kim, Ki Buem – Kusý, Martin – Löser, W. – Gebert, A. – Eckert, Jurgen: Formation of ductile nano/ultrafine eutectic structure in Ti-Fe-Sn alloy. In: 12th international conference on rapidly quenched and metastable amterials : Program and Abstracts. Jeju, Korea, 21.-26. 8. 2005 / nadát. International Conference. 12th. Jeju, Korea, 21.-26. 8. 2005. – Soul: Korea institute of science and technology, 2005. – s. 42.