

ANALÝZA SÚČIASTOK POŠKODENÝCH ÚNAVOU

ANALYSIS OF A FATIGUE DAMAGED COMPONENTS

Marián HAZLINGER

Autor: Doc. Ing. Marián Hazlinger, CSc.

Pracovisko: Katedra materiálového inžinierstva, Materiálovotechnologická fakulta STU

Adresa: J. Bottu 25, 917 24 Trnava

Tel.: 00421 33 5521 119, e-mail: hazling@mtf.stuba.sk

Abstract

Článok prezentuje metalografické analýzy poškodených súčiastok. Uvedené sú mikroštruktúrne analýzy zlomených súčiastok a analýzy riadkovacou elektrónovou mikroskopiou. Určené sú príčiny predčasného poručeného a krátkej životnosti súčiastok.

The paper presents metallographic analysis of damaged components. Microstructural and scanning electron microscopy analysis of fractured components which caused and early breakage and lifetime shortage, are published.

Key words

poškodené súčiastky, vysokocyklová únava, tepelné spracovanie, mikroštruktúra, fraktografická analýza, analýzy zlomených súčiastok

damaged machine parts, high cycle fatigue, heat treatment, microstructure, fractographic analyse, analysis of fractured components.

Úvod

Degradácia materiálov únavou je stále aktuálna aj v súčasnosti pre každého výrobcu strojových súčiastok. Najdôležitejšie je vždy hľadisko bezpečnosti konštrukcii, ale poškodzovanie súčiastok spôsobuje aj obrovské ekonomické škody. V článku sú uvedené porušené konštrukčné súčiastky, ktoré sa reálne využívali v strojárskych praxi a sú analyzované príčiny ich poškodenia.

Analýza súčiastok

Poškodené súčiastky boli analyzované využitím riadkovacej elektrónovej mikroskopie a svetelnej mikroskopie. Na obr. 1 je uvedená ojnice z osobného automobilu, ktorá "vyletela" v prevádzke automobilu pri servisnej testovacej skúšobnej jazde a poškodila blok motora [1].

Lomová plocha ojnice (obr. 2, 3) vykazuje charakteristické znaky vysokocyklovej únavy. Okraje lomovej plochy sú otláčené. Na obr. 4 je pohľad na zdeformovanú objímku. Na vnútornej ploche objímky pozorovať priečne trhliny.

Analýzou riadkovacou elektrónovou mikroskopiou lomová plocha ojnice (obr. 5) vykazuje charakteristické únavové a odpočinkové čiary zodpovedajúce vysokocyklovej únave [2, 3]. Lom sa šírila z vnútornej strany ojnice (plocha zodpovedajúca čapu kľukového hriadeľa) smerom von.

Na vnútornej brúsenej ploche ojnice v blízkosti lomu sme pozorovali v smere osi otvoru výskyt viacerých trhlín (obr. 6), ktoré mali na povrchu dĺžku viac ako 10 mm. Trhliny sa šírili do prierezu ojnice (obr. 7) do hĺbky cca 4 mm od strany čapu kľukového hriadeľa. Mikroštruktúra ojnice je bainitická, vyhovuje zošľachtenému stavu materiálu. Z nameraných hodnôt tvrdosti ojnica zodpovedá prepočtom pevnosti 640 až 720 MPa.

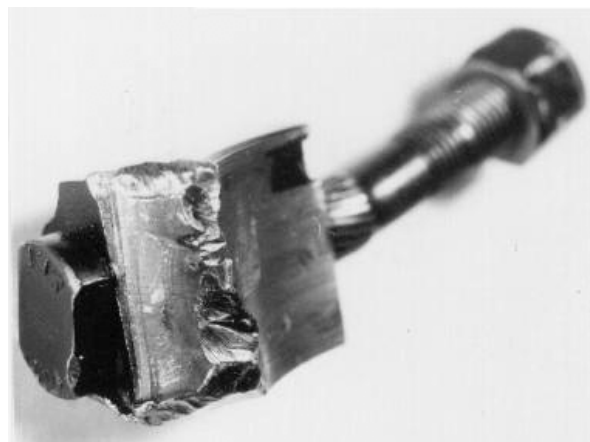
Na povrchu ojnice sa nachádzali stopy materiálu na báze medi, ale samotná kompozícia (ložisko) nebola na tomto mieste prítomná. Na vnútornom povrchu otvoru ojnice sme pozorovali výskyt rýh, ktoré vznikli v dôsledku trenia medzi čapom kľukového hriadeľa a otvorom ojnice. Z uvedeného možno predpokladať, že istý čas bol v chode motor s poškodenou alebo vypadnutou kompozíciou (ložiskom). Poškodená ojnica bola zo šesťročného automobilu, ktorý mal najazdených vyše štvrtmilióna kilometrov. Možné je predpokladať, že poškodenie ložiska vzniklo nedostatočným mazaním, alebo nevhodnou vôľou v dôsledku prirodzeného opotrebenia materiálu.



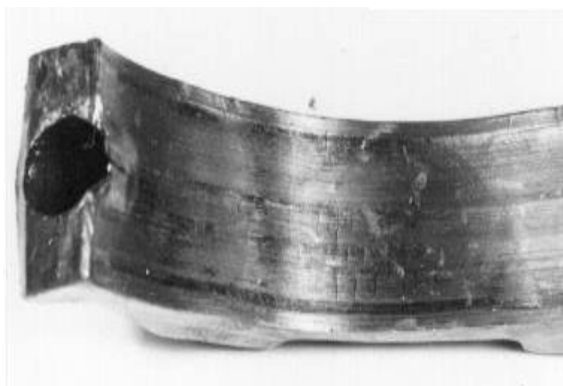
Obr. 1. Celkový pohľad na poškodenú ojnicu, zmenšené 2,4x



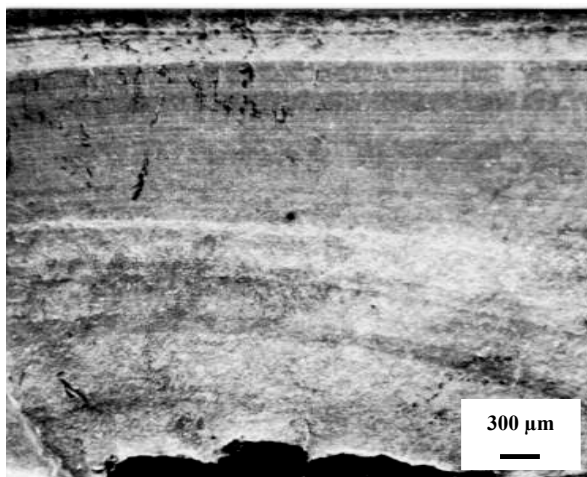
Obr. 2. Pohľad na lomovú plochu ojnice, zväčšené 2,1x



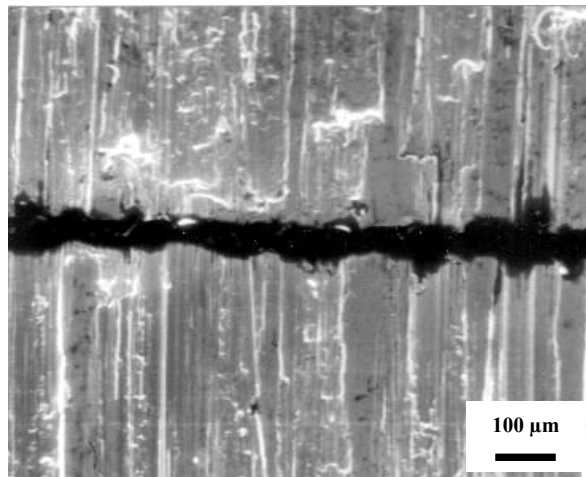
Obr. 3. Pohľad na menšiu časť zlomenej ojnice, zväčšené 1,2x



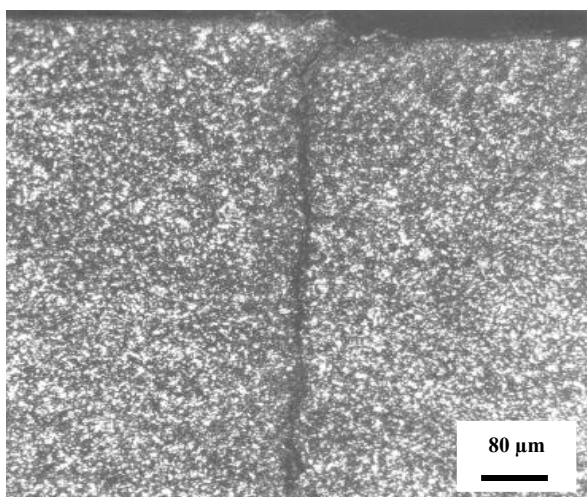
Obr. 4. Zdeformovaná objímka, pozorovať priečne trhliny, zväčšené 1,4x



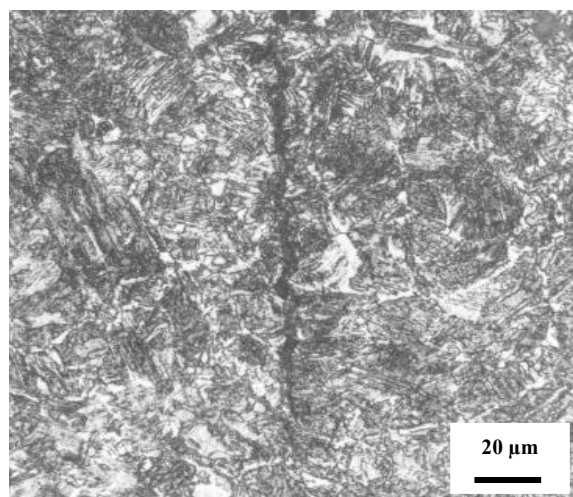
Obr. 5. Lomová plocha ojnice, únavové a odpočinkové čiary, REM



Obr. 6. Pričné trhliny na vnútornej časti v blízkosti lomovej plochy ojnice, REM



Obr. 7. Trhlina vychádza z miesta plochy ložiska ojnice, leptané 3% Nital



Obr. 8. Bainitická mikroštruktúra v jadre ojnice, ukončenie trhliny, leptané 3% Nital

Ďalšou vybranou poškodenou súčiastkou je kľukový hriadeľ z dieselového motora, ktorý sa využíval v prevádzke autobusu. Zlomený je v mieste ojničného čapu (obr. 9). Ojničné čapy (zlomený, ale aj ďalší nezlomený) makroskopicky vykazovali na povrchu znaky vyhriatia (modré sfarbenie) a aj značné opotrebenie povrchu. Detailnejší pohľad na zlomený čap je uvedený na obr. 10, kde možno okrem opotrebenia povrchu čapu pozorovať aj dve šíriace sa trhliny v smere osi čapu kľukového hriadeľa. Uvedené trhliny sa šíria niekoľko milimetrov do prierezu čapu hriadeľa (obr. 11). V ľavej časti lomovej plochy v blízkosti trhlín pozorovať aj modré sfarbenie – lokálne vyhriatie. Lomová plocha čapu vykazuje charakteristické znaky únavového porušenia [4, 5]. Na obr. 12 je uvedený detail povrchu ojničného čapu kľukového hriadeľa s charakteristickými znakmi adhézneho opotrebovania a zadierania [6, 7].

Vzorky odobraté z miest zlomeného ojničného čapu a vyváženia kľukového hriadeľa boli pripravené bežným metalografickým postupom, naleptané 3% Nitalom. Mikroštruktúra z miesta čapu kľukového hriadeľa je uvedená na obr. 13. Povrch ojničného čapu hriadeľa bol indukčne kalený [8, 9]. Hĺbka prekalenia bola 3 mm (vyhodnotené podľa normy DIN 50 190 z priebehu tvrdosti HV 1 od povrchu smerom do prierezu čapu). Mikroštruktúra v mieste

vyváženia hriadeľa je tvorená bainitom s malým podielom feritu, vyhovuje zošľachtenému stavu materiálu [10]. Z nameraných viacerých meraní tvrdosť 314 ± 3 HV 10 v priereze kľukového hriadeľa zodpovedá prepočtom hodnote pevnosti 984 ± 9 MPa.

Analýza chemického zloženia kľukového hriadeľa bola urobená zariadením Spectrolab F. Vzorka bola odobratá z prierezu z miesta vyváženia kľukového hriadeľa. Chemické zloženie ocele kľukového hriadeľa (tab. 1) zodpovedá oceli STN 41 5230. Použitý materiál kľukového hriadeľa vyhovuje.

Porušenie kľukového hriadeľa vzniklo značným opotrebením ojnicného čapu, pravdepodobne vyhriatím povrchu nedostatočným mazaním. V dôsledku vyhriatia vznikli na povrchu čapu trhliny, ktoré boli miestom iniciácie a šírenia sa poškodenia do prierezu čapu.

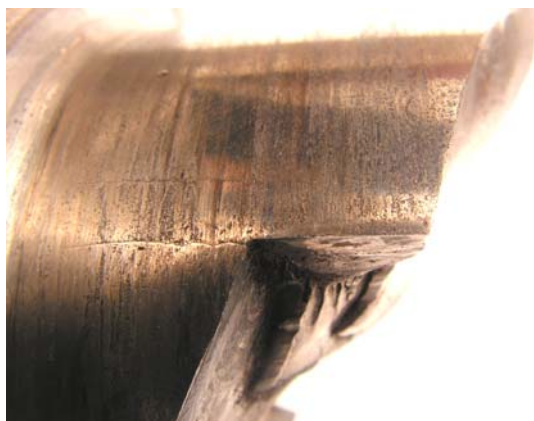
CHEMICKÉ ZLOŽENIE OCELE KLUKOVEHO HRIADEĽA [hm. %]

Tabuľka 1

Chemický prvok	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
Namerané hodnoty	0,34	0,32	0,59	0,017	0,011	2,31	0,05	0,09	0,015
Chemický prvok	Co	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	B	
Namerané hodnoty	0,01	0,12	0,00	0,12	0,01	0,00	0,01	0,0009	



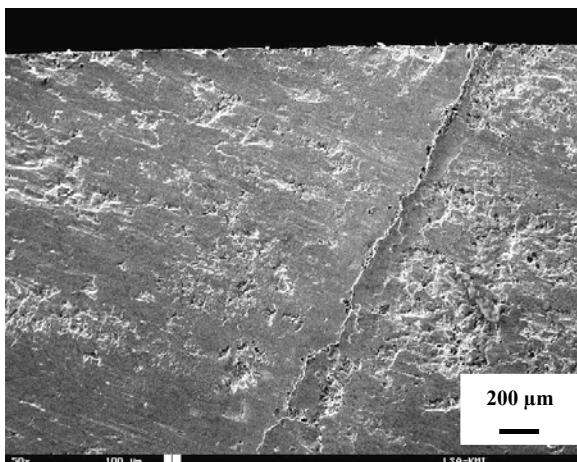
Obr. 9. Prehľadný pohľad na zlomený kľukový hriadeľ. Zmenšené 4,7x



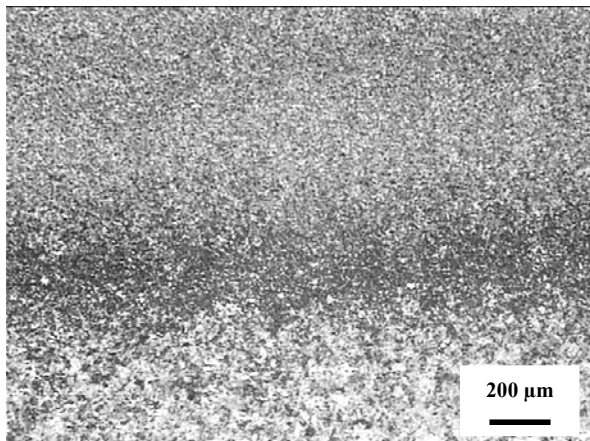
Obr. 10. Trhliny na povrchu zlomeného ojnicného čapu kľukového hriadeľa, zv. 1,3x



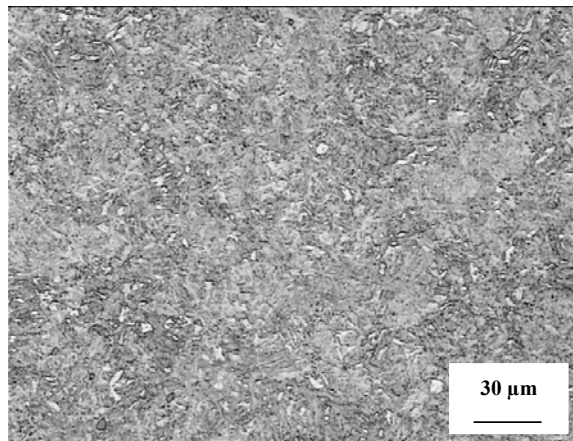
Obr. 11. Lomová plocha kľukového hriadeľa. V ľavej časti čapu hriadeľa pozorovať vyhriatie. Zmenšené 2,8x.



Obr. 12. Opotrebovaný povrch čapu kľukového hriadeľa. Pohľad na šíriacu sa trhlinu, REM.



Obr. 13. Mikroštruktúra prechodovej oblasti, povrchovo kalený čap hriadeľa, leptané 3% Nitral



Obr. 14. Mikroštruktúra v mieste vyvaženia kľukového hriadeľa, zošľachtený stav, leptané 3% Nitral

Poškodenie sa šírilo z miesta povrchových trhlín do prierezu čapu dynamickým namáhaním v prevádzke kľukového hriadeľa. Lomová plocha zodpovedá typickému únavovému porušeniu.

Tretím príkladom únavového poškodenia je pozdĺžnik na obr. 15, ktorý je časťou rámu z prívesu nákladného vozidla [11]. Dva nosníky („I” profily) prenášajú prostredníctvom priečných profilov a príložníc na boku rámu prakticky celú hmotnosť prívesu, približne 16 ton. Po dvoch mesiacoch prevádzky spozorovali na novom prívese prasknuté obidva nosníky v mieste zvaru. Profil tvaru „U” je k pozdĺžniku hlavného rámu „I” nosníka privarený priečne kútovými zvarmi. Okrem toho sú vo vnútri spodnej časti „U” profilu dva otvory, po obvodu ktorých sa nachádza vyhotovený spevňujúci kútový zvar. K nosníku hlavného rámu je kútovými zvarmi privarená ešte spevňujúca doska (pásovina) hrúbky 8 mm (obr. 15 vpravo).

Trhlina sa šírila (obr. 16) z miesta kútového zvaru priečne cez „I” profil v dĺžke 220 mm. Na protiľahlej strane profilu vychádza trhlina na povrch (obr. 17). K úplnému zlomeniu nosníka chýbalo na obidvoch stranách len približne 20 mm. Zvyšná držiaca plocha poškodeného nosníka bola rozpílená. Z lomovej plochy nosníka bolo možné pozorovať niekoľko iniciálnych miest trhlín, ktoré iniciovali v prechodovej zóne kútového zvaru „U” profilu a pozdĺžnika (obr. 18). Cyklickým namáhaním sa postupne šírili cez celý nosník.

Makroskopický pohľad na priečný rez kútovým zvarovým spojom medzi profilmi „U” a „I” je uvedený na obr. 19. Iniciácia trhliny je v prechodovej zóne kútového zvaru. Z obrázku pozorovať viacej technologických chýb. V ľavej časti obrázku je vidieť tepelné ovplyvnenie povrchu pozdĺžnika predchádzajúcim zváraním, alebo odstraňovaním predchádzajúceho zvaru. Ovplyvnená oblasť mala byť odstránená vybrúsením. Medzi zváranými profilmi pozorovať veľkú medzeru, približne 0,5 mm, ktorá by mala byť maximálne 0,1 mm. Zvary sú nekvalitné, nedostatočne prevarené. V tepelne ovplyvnenej oblasti zvaru sa nachádzalo viacero necelistvostí typu sťažnín a trhlín (obr. 20). Mikroštruktúra prechodovej oblasti je tvorená bainitom. Mikroštruktúra v jadre nosníka („I” profilu) bola vyhovujúca, jemnozrnná feriticko-perlitická (obr. 21). Taktiež mikroštruktúra „U” profilu bola vyhovujúca (obr. 22). Kvalita ocele z hľadiska metalurgickej čistoty (obsahu sulfidických a oxidických inklúzií) vyhovovala.

Pozorované praskliny v prechodovej zóne patria do kategórie tzv. studených (alebo oneskorených) prasklín, ktoré vznikajú po ukončení zvarovania dôsledkom vodíkového skrehnutia a vysokej hodnoty napätí. Vodík mohol pochádzať z nedostatočne očisteného povrchu a odmastenia súčiastok pred zvarovaním. Vysoká hodnota napätí vyplýva z nevhodnej geometrie uloženia zvaru.

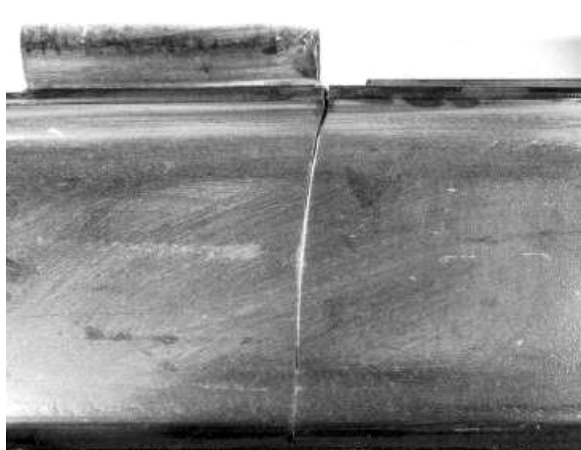
Celkovým rozborom, analýzou lomovej plochy, makro a mikroštruktúry, vyhodnotením priebehov tvrdosti sa nezistila príčina z hľadiska nevhodnosti použitých materiálov nosníka. Primárnou príčinou bol neodborne vyhotovený kútový zvar, s nevhodným zlíčovaním povrchu „U” a „I” profilov, pravdepodobne vyšší obsah difúzneho vodíka (pozorované tzv. studené praskliny) v dôsledku nedokonalého očistenia zvarových hrán, alebo použitím nevysušených zvaracích elektród. Zvary boli nevhodne konštrukčne riešené – výstužný plech bol tesne pri zvare „U” profilu, čím sa vyvolá vysoká koncentrácia napätí. Taktiež neobrúsenie tepelného ovplyvnenia povrchu „I” profilu po predchádzajúcom zvaraní, alebo drážkovaní zvaru uhlíkovou elektródou.

Záver

Únavové trhliny vznikajú na voľnom povrchu cyklicky zaťažovaných telies, v miestach koncentrácie cyklickej plastickej deformácie, tzn. v miestach koncentrácie napätia. Miesta s maximálnou koncentráciou napätia predstavujú vruby rôzneho typu a pôvodu. Cyklickým zaťažovaním sa trhlina šíri do prierezu súčiastky. Postupne zmenšením nosného prierezu súčiastky nastáva porušenie preťažením [12].



Obr. 15. Pohľad na poškodený pozdĺžnik prívesu, zmenšené 6,5x



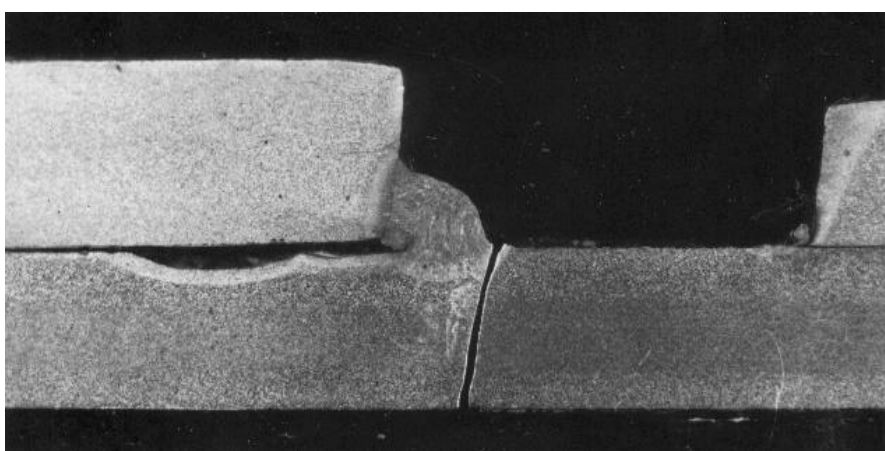
Obr. 16. Trhlina sa šíri v dĺžke 220 mm, zmenšené 4x



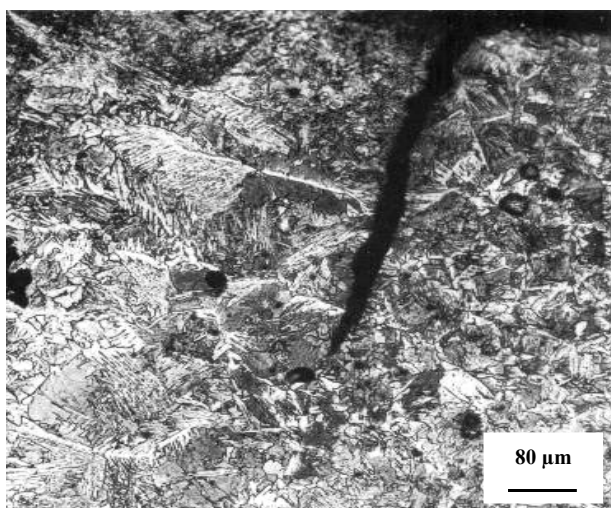
Obr. 17. *Protiľahlá strana, prasklina vychádza na povrch pozdĺžnika, zmenšené 4,1x*



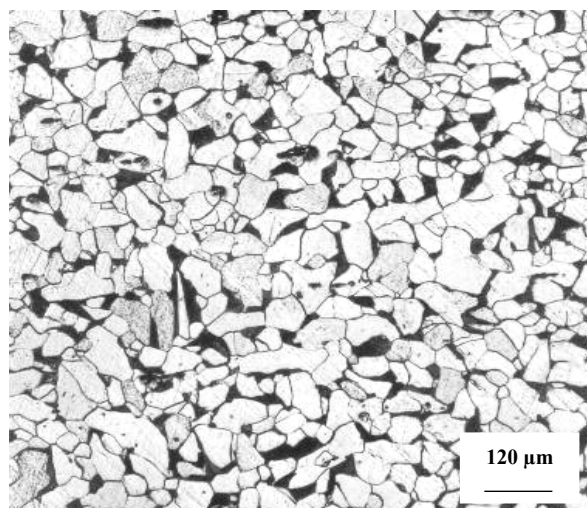
Obr. 18. *Detail zvaru a lomovej plochy po rozpílení pozdĺžnika, zmenšené 1,1x*



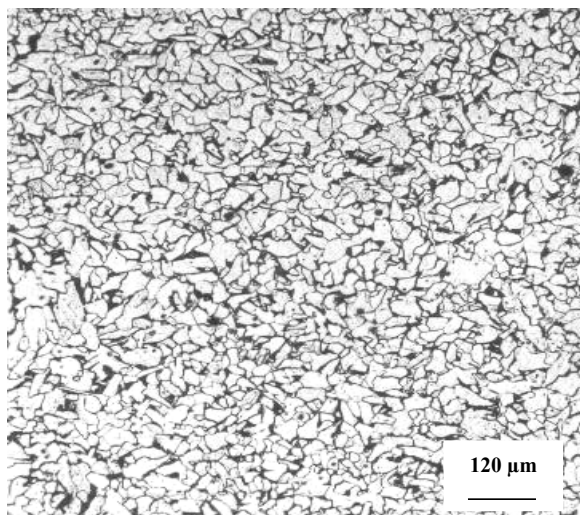
Obr. 19. *Makroskopický pohľad na zvar v reze, leptané podľa Heyneho, zv. 2,6x*



Obr. 20. *Mikroštruktúra prechodovej zóny tvorená bainitom. Pozorovať šíriacu sa trhlinu, leptané 3% Nital.*



Obr. 21. *Mikroštruktúra v jadre pozdĺžnika leptané 3% Nital*



Obr. 22. Jemozrná mikroštruktúra „U” profilu, leptané 3% Nital

Degradácia únavou je vyvolaná opakovaným mechanickým, tepelným alebo tepelnomechanickým zaťažovaním za súčasného spolupôsobenia ďalších externých a interných faktorov [13].

V prvých dvoch uvedených analyzovaných súčiastkách bola pravdepodobná príčina poškodenia vplyvom spolupôsobenia externých faktorov - nedostatočného mazania v prevádzke vozidiel a strate úžitkových vlastností súčiastok.

V treťom uvádzanom prípade bola príčina poškodenia najmä internými faktormi – nesprávne vyhotovené zvary nosníka, nesprávna mikroštruktúra - studené (oneskorené) praskliny, ktoré vznikajú po ukončení zvarovania dôsledkom vodíkového skrehnutia, pravdepodobne v dôsledku nedostatočného očistenia povrchu súčiastok pred procesom zvarovania. Vysoká hodnota koncentrácie napätí vyplývala aj z nevyhovujúceho konštrukčného riešenia, nevhodného zlíčovania profilov a nevhodnej geometrie uloženia zvarov.

V súčasnosti sú možnosti už v projektovej príprave, návrhu konštrukčných celkov, v technológii výroby súčiastok a v skúšobníctve využiť rôzne simulačné počítačové programy z hľadiska optimalizácie konštrukcii a technologických procesov a zabezpečenia predikcie životnosti súčiastok [14 až 16].

Zoznam bibliografických odkazov:

- [1] HAZLINGER, M., HRIVŇÁK, I. *Analýza poškodenej ojnice. Expertízny posudok*. Trnava: KMI MTF STU, 1996.
- [2] PALČEK, P., CHALUPOVÁ, M. Fraktografia a mikrofraktografia konštrukčných materiálov. In *Materiálové inžinierstvo*, 2002, roč. 9, č. 3, s. 57.
- [3] ZEMANDL, M. Fraktografie únavových lomů kovových materiálů při mechanickém namáhání. In *Materiálové inžinierstvo*, 2002, roč. 9, č. 3, s. 41.
- [4] MICHEL, J. Analýza únavového porušenia hriadeľov strojných zariadení. In *Degradácia vlastností konštrukčných materiálov únavou*. Žilina: SjF ŽU, 1999, s. 34 - 41.
- [5] ZEMANDL, M. Fraktografický rozbor únavového lomu hřídele. In *Degradácia vlastností konštrukčných materiálov únavou*. Žilina: SjF ŽU, 1997, s. 71-75.
- [6] HAZLINGER, M. Analýza príčin poškodenia a nízkej životnosti tvarových strižníkov. In *Materiálové inžinierstvo*, 1998, 11/5, s. 33-39.

- [7] HUDÁKOVÁ, M., HAZLINGER, M., BÍLIK, J. Analýza porušeného tvárniaceho nástroja. In *Degradácia konštrukčných materiálov*. Žilina: Sjf ŽU, 2003, s. 143.
- [8] Dostupné na internete: <www.rubig.com/anlagentechnik/universal/news/kundenzeitung_06-03.pdf>.
- [9] ENDLER, I., DOMÁNKOVÁ, M., PINKE, P. The Study of Carbon Nanostructure Growth by HFCVD, In *CO-MAT-TECH 2000*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000, p. 33.
- [10] ZÁBAVNÍK, V., BURŠÁK, M. *Zošľachťovanie a kontrola kvality materiálov*. Košice: Emilena, 2004.
- [11] HRIVNÁK, I., HAZLINGER, M. *Analýza prasknutého nosníka. Expertízny posudok*. Trnava: KMI, Mtf STU, 1997.
- [12] PUŠKÁR, A., HAZLINGER, M. *Porušovanie a lomy súčastí*. Žilina: EDIS ŽU, 2000.
- [13] VÁRKOLY, L., VÁRKOLYOVÁ, B. Beitrag zur besseren Ausnutzung der Konstruktionsstähle. In *Metallurgische Symposium*. Rajecké Teplice, 1996, s. 158-161.
- [14] PAVLATA, P. Porovnávací životnostní zkouška alternativ ramene přední nápravy ŠKODA FAVORIT. In *Degradácia vlastností konštrukčných materiálov únavou*. Žilina: Sjf ŽU, 1999, s. 76.
- [15] LEITNER, B., MÁCA, J. Počítačové modelovanie prevádzkových podmienok a jeho využitie pri odhade spoľahlivosti vybraných častí nákladného vozidla. In *TRANSFER 2001*. Trenčín: Fakulta špeciálnej techniky, 2001, s. 440.
- [16] TARABA, B., BEHÚLOVÁ, M. Príspevok k metodológii tvorby a využitia simulačných modelov tepelných procesov. In *Acta Metallurgica Slovaca 4*. Košice: TU, 2000.