MINISTERSTVO
DOPRAVY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

**LETECKÝ A NÁMORNÝ VYŠETROVACÍ ÚTVAR**
**Námestie slobody 6, P.O.BOX 100**
**810 05 Bratislava**

# Z Á V E R E Č N Á  S P R Á V A

## o bezpečnostnom vyšetrovaní leteckej nehody

lietadla typu **WT 9 600 RG Dynamic**

poznávacej značky **D-MLXL**

dňa **07.07. 2022**

Ev.č.: **SKA2022008**

**Bezpečnostné vyšetrovanie leteckej mimoriadnej udalosti bolo vykonané podľa § 18 zákona č. 143/1998 o civilnom letectve (letecký zákon) a o zmene a doplnení niektorých zákonov, v súlade s Nariadením Európskeho parlamentu a Rady (EÚ) č. 996/2010 o vyšetrovaní a prevencii nehôd a incidentov v civilnom letectve, ktorými sa riadi vyšetrovanie leteckých nehôd a incidentov v civilnom letectve.**

**Záverečná správa je vydaná v súlade s predpisom L 13, ktorý je aplikáciou ustanovení ANNEX 13, Vyšetrovanie leteckých nehôd a incidentov k Dohovoru o medzinárodnom civilnom letectve.**

**Výhradným cieľom bezpečnostného vyšetrovania je zistenie príčin vzniku udalosti a prevencia vzniku takýchto udalostí, nie však poukazovanie akejkoľvek viny alebo zodpovednosti osôb.**

**Táto záverečná správa, jej jednotlivé časti alebo iné dokumenty, vzťahujúce sa k bezpečnostnému vyšetrovaniu predmetnej udalosti majú len informatívny charakter a nemôžu byť použité inak, len ako odporučenie pre realizáciu opatrení, ktoré by zabránili vzniku ďalších leteckých mimoriadnych udalostí s obdobnými príčinami.**

## Použité skratky

| | |
|---|---|
| ° | Stupeň - geometrická veličina |
| ALT | Nadmorská výška (Altitude) |
| AMM | Údržbová príručka lietadla (Aircraft Maintenance Manual) |
| BVK | Bezpečnostná vyšetrovacia komisia |
| C | Značka chemického prvku - uhlík |
| Cr | Značka chemického prvku - chróm |
| CTAF | Spoločná poradná prevádzková frekvencia (Common traffic advisory frequency) |
| DOA | Schválená projekčná organizácia (Design Organizations Approvals) |
| E | Východ (svetová strana - East) |
| EASA | Európska agentúra pre bezpečnosť letov (European union Aviation Safety Agency) |
| FIC | Letové informačné stredisko (Flight Information Centre -124,300 Mhz) |
| FL | Letová hladina (Flight Level) |
| ft | Stopy/ jednotka dĺžky (feet) |
| FTP | Testovací pilot (Flight Test Pilot) |
| FTR | Záletový protokol (Flight Test Record) |
| HPa | Hectopascal (jednotka tlaku) |
| HRC | Metóda určovania tvrdosti materiálov (HRC metóda podľa Rockwella) |
| HV | Metóda určovania tvrdosti materiálov (HV metóda podľa Vickersa) |
| ISO | Medzinárodná technická norma (International organization of Standardization) |
| km | Kilometer (jednotka dĺžky) |
| km/h | Kilometer za hodinu (jednotka rýchlosti) |
| kts | Uzol (jednotka rýchlosti) |
| LZPE | Skratka v kóde ICAO pre letisko Prievidza (123,055 Mhz) |
| MHz | Megahertz (jednotka frekvencie) |
| min | Minúty (jednotka času) |
| mm | Milimeter (jednotka dĺžky) |
| MSL | Stredná hladina mora (Mean see level) |
| N | Sever (svetová strana - North) |
| Nm | Newtonmeter(uťahovací moment) |
| OO PZ | Obvodné oddelenie policajného zboru |
| SPL | Preukaz športového pilota, (sport pilot licence) |
| SZ | Severo-západ (smer podľa svetových strán) |
| ULA | Ultraľahké lietadlo (Ultralight Aircraft) |
| UTC | Koordinovaný svetový čas (Coordinated Universal Time) |
| VFR | Pravidlá letu za viditeľnosti (Visual flight rules) |
| VMC | Meteorologické podmienky na let za viditeľnosti (Visual meteorological conditions) |

| | |
|---|---|
| VPD | Vzletová a pristávacia dráha |
| µm | Mikrometer (jednotka dĺžky) |
| QNH | Nastavenie výškomeru pre indikáciu nadmorskej výšky (altimeter sub-scale setting to obtain elevation reading when on the ground) |
| °C | Celziový stupeň (jednotka teploty) |

# A. ÚVOD

| | |
|---|---|
| Typ lietadla: | WT 9 600 RG Dynamic |
| Výrobca: | AEROSPOOL spol. s r.o. |
| Poznávacia značka: | D-MLXL |
| Prevádzkovateľ: | AEROSPOOL spol. s r.o. |
| Vlastník: | ISS-Aviation GmbH & Co. KG |
| Typ prevádzky: | všeobecné letectvo / vývojový letový test |
| Miesto vzletu: | LZPE |
| Fáza letu: | klesanie s minimálnym ťahom motora |
| Miesto udalosti: | 2.4 km SZ od obce Lehota pod Vtáčnikom<br>N 48°42'25.2", E 018°37'52.2" |
| Dátum a čas udalosti: | 07.07.2022, 05:40 |

Poznámka: Všetky časové údaje v tejto správe sú uvádzané v UTC čase.

# B. INFORMATÍVNY PREHĽAD

Dňa 07.07.2022 počas vykonávania vývojového letového testu lietadla WT 9 600 RG Dynamic, poznávacej značky D-MLXL (ďalej len lietadlo), pri klesaní s minimálnym ťahom motora, pri rýchlosti 350 km/h a po ustálení tejto rýchlosti, prišlo k bližšie nešpecifikovanému poškodeniu výškového riadenia a následnej straty kontroly nad lietadlom.

Lietadlo sa po tomto incidente stálo neovládateľným.

FTP aktivoval integrovaný padákový záchranný systém.

Po dopade na zem bolo lietadlo zničené a FTP ľahko zranený.

Leteckú nehodu svedkovia ohlásili na FIC Bratislava, CTAF LZPE ako aj na linku tiesňového volania 112 a na OO PZ Prievidza.

Na vyšetrenie príčin vzniku predmetnej leteckej udalosti bola ustanovená BVK

Ing. Igor Krejča predseda BVK
Miroslav Gábor člen BVK

Správu vydáva:
Letecký a námorný vyšetrovací útvar
Ministerstvo dopravy Slovenskej republiky

# C. HLAVNÁ ČASŤ SPRÁVY

1. FAKTICKÉ INFORMÁCIE
2. ANALÝZY
3. ZÁVERY
4. ODPORÚČANIA NA ZAISTENIE BEZPEČNOSTI

# 1. FAKTICKÉ INFORMÁCIE

## 1.1 Priebeh letu

Dňa 06.07.2022 sa FTP zúčastnil na predletovom brífingu k vývojovému letovému testu, ktorý sa konal v rámci certifikačného procesu pre lietadlo, ktorého súčasťou bolo podanie letového plánu.

Dňa 07.07.2022 FTP po príchode na LZPE vykonal predletovú prehliadku lietadla, previedol výpočet centráže a vyváženia lietadla, skontroloval počasie a využiteľnosť vzdušného priestoru v danej oblasti.

Po vykonaní povinných úkonov, motorovej skúške, v čase o 03:04 FTP vzlietol z LZPE z VPD 22 na plánovaný vývojový letový test podľa programu letových skúšok. Po vzlete FTP nadviazal spojenie s FIC Bratislava, aktivoval letový plán, pokračoval v stúpaní do výšky 8000 ft. Následne vykonal preladenie na Bratislava RADAR kde žiadal o povolenie stúpať do letovej hladiny FL140 a pokračoval do určeného priestoru pre vykonanie vývojových letových testov.

Po dosiahnutí letovej hladiny FL140 si FTP vyžiadal o klesanie. FTP následne začal vykonávať letový test, upravil letový režim a stiahol výkon motora na voľnobeh. Po dosiahnutí a stabilizácii rýchlosti 300 km/h v klesaní FTP overil letové vlastnosti lietadla. Tento postup FTP zopakoval aj pri rýchlostiach 310 a 320 km/h. Po ukončení overovania letových vlastností pri rýchlosti 320 km/h FTP ukončil klesanie a začal opätovne stúpať do FL140. Po dosiahnutí letovej hladiny FTP vykonal totožné testy pri rýchlostiach 330 a 340 km/h.

Po ukončení prvej fázy vývojových letových testov a povolení od Bratislava RADAR začal FTP stúpať do letovej hladiny FL150 Po dosiahnutí letovej hladiny FL150 FTP začal vykonávať druhú fázu vývojového testu, upravil letový režim, začal klesať a zrýchľovať na požadovanú rýchlosť 350 km/h. Počas zrýchľovania FTP počul „ silnú ranu zo zadnej časti lietadla“. Lietadlo sa nachádzalo vo výške 10 816 ft, v priestore medzi obcami Cigeľ a Lehota pod Vtáčnikom určeného súradnicami N 48°42'47.51",E 018°37'21.98".

Následne lietadlo prešlo do strmého stúpania, FTP reagoval potlačením riadiacej páky smerom dopredu pre ustálenie priamočiareho letu. Lietadlo nereagovalo na zásah FTP do riadenia a nepodarilo sa let stabilizovať ani pomocou vyváženia.

FTP ohlásil rádiom situáciu na „LZPE Prevádzka“ a úmysel aktivovať integrovaný záchranný padákový systém. Vo výške 9600 ft vypol motor, a aktivoval záchranný systém. Po otvorení padáku a stabilizácii klesania lietadla FTP vykonal povinné úkony podľa prevádzkovej príručky lietadla.

Počas klesania FTP komunikoval s pilotom pozorovacieho lietadla WT 9 Dynamic, poznávacej značky D-MTDY a súčasne bol na spojení s pozemným personálom. Pri kontakte lietadla so zemským povrchom sa lietadlo prevrátilo na chrbát, čo znemožnilo FTP okamžite opustiť lietadlo. Po príchode auta pozemného personálu bol FTP vyslobodený z lietadla a dopravený do Nemocnice s poliklinikou Prievidza so sídlom v Bojniciach s tržným zranením na hlave.

Denná doba: deň
Pravidlá letu: VFR

## 1.2 Zranenia osôb

| Zranenie | Posádka | Cestujúci | Ostatné osoby |
|---|---|---|---|
| Smrteľné | - | - | - |
| Vážne | - | - | - |
| Ľahké zranenia | 1 | - | - |
| Bez zranení | - | - | |

## 1.3 Poškodenie lietadla

Lietadlo bolo po leteckej nehode zničené.

## 1.4 Ostatné škody

Leteckému a námornému vyšetrovaciemu útvaru neboli oznámené okolnosti s prípadným uplatnením iných náhrad škôd voči tretej osobe.

## 1.5 Informácie o leteckom personáli

**FTP**
občan Slovenskej republiky, vek 27 rokov,
držiteľ preukazu spôsobilosti SPL, vydaný nemeckou asociaciou ultraľahkých lietadiel (Deutscher ultraleichtplugverband) dňa 02.04.2020 s neobmedzenou dobou platnosti.

Platné obmedzené osvedčenie radiotelefonistu leteckej pohyblivej služby I. bez vyznačenia platnosti.

Osvedčenie zdravotnej spôsobilosti 2. triedy, s vyznačenou platnosťou do 29.03.2024.

Letové skúsenosti:
Celková doba letu na lietadlách podľa záznamov vykonaných FTP v stanovenej dokumentácii ku dňu 06.07.2022 pred kritickým letom bola nasledovná:

| | |
|---|---|
| celkom na všetkých typoch | 2012:38 |
| celkom za posledných 90 dní | 146:59 |
| celkom za posledných 30 dní | 46:54 |
| z toho celkom na type | 1690:15 |
| na type za posledných 90 dní | 128:04 |
| na type za posledných 30 dní | 34:18 |

## 1.6 Informácie o lietadle

Lietadlo je jednomotorový dvojmiestny dolnoplošník kompozitovej konštrukcie, s pevným alebo zaťahovacím trojbodovým podvozkom. Riadenie je konvenčného typu s mechanickým prenosom síl na riadiace plochy lietadla vybavené elektricky ovládanými vztlakovými klapkami a elektricky ovládanými prvkami priečneho a pozdĺžneho vyváženia. Lietadlo patrí do kategórie ULA. Maximálna vzletová hmotnosť lietadla je 600 kg.

| | |
|---|---|
| Typ/Model: | WT 9 600 RG / 915 iS / KW-30 |
| Poznávacia značka: | D-MLXL |
| Výrobné číslo: | DY-764D |
| Rok výroby | 2022 |
| Výrobca: | AEROSPOOL, spol. s r.o. Prievidza |
| Celkový nálet | ku dňu 07.07.2022: 24:50 / 130 letov. |

Letové povolenie: vydané splnomocneným zástupcom Spolkovej republiky Nemecko, s vyznačenou platnosťou do 03.05.2023.

Zákonné poistenie: Generali – Deutschland AG č. 010.105.778.256 platné do 01.05.2023.

Povolenie lietadlovej stanice, č. 77459916, platné od 22.04.2022, vydané Bundesnetzagentur fur Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Bundesrepublik Deutschland.

**Pohonná jednotka**

Rotax 915 iS je štvorvalcový, štvortaktný, s protiľahlými piestmi (plochý), preplňovaný turbodúchadlom, vzduchom a kvapalinou chladený benzínový motor s reduktorom. Turbodúchadlo má kompresný pomer 3,5: 1. Motor je vybavený zdvojeným elektronickým systémom vstreku paliva.

| | |
|---|---|
| Typ: | Rotax 915 iS |
| Výrobca: | Bombardier Rotax GmbH |
| Výrobné číslo: | 9133622 |
| Celkový nálet: | 25:00 |

**Vrtuľová jednotka**

Vrtuľa KW-30 je trojlistá, ťažná, konštantných otáčiek. Vrtuľové listy sú vyrobené z kompozitu a sú nastavované hydraulicky.

| | |
|---|---|
| Typ: | KW-30-A-H-3-0-0-F/R-175-034 (EASA.P.177) |
| Výrobca: | WOODCOMP |
| Výrobné číslo: | 22-01-1168 |
| Celkový nálet: | 25:00 |

## 1.7 Meteorologická situácia

| | |
|---|---|
| Vietor | variabil/ 2 kts |
| Teplota | 13 °C |
| Rosný bod | 10 °C |
| Tlak (QNH) | 1019 HPa |
| Svetelné podmienky | deň |
| Dohľadnosť | viac ako 10 km |
| Oblačnosť | malá na FL 150 |
| Zrážky | bez zrážok |
| Námraza | bez námrazy |

## 1.8 Navigačné zariadenia

Lietadlo bolo vybavené len pre lety VFR.

## 1.9 Spojenie

Lietadlo bolo vybavené palubnou rádiostanicou pre možnosť obojstranného rádiového spojenia v každom okamihu letu so všetkými leteckými stanicami.
FTP komunikoval počas vývojového letového testu s LZPE na frekvencii 123,055 Mhz, s FIC Bratislava na frekvencii 124,300 MHz, s Bratislava RADAR na frekvencii 134,475 MHz, s pilotom pozorovacieho lietadla a s pozemným personálom na frekvencii 123,055 MHz.

## 1.10 Informácie o letisku

| | |
|---|---|
| LZPE | medzinárodné verejné letisko |
| Zemepisný smer VPD: | 220°/040° |
| Označenie VPD: | 22/04 |
| Povrchu letiska: | tráva/asfalt |
| Druh prevádzky: | VFR deň |
| Frekvencia: | 123, 055 Mhz |
| Vzťažný bod letiska: | 48°45'58,00"N, 018°35'12,00"E |
| Nadmorská výška: | 260 m / 853 ft |
| Rozmery VPD 04L/22R | 944x55 m / tráva |
| Rozmery VPD 04R/22L | 949x23 m / asfalt |

## 1.11 Letové zapisovače a ostatné záznamové prostriedky

Lietadlo bolo vybavené systémom Garmin G3X (Flight Display GDU 460, ADAHRS modul GSU 25C, EMS modul GEA 24), ktorý zaznamenáva letové a motorové údaje.

V rámci dokumentovania vývojových letových testov boli na lietadle nainštalované 4 kamery a to dve kamery (GoPro Hero 4) na nahrávanie kokpitu, jedna kamera (GoPro Hero 7) zaznamenala pravé krídlo a jedna kamera (GoPro MAX) umiestnená na trupe za prekrytom kabíny s 360° záznamom.

## 1.12 Informácia o dopade a troskách

Miestom udalosti je vzdušný priestor medzi obcami Cigeľ a Lehota pod Vtáčnikom udaná zempisnými súradnicammi N 48°42'47.51",E 018°37'21.98", na výške 10 816 ft.

Lietadlo dopadlo na pole poľnohospodárskeho podniku medzi obcami Cigeľ a Lehota pod Vtáčnikom.

Zemepisné súradnice konečnej polohy dopadu lietadla: N 48°42´25.67“, E 18°37´52.36“.

Pohľad na pravú stranu lietadla

Pohľad na ľavú stranu lietadla

Deštrukcia ľavého krídla

## 1.13 Lekárske a patologické nálezy

Neuvádza sa.

## 1.14 Požiar

Po dopade lietadla na zem požiar nevznikol.

## 1.15 Aspekty prežitia

Po aktivácii záchranného padákového systému lietadla FTP dopadol spolu s lietadlom, ktoré sa po kontakte so zemou prevrátilo na chrbát.

FTP utrpel povrchové zranenie hlavy.

## 1.16 Testy a výskum

Po vyslobodení FTP z lietadla a po zadokumentovaní miesta dopadu boli trosky prepravené do hangáru na LZPE. Členovia BVK v spolupráci so zástupcami výrobcu lietadla

AEROSPOOL s.r.o vykonali dôkladnú obhliadku trosiek lietadla. Počas obhliadky trosiek bolo zistené poškodenie, odlomenie kĺbovej hlavice tiahla zo sústavy riadenia výškového kormidla lietadla, konkrétne na prednej strane strednej spojovacej tyči riadenia výškového kormidla.

Na základe zistených skutočností BVK požiadala Kriminalistický a expertízny ústav Policajného zboru SR a Výskumný ústav zváračský o vykonanie expertízy a vypracovania znaleckého posudku/technickej správy za účeľom zistenia príčiny deštrukcie kĺbovej hlavice spojovacej tyče riadenia výškového kormidla.

Kriminalistickému a expertíznemu ústavu Policajného zboru SR na vykonanie predmetnej expertízy BVK predložila strednú spojovaciu tyč riadenia výškového kormidla a odlomenú časť kĺbovej hlavice spojovacej tyče. Obidve súčasti pochádzali z dotknutého vyššie uvedeného lietadla.

Výskumnému ústavu zváračskému z.z.p.o./ Divízia materiálov a technológií zvárania BVK predložila dve série vzoriek kĺbových hlavíc. V prvej sérii to boli vzorky na rozbor chemického zloženia, mikroštruktúry a meranie tvrdosti a v druhej sérii vzorky, ktoré sa porušili vo výrobe, na konštrukcii a pri skúške externým zaťažením.

Výrobca lietadla AEROSPOOL s.r.o. vykonal vlastné interné šetrenie leteckej nehody.

1.16.1

**<u>Znalecký posudok Kriminalistického a expertízneho ústavu:</u>**

Na zistenie skutočností bola preskúmaná predložená spojovacia tyč riadenia výškového kormidla predmetného lietadla aj odlomená časť kĺbovej hlavice z predného konca tyče

Foto č.1. Predložená tyč riadenia výškového kormidla lietadla

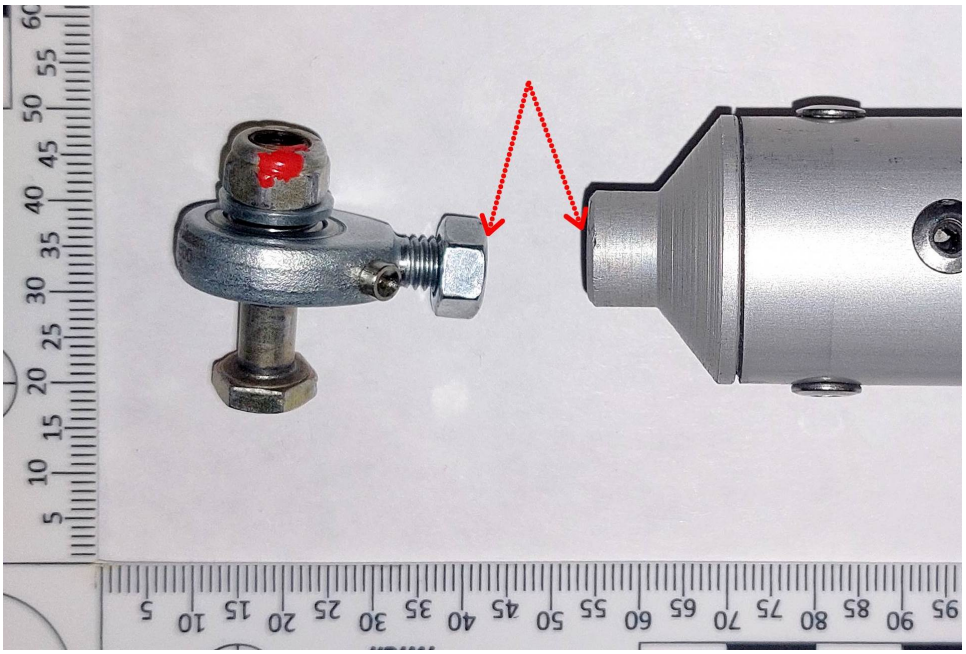


Foto č.2. Polodetail miesta odlomenia kĺbovej hlavice

Už základné preskúmanie lomovej plochy na závitovej časti kĺbovej hlavice pomocou optického mikroskopu preukázalo, že lom mal znaky krehkého, resp. štiepneho porušenia materiálu, bez sprievodných deformácií materiálu v okrajových častiach lomu a bez stôp prípadného únavového poškodzovania materiálu.

Foto č.3 Lomová plocha bez stôp únavového mechanizmu poškodzovania materiálu.

Z odlomeného závitu kĺbovej hlavice bola vyrezaná vzorka, ktorá bola následne analyzovaná metódou rastrovacej elektrónovej mikroskopie na prístroji firmy PHILIPS, typ XL-30 s rtg. energiovo-disperzným spektrometrom firmy EDAX. Bolo zistené, že v obvodovej časti lomovej plochy sa jednalo o medzikryštalický, resp. interkryštalický štiepny lom (foto č.4) a v stredovej časti lomu o tzv. kvázištiepny lom s lokálnymi náznakmi kalíškovitej morfológie húževnatého tvárneho lomu (foto č.5).

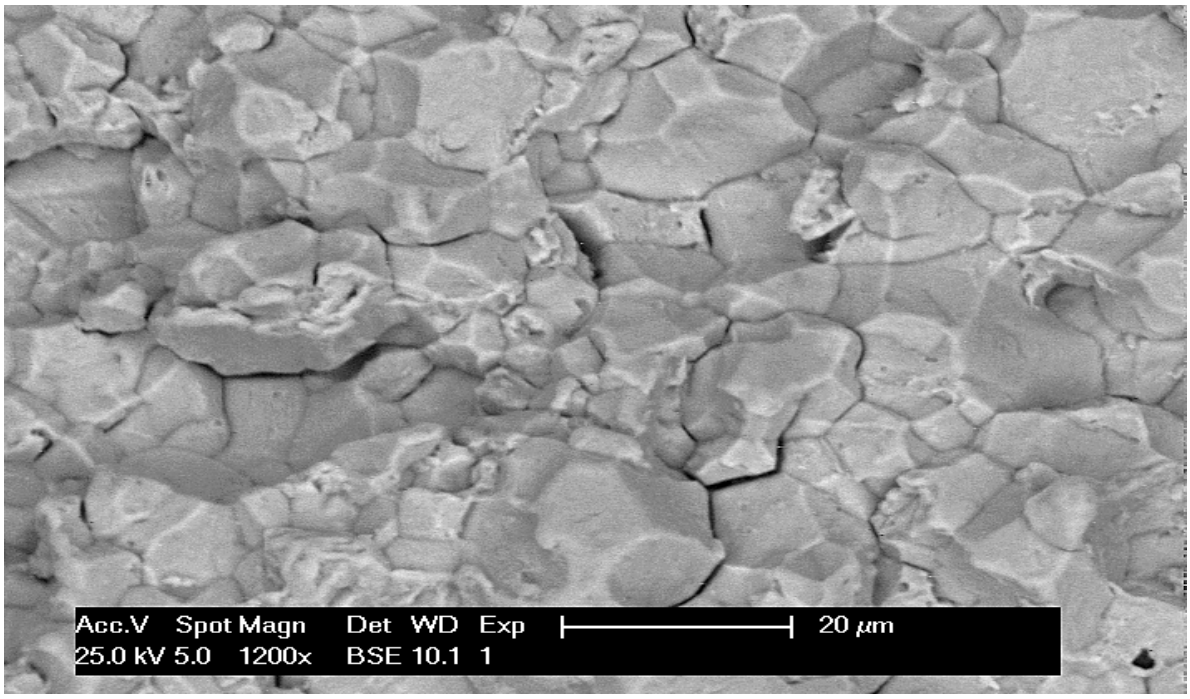



Foto č.4 Medzikryštalický štiepny lom v obvodových častiach lomu

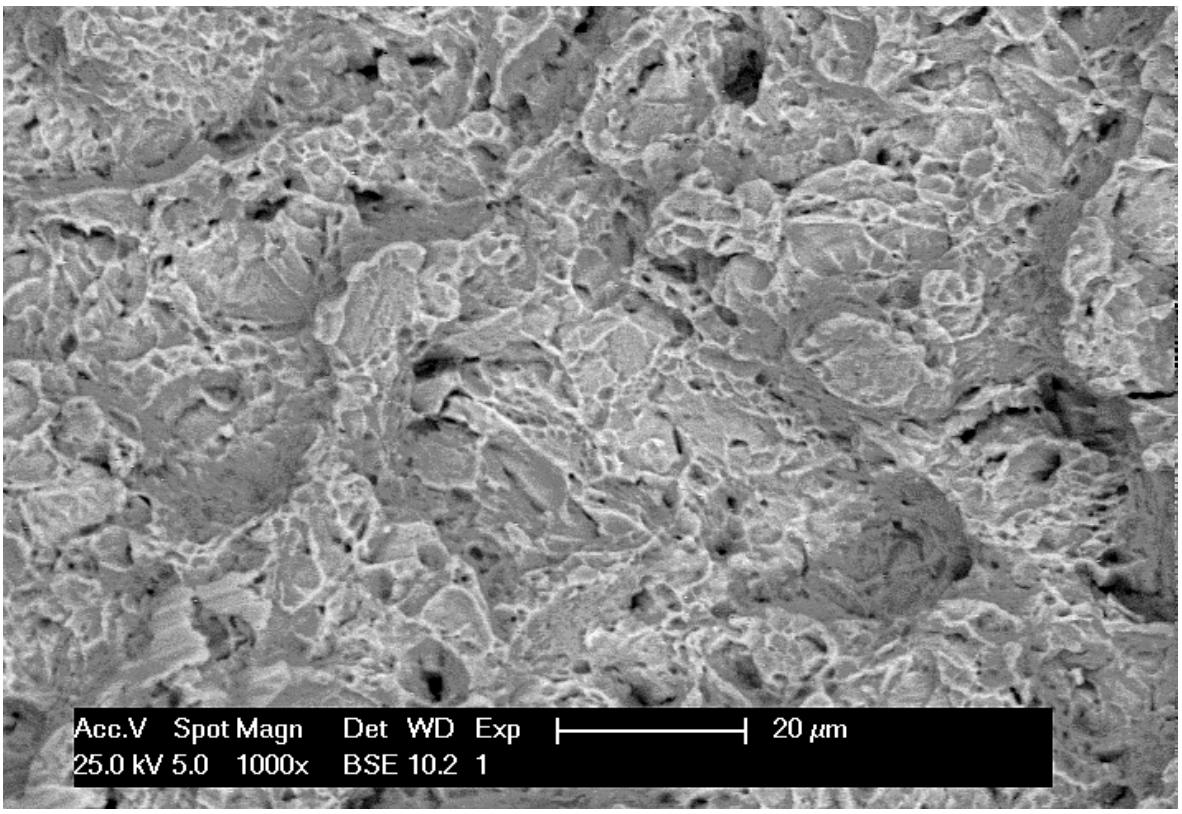



Foto č.5 Kvázištiepny lom v stredovej časti lomovej plochy.

V oblastiach poškodených štiepnym lomom bola zistená veľká početnosť medzikryštalických trhlín orientovaných aj v pozdĺžnom smere poškodenej časti hlavice (pozri foto č.4, 6 a 7).

Tieto trhliny preukazovali prítomnosť tzv. vodíkovej krehkosti skúmaného materiálu spôsobenej migráciou vodíka pozdĺž slabších hraníc zŕn materiálu.

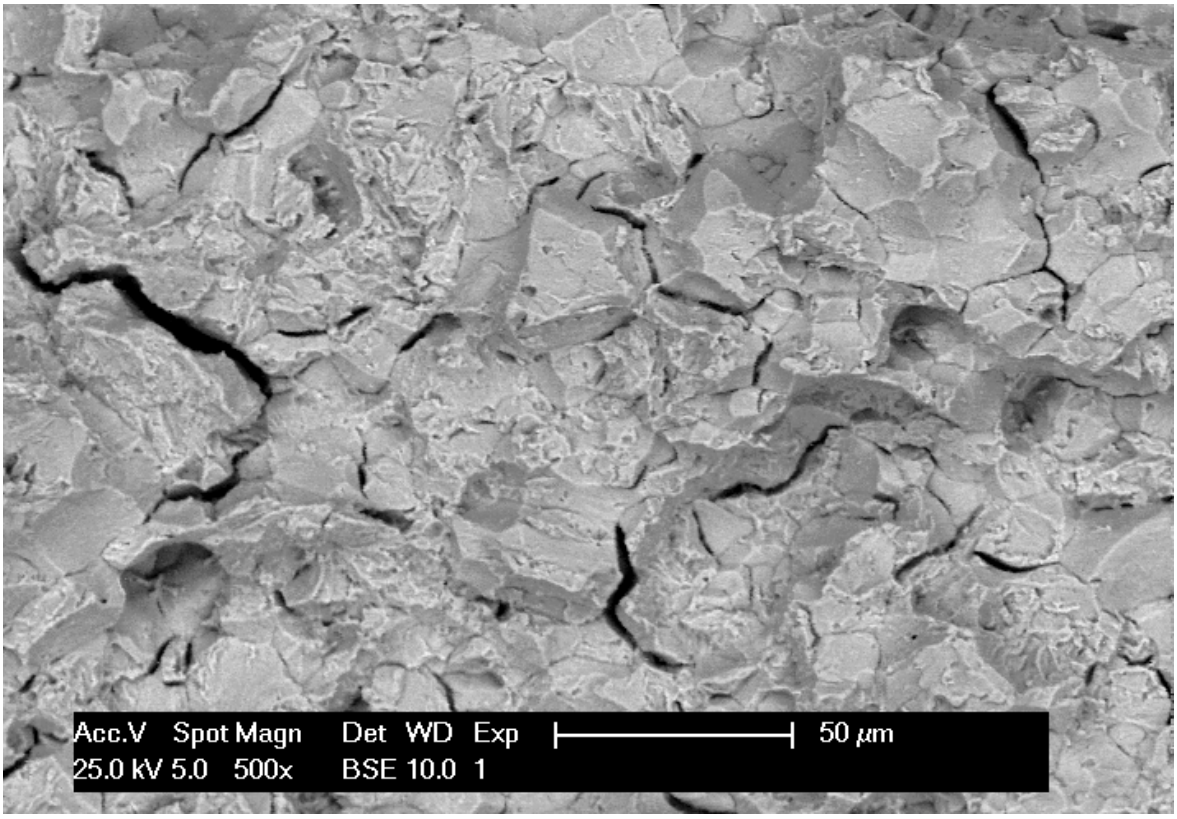



Foto č.6 Vnútorné trhliny v materiáli pozdĺž hraníc jeho zŕn.

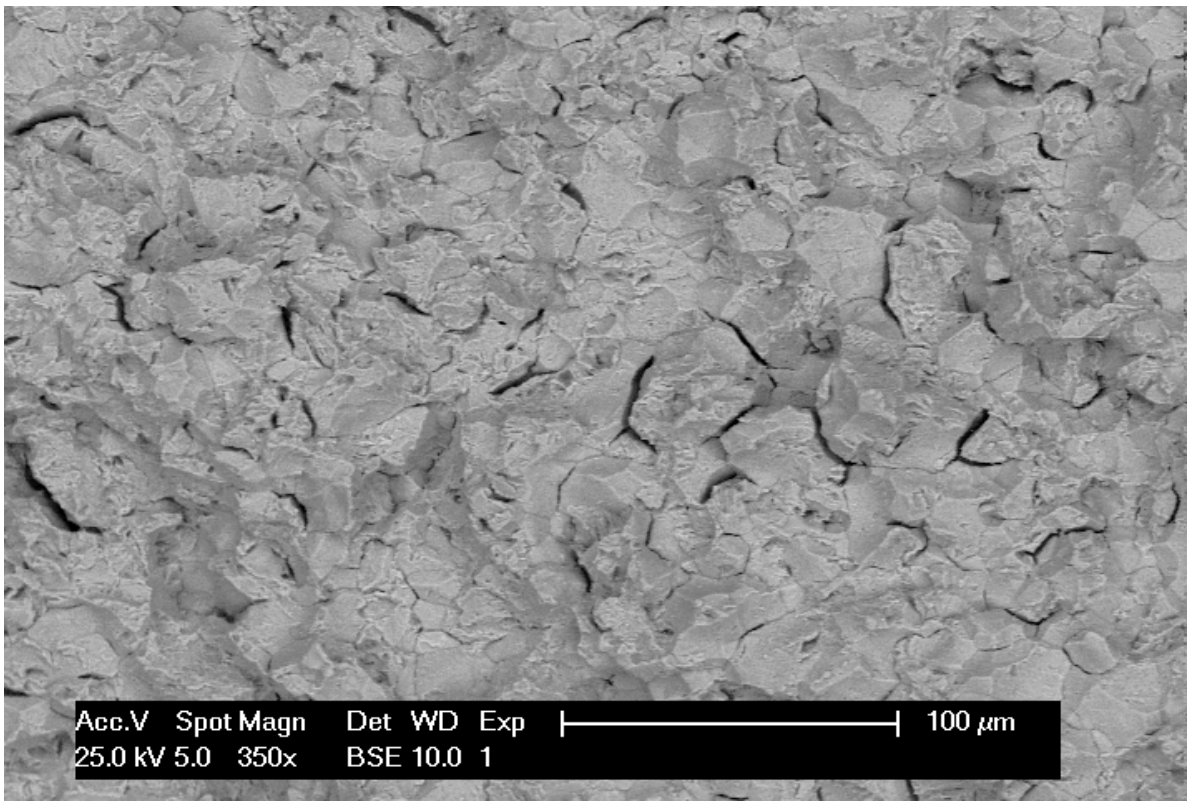


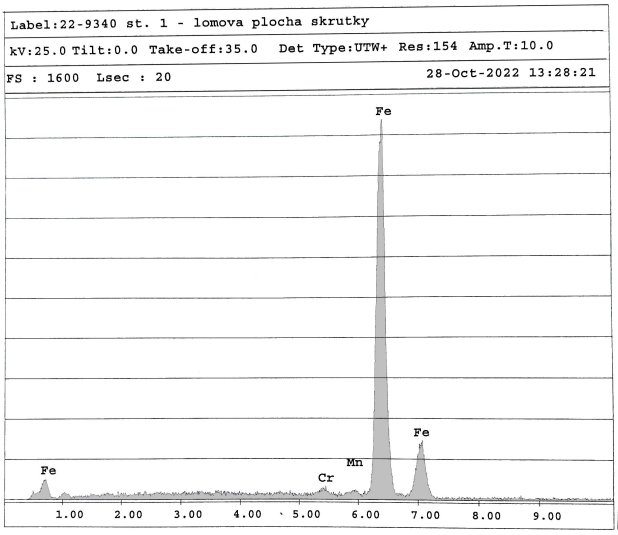

Foto č.7 Vnútorné trhliny v materiáli pozdĺž hraníc jeho zŕn.

K vodíkovej krehkosti materiálu dochádza v dôsledku migrácie vodíka do materiálu pri výrobe alebo koróziou materiálu v prevádzke. (V danom prípade prítomnosť korózie nebola zistená.) Vodík je prvý prvok v periodickej tabuľke a má najmenšiu veľkosť atómov zo všetkých prvkov, čo uľahčuje jeho vnikanie do ocelí aj následné šírenie cez oslabené hranice zŕn. Takéto poškodenie materiálu spôsobuje výrazné zníženie jeho ťažnosti a jeho porušenie spravidla hlboko pod medzou nominálnej pevnosti.

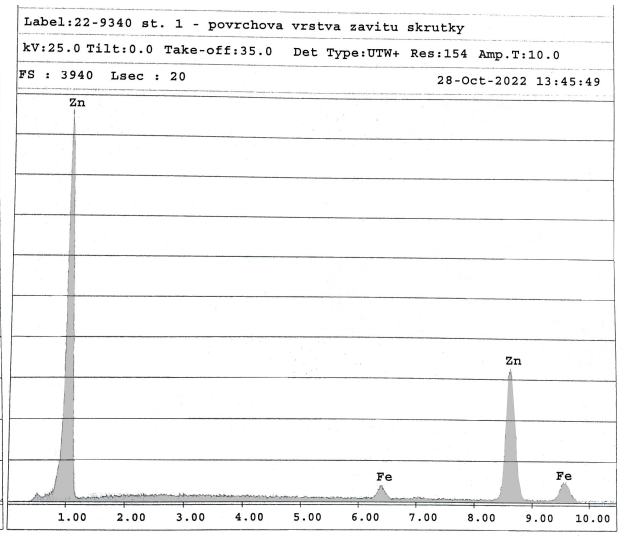
Vodíková krehkosť sa môže rozvinúť najmä u súčiastok vyhotovených z vysokopevnostných uhlíkových ocelí s tvrdosťou vyššou než 320 HV. (Materiály s tvrdosťou pod 320 HV sa nepovažujú za rizikové z hľadiska rozvoja vodíkovej krehkosti.) V súčiastkach, ktoré sú vyrobené z nehrdzavejúcej ocele, ani v súčiastkach, ktoré nie sú galvanicky pokovované k rozvoju vodíkovej krehkosti spravidla nedochádza.

Z hľadiska možnej difúzie vodíka do ocelí možno niektoré technologické procesy považovať za zvlášť rizikové. Jedná sa hlavne o morenie, tepelné spracovanie, nauhličovanie a galvanické pokovovanie. V prípade výroby vysokopevnostných skrutiek môže k difúzii vodíka do materiálu dochádzať aj pri valcovaní závitov alebo pri ich rezaní.
Ak to technológia výroby (vyplývajúca z požadovaných vlastností súčiastky) dovolí, treba vyrobenú súčiastku na konci výroby ohriať dostatočne na to, aby sa zachytenému vodíku umožnilo uniknúť von zo štruktúry.

Pri skúmaní lomovej plochy pomocou elektrónového mikroskopu s energiovo-disperzným rtg. spektrometrom bolo ďalej zistené, že poškodená kĺbová hlavica bola vyhotovená z ocele (pozri spektrogram č.1) a povrch poškodeného závitu bol pozinkovaný (spektrogram č.2).




Spektrogram č.1
Materiálové zloženie kĺbovej hlavice




Spektrogram č.2
Pozinkovanie závitu kĺbovej hlavice

Následne bola odlomená časť kĺbovej hlavice zboku odbrúsená do hĺbky približne 0,8 mm a následne aj vyleštená na metalografickej leštičke. Do opracovanej plochy bolo spravených viacero meracích vpichov tvrdomerom Luznik P.W. 106, pričom bola zistená stredná tvrdosť materiálu v tejto vrstve hlavice 51 HRC, čo odpovedá tvrdosti 528 HV.
Na jednej z predložených porovnávacích kĺbových hlavíc bol zrealizovaný skúšobný lom za účelom potvrdenia určitej homogenity štruktúry lomu v hĺbke približne 0,8 mm so štruktúrou lomu v strednej časti hlavice (foto č.8).

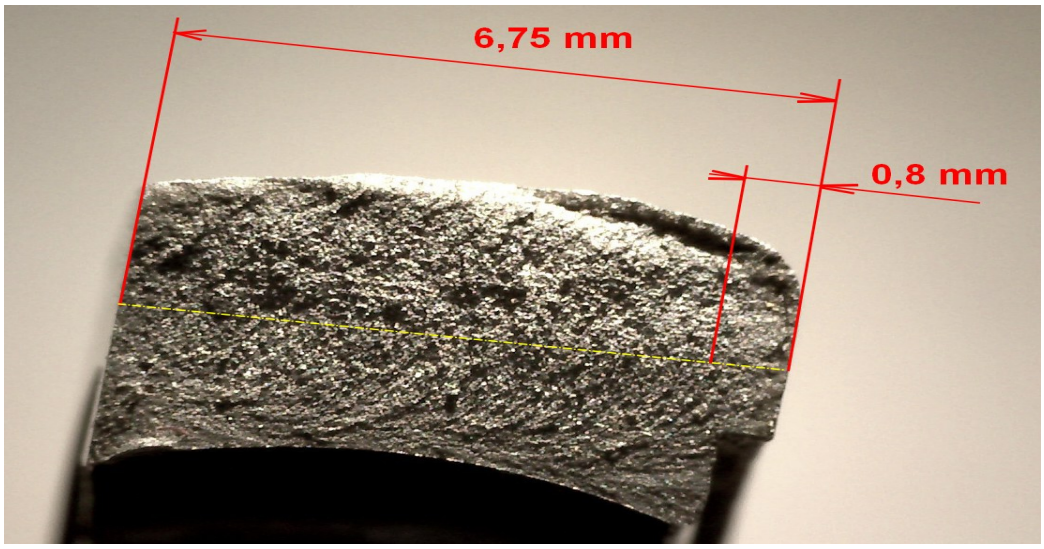
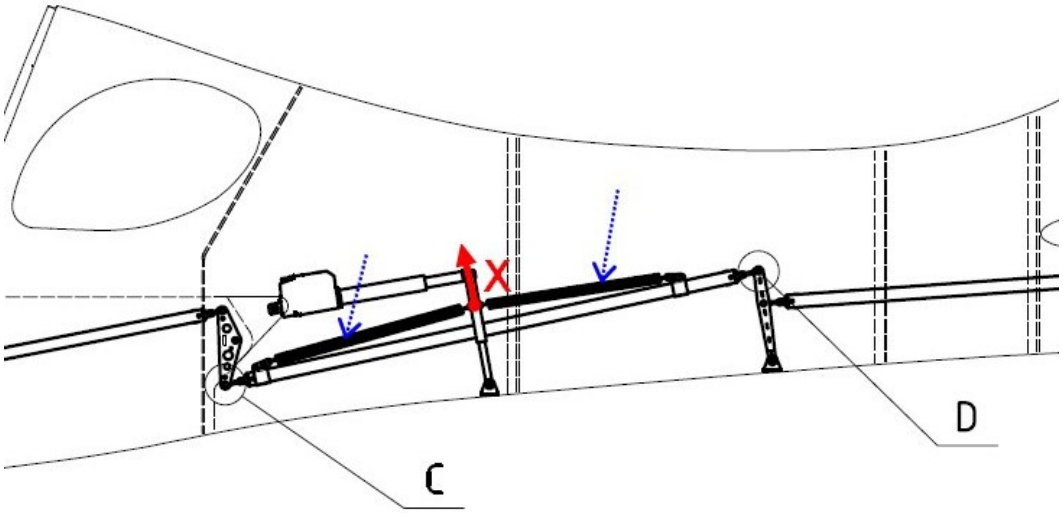



Foto č.8 Skúšobný lom porovnávacej kĺbovej hlavice a približne rovnaká štruktúra lomu v hĺbke 0,8 mm aj v stredovej časti hlavice

Bolo zistené, že tvrdosť materiálu hlavice zmeraná v hĺbke približne 0,8 mm odpovedá aj tvrdosti materiálu v strednej časti hlavice (možno predpokladať, že aj v závitovej časti hlavice), pričom nameraná tvrdosť 51 HRC je výrazne väčšia, než tvrdosť skrutiek najvyššej pevnostnej triedy podľa normy ISO 989-2, podľa ktorej majú mať skrutky najvyššej pevnostnej triedy 12,9 tvrdosť z intervalu “len“ 39 až 44 HRC.

Podľa predloženého materiálu “Určenie krútiaceho momentu zaisťovacej matice na koncoch tlačnej a ťažnej tyče“ (AEROSPOOL spol. s. r.o., Prievidza) sa doťahovací moment kontramatice zaisťujúcej ložiskové hlavice na spojovacích tyčiach riadenia výškového kormidla pohybujú v intervale 1,91 až 6,97 Nm (podľa spôsobu montáže a pracovníka, ktorý montáž vykonáva). Treba uviesť, že montážne ťahové predpätie vzniknuté v tomto spoji pri uvedených uťahovacích momentoch je hlboko pod deklarovanou pevnosťou materiálu hlavice.

Určité riziko z hľadiska prídavného ohybového namáhania na koncových ložiskových hlaviciach prostrednej spojovacej tyči môže predstavovať predpätie od vyrovnávacích pružín strednej polohy výškového kormidla (pružiny označené modrými šípkami na obr.1) pri veľkom prevýšení upevňovacieho centrovacieho bodu X nad úrovňou spojovacej tyče (pozri nevhodný posun bodu X v smere červenej šípky na obr.1). K veľkosti tohto prídavného ohybového zaťaženia v čase udalosti, resp. v čase poškodenia skúmanej kĺbovej hlavice, nemožno zaujať konkrétne stanovisko, nakoľko nie sú známe okrajové podmienky tohto zaťaženia (vzdialenosť bodu X od spojovacej tyče, poloha riadiacej páky v čase vzniku poškodenia a pod.).
Podľa poskytnutých informácií došlo v minulosti k praskaniu kĺbových hlavíc aj na prvej spojovacej tyči systému riadenia výškového kormidla, teda aj na tyči, na ktorej sa tieto pružiny nenachádzajú a teda v kĺbových okách na jej koncoch nemôže vznikať prídavné ohybové namáhanie.




Obr.1 Nadmerné prevýšenie bodu X nad spojovacou tyčou môže výrazne zvýšiť prídavný ohybový moment na koncových ložiskových hlaviciach označených pozíciami C a D

Z uvedených zistení vyplýva, že poškodená kĺbová hlavica bola zhotovená z vysokopevnostnej ocele, pokovovanej zinkom, čo možno považovať za rizikový faktor z hľadiska možného rozvoja vodíkovej krehkosti materiálu. Samotná vodíková krehkosť materiálu bola v danom prípade preukázaná veľkou početnosťou vnútorných trhlín v materiáli rozvinutých pozdĺž hranice jeho zŕn. Hlavnou príčinou poškodenia skúmanej kĺbovej hlavice, teda bolo tzv. vodíkové skrehnutie jej materiálu.

1.16.2.

**<u>Technická správa Výskumného ústavu zváračského</u>**

Ložisková koncovka (**obr. 1**) je súčasťou mechanizmu ovládania výškového riadenia lietadiel WT9 Dynamic LSA, WT 9 600 FG (RG) a WT-10 (**obr. 2**). Tvorí ju skrutka so závitom M6 s okom, v ktorom je uložené kĺbové guľôčkové ložisko.

Obr. 1 Ložisková koncovka

Skrutka koncovky je podľa [1,2] zhotovená z automatovej ocele C22 podľa STN EN 10083-2, tvárnením/ kovaním, sústružením a elektrolytickým zinkovaním. Kĺbové guľôčkové ložisko je, podľa [1,2], zhotovované z ocele 100Cr6 kovaním a kalením na tvrdosť 62 HRC.

Ložisková koncovka je v konštrukcii zaskrutkovaná do hlavnej matice tvaru kužeľového telesa prinitovanej na tiahlo. Skrutka je poistená proti pootočeniu vejárovou podložkou a zaisťovacou maticou M6 dotiahnutou momentom max. 7 Nm.

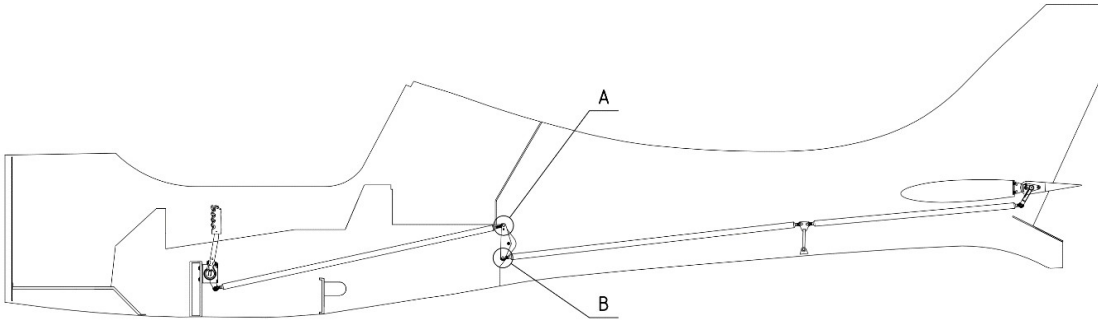
Pri prevádzke lietadla došlo k porušeniu koncovky v oblasti závitu medzi zaisťovacou maticou M6 a hlavnou maticou tvaru kužeľového telesa.

**Dodané vzorky**

Na rozbor boli dodané dve série vzoriek. V prvej sérii to boli dodané vzorky na rozbor chemického zloženia, mikroštruktúry a meranie tvrdosti a v druhej sérii dodali koncovky, ktoré sa porušili vo výrobe, na konštrukcii a pri skúške externým zaťažením. Koncovky boli z troch šarží ocele č. 17684, č. 20078 a č. 21486.

Rozbor chemického zloženia, mikroštruktúry a meranie tvrdosti sme vykonali na vzorkách s označením 1 až 6, a to po jednej zo šarže č. 17684 a č. 21486 a 4 vzorky zo šarže č. 20078:

- č.1 - Šarža č. 17684 (zo šarže, kde nebolo doteraz evidované poškodenie)
- č.2 - Šarža č. 20078 (zo šarže, ktorá zlyhala na zemi po inštalácii)
- č.3 - šarža č, 21486 (zo šarže, ktorá zlyhala počas letu v testovacom lietadle DY-764D)
- č.4 – šarža č. 20078 (zo šarže ktorá zlyhala na zemi po inštalácii)
- č.5 – šarža č. 20078 (zo šarže ktorá zlyhala na zemi po inštalácii)
- č.6 – šarža č, **21486** (zo šarže, ktorá zlyhala počas letu v testovacom lietadle DY-764D))




Obr. 2 Schéma konštrukcie lietadla a miesta výskytu porušených koncoviek – A, B

Makro- a mikrofraktografický rozbor povrchu lomu sme vykonali riadkovacím elektrónovým mikroskopom na vzorkách č. 7 až 11 zo šarže č. 20078 (4 ks) a č. 21486 (1 ks)., ktoré sa porušili vo výrobe (vzorka č. 7), na konštrukcii (vzorky č. 8 a 9) a pri skúške externým zaťažením (vzorky č. 10 a 11). Cieľom rozboru bola identifikácia spôsobu/mechanizmu porušovania koncoviek.

Boli to nasledovné vzorky

- č. 7: šarža č. 20078, praskla vo výrobe (nájdená prasknutá koncovka vo výrobe dňa 07.07.2022).
- č. 8: šarža č. 20078,– zlomené v mieste B (**Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**, nájdená prasknutá koncovka vo výrobe dňa 12.7.2022) DY-773D
- č. 9: šarža č. 20078, 63250600 - zlomené v mieste A (**Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**, nájdená prasknutá koncovka vo výrobe dňa 27.6.2022) DY-774D
- č. 10: šarža č. 20078, 63250600 – skúška na ohyb 154 kg s vysunutím 5 mm (ohyb do zlomu testovaný 06.06.2022)
- č. 11: šarža č. 21486, 63250600 – skúška na ohyb 165,6 kg s vysunutím 5 mm (ohyb do zlomu testovaný 27.06.2022)

**Metodika skúšok**

V rámci rozboru materiálu koncoviek sa vykonali nasledovné skúšky a analýzy:

- chemické zloženie materiálu koncoviek šarží č. 17684 (vzorka č. 1), č. 20078 (vzorka č. 2, 4 a 5) a č. 21486 (vzorka č. 3 a 6),
- chemické zloženie povlaku protikoróznej ochrany jednej z koncoviek,
- rozbor mikroštruktúry na vzorkách č. 1 až 4 svetelným mikroskopom,
- meranie tvrdosti materiálu koncoviek č. 1 až 6 po dĺžke a priereze drieku skrutky,
- rozbor lomu porušených koncoviek č. 7 až 11 riadkovacím elektrónovým mikroskopom.

Chemické zloženie materiálu ložiskových koncoviek sme vykonali rtg. spektrometrom BRUKER Titan, optickým spektrometrom BELEC COMPACT PORT. Obsah C, S sme stanovili metódou infračervenej spektrometrie po spálení v indukčnej peci na zariadení LECO CS.

Rozbor chemického zloženia povlaku sme vykonali energiovo - disperzným analyzátorom inštalovanom na riadkovacom elektrónovom mikroskope JSM-IT300A.1

Rozbor mikroštruktúry materiálu koncoviek vrátane mikroštruktúry povlaku sme vykonali svetelným mikroskopom OLYMPUS 51GX.

Tvrdosť materiálu koncoviek sme zmerali na tvrdomeri ZWICK 5232 pri zaťažení 98,1 N (HV10). Na každej skrutke sme vykonali 3 merania a stanovili ich aritmetický priemer.

Rozbor mechanizmu porušovania sme vykonali riadkovacím elektrónovým mikroskopom JEOL JSM-IT300A na troch porušených vzorkách.

**Výsledky skúšok**

Rozbor chemického zloženia materiálu skrutiek

Výsledky rozboru chemického zloženia materiálu ložiskových koncoviek sú uvedené v **tabuľke 1**. **Tabuľka** 1 uvádza aj smerné chemické zloženie ocele pevnostnej triedy 12.9 podľa normy STN EN ISO 898-1 [3].

**Tabuľka 1 Chemické zloženie materiálu ložiskových koncoviek (protokol VUZ /2022) a smerné chemické zloženie ocele podľa STN EN ISO 898-1**

| Označenie vzorky | hmot. koncentrácia (%) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | Mn* | Si* | P* | S | Cu* | Al* | Cr* |
| vz. č. 1 šarža č. 17684 | 0,446 | 0,57 | 0,22 | 0,015 | 0,026 | 0,069 | 0,016 | 0,81 |
| vz. č. 2 šarža č. 20078 | 0,509 | 0,69 | 0,21 | 0,008 | 0,0067 | 0,064 | 0,018 | 0,90 |
| vz. č. 3 šarža č. 21486 | 0,507 | 0,69 | 0,22 | 0,007 | 0,0044 | 0,065 | 0,017 | 0,86 |
| vz. č. 4 šarža č. 20078 | 0,518 | 0,66 | 0,20 | 0,008 | 0,0057 | 0,073 | 0,017 | 0,85 |
| Vz. č. 5 šarža č. 20078 | 0,485 | 0,70 | 0,22 | 0,012 | 0,004 | 0,098 | 0,021 | 0,86 |
| Vz. č. 6 šarža č. 21486 | 0,457 | 0,53 | 0,16 | 0,014 | 0,004 | 0,26 | 0,023 | 0,72 |
| $U_{komb.}$ [relat. %] | 6,0 | 4,0 | 10,0 | 20,0 | 20,0 | 8,0 | 15,0 | 10,0 |

| Označenie vzorky | hmot. koncentrácia (%) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ni* | Mo* | V* | Ti* | Nb* | CE (%)** |
| vz. č. 1 šarža č. 17684 | 0,010 | 0,004 | 0,007 | < 0,003 | 0,008 | 0,710 |
| vz. č. 2 šarža č. 20078 | 0,022 | 0,006 | 0,005 | < 0,003 | 0,009 | 0,812 |
| vz. č. 3 šarža č. 21486 | 0,018 | 0,004 | 0,006 | < 0,003 | 0,009 | 0,802 |
| vz. č. 4 šarža 20078 | 0,020 | < 0,003 | 0,004 | < 0,003 | 0,007 | 0,806 |
| Vz. č. 5 šarža č. 20078 | 0,023 | < 0,003 | < 0,003 | < 0,003 | 0,003 | 0,783 |
| Vz. č. 6 šarža č. 21486 | 0,032 | 0,007 | < 0,003 | < 0,003 | < 0,003 | 0,711 |
| $U_{komb.}$ [relat. %] | 20,0 | 25,0 | 25,0 | - | 25,0 | - |

*optická spektroskopia
**CE(IIW) = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15

**Poznámka:** Podľa dokumentu **[1]** ložiskové koncovky sa vyrábajú z ocele s označením C22. Jej chemické zloženie ocele stanovovala norma STN EN 10083-2, ktorá bola nahradená normou STN EN ISO 683-1 **[4]** v 2019. Chemické zloženie tejto ocele podľa už zrušenej normy udáva **tabuľka 2**. Oceľ C22 sa pritom v norme STN EN ISO 683-1 **[4]** nenachádza. Z toho dôvodu najbližšou oceľou, ktorá zodpovedá svojím chemickým zložením je legovaná oceľ pevnostnej triedy 12.9 podľa STN EN ISO 898-1 **[3].** Jej chemické zloženie je uvedené v **tabuľke 2**.

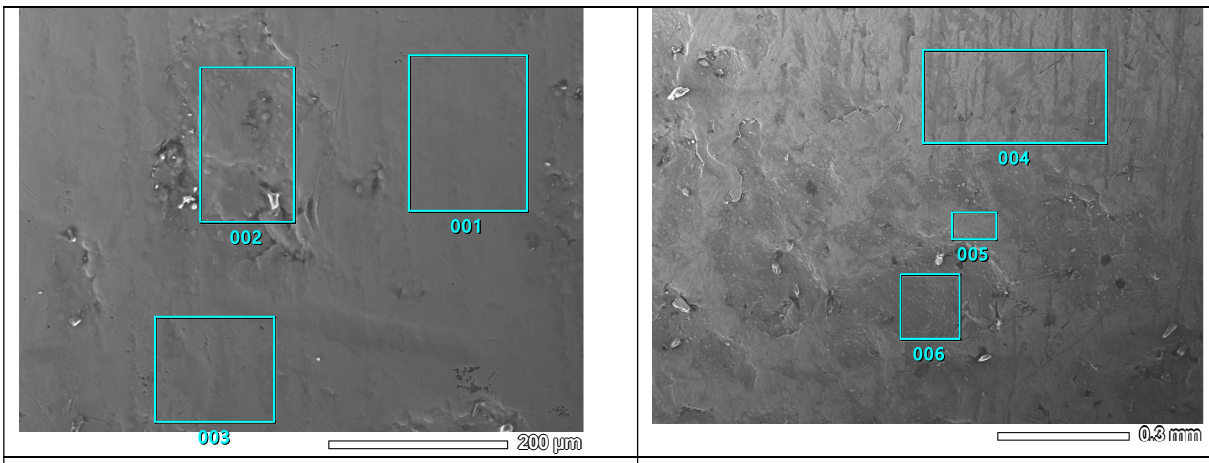
**Tabuľka 2 Smerné chemické zloženie ocele C22 podľa STN EN 10083-2 [2] a ocele C50R podľa STN EN ISO 683-1 [4]**

| oceľ | hmot. koncentrácia (%) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Cr+Mo+Ni |
| **C22 STN EN10083-2** | 0,18 0,24 | Max. 0,40 | 0,40 0,70 | Max. 0,03 | Max. 0,03 | Max. 0,40 | Max. 0,10 | Max. 0,40 | Max. 0,63 |
| **C50 STNENISO 683-1** | 0,47 0,55 | 0,10 0,40 | 0,60 0,90 | Max. 0,02 | 0,02 0,04 | Max. 0,40 | Max. 0,10 | Max. 0,40 | Max. 0,63 |
| **12.9 podľa STN EN ISO 898-1*** | 0,30 0,50 | - | - | Max. 0,02 | Max. 0,02 | Min. 0,30 | Min. 0,20 | Min. 0,30 | - |

*V = Min. 0,01 %; B = max. 0,003 %;
legovaná oceľ musí obsahovať jeden v prvkov Cr, Ni, Mo alebo V

Chemické zloženie povlaku protikoróznej ochrany koncovky

Miesta merania chemického zloženia povlaku na povrchu ložiskovej koncovky sú vyznačené na **obr. 3**. Výsledky merania sú sumárne uvedené v **tabuľke 3**. Meraním sa zistilo, že na povrchu koncovky sa nachádza povlak zinku.




a) miesta merania č. 1 až 3 | b) miesta merania č. 4 až 6

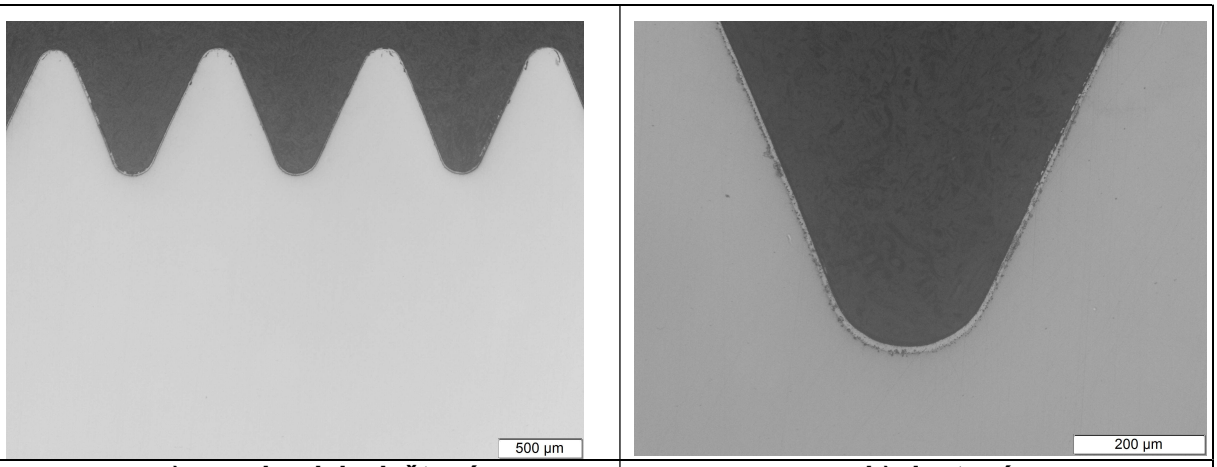
**Obr. 3 Miesta analýzy chemického zloženia povlaku na koncovke**

**Tabuľka 3 Namerané hodnoty obsahu prvkov na povrchu koncovky**

| Miesto merania | hmot. Koncentrácia (%) | |
|---|---|---|
| | **Fe** | **Zn** |
| **1** | 2,50 | 97,50 |
| **2** | 2,70 | 97,30 |
| **3** | 2,43 | 97,57 |
| **4** | 2,72 | 97,28 |
| **5** | 2,67 | 97,33 |
| **6** | 3,11 | 96,89 |
| **priemer** | **2,7** | **97,3** |

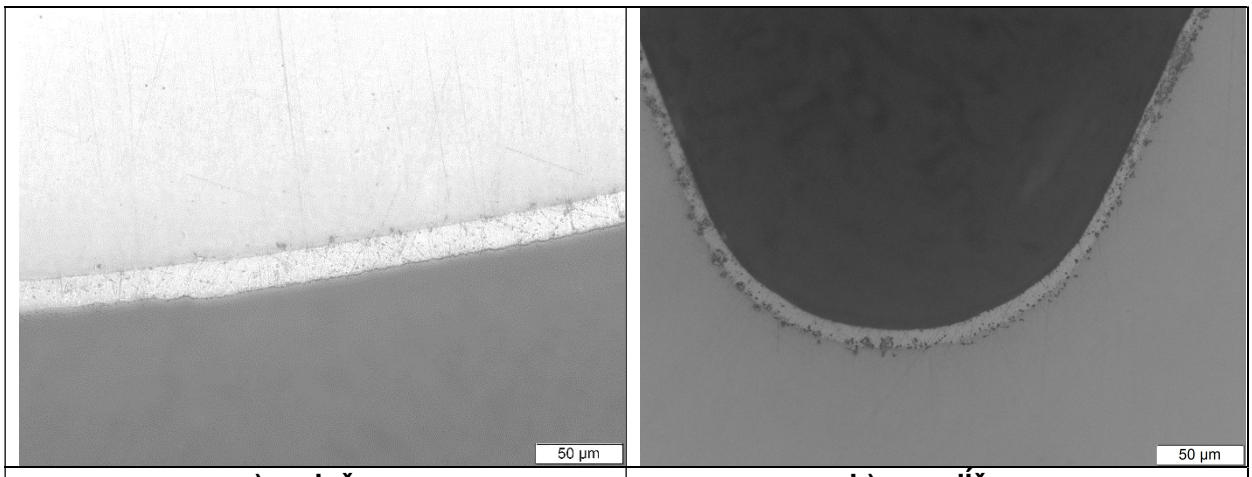
Rozbor makro a mikroštruktúry materiálu koncoviek

Makroštruktúru závitu ložiskových koncoviek dokumentuje **obr. 4a** po mechanickom leštení a **obr. 4b po n**aleptaní. Podľa makroštruktúry sú závity koncoviek zhotovené valcovaním. Povrch závitov je s povlakom (**obr. 5**), ktorý je rovnomerný v priečnom a aj v pozdĺžnom reze, hrúbky cca 20 µm.




**a) mechanicky leštené** | **b) leptané**

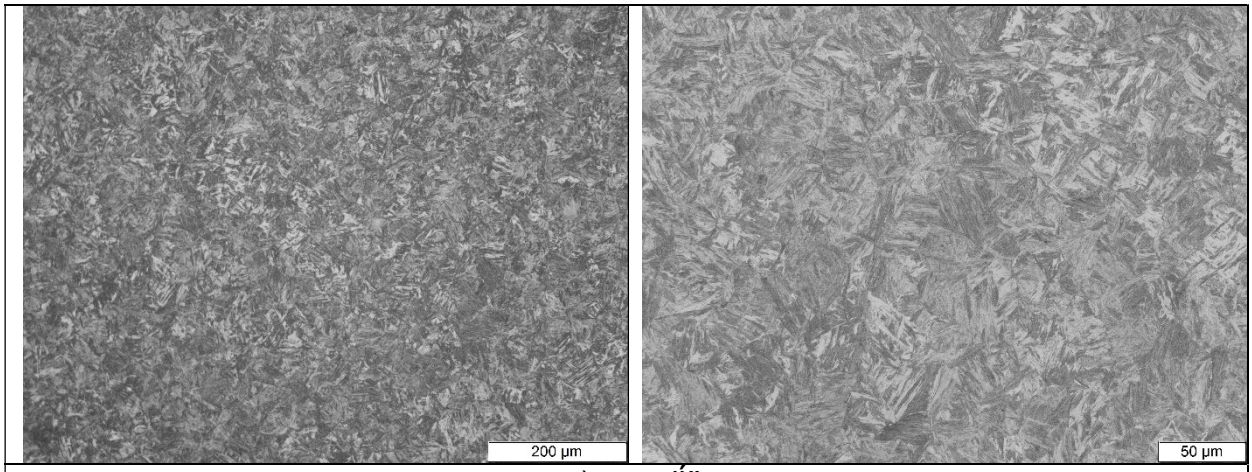
**Obr. 4 Makroštruktúra pozdĺžneho rezu závitu ložiskovej koncovky**



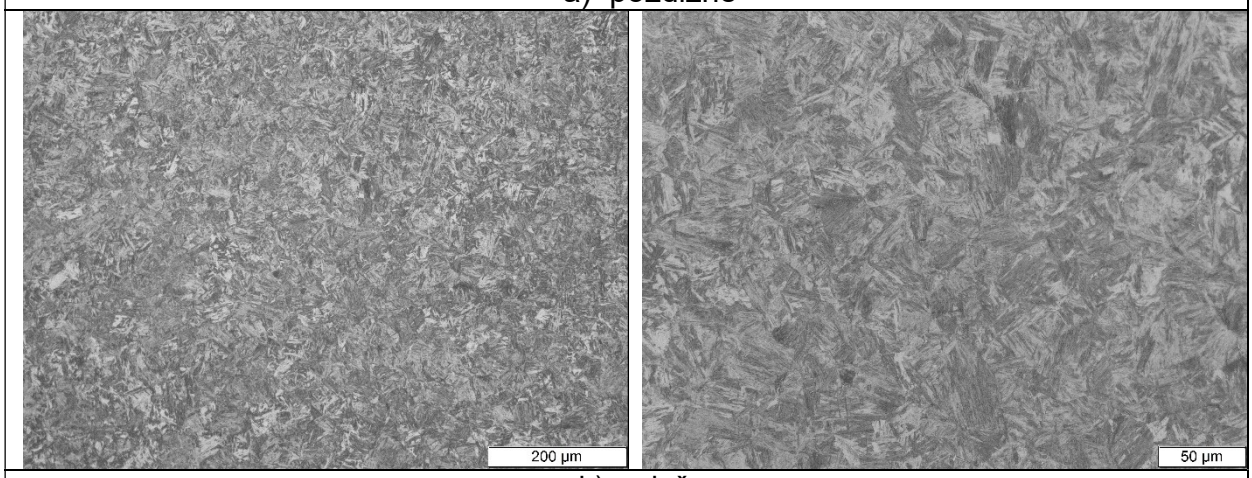

| a) priečny rez | b) pozdĺžny rez |
|---|---|

**Obr. 5 Povlak na priečnom a pozdĺžnom reze ložiskovej koncovky**

Mikroštruktúru materiálu – vzorky č. 1 až 4 – dokumentujú **obr. 6** (šarža č. 17684), **obr. 7 a 9** (šarža č. 20078) a **obr. 8** (šarža č. 21486**)**. Mikroštruktúra materiálu všetkých troch šarží je martenzitická.v celom pozdĺžnom a priečnom priereze.

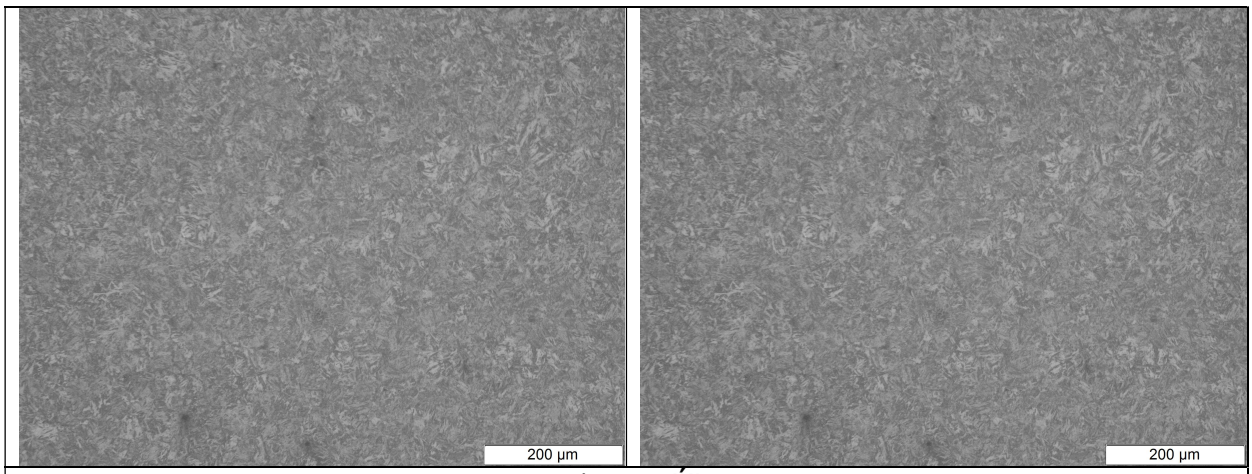



a) pozdĺžne

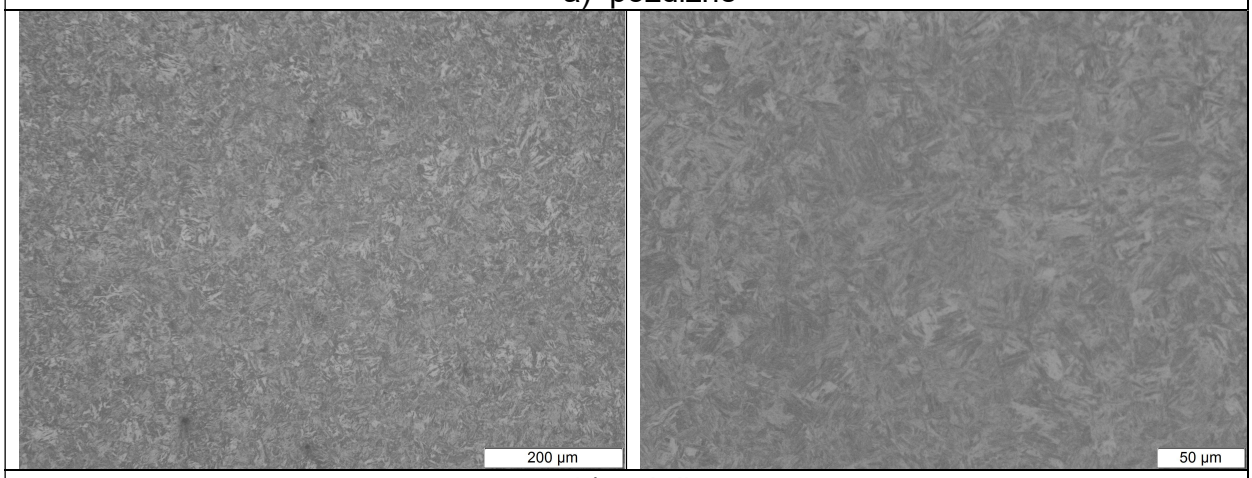



b) priečne

**Obr. 6 Vzorka č. 1 - šarža č. 17684**

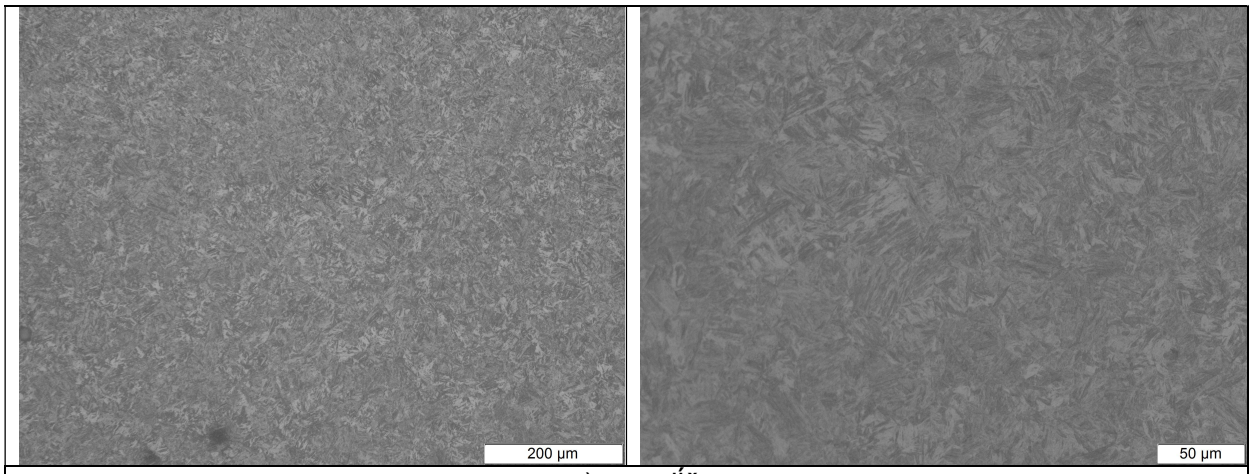



a) pozdĺžne

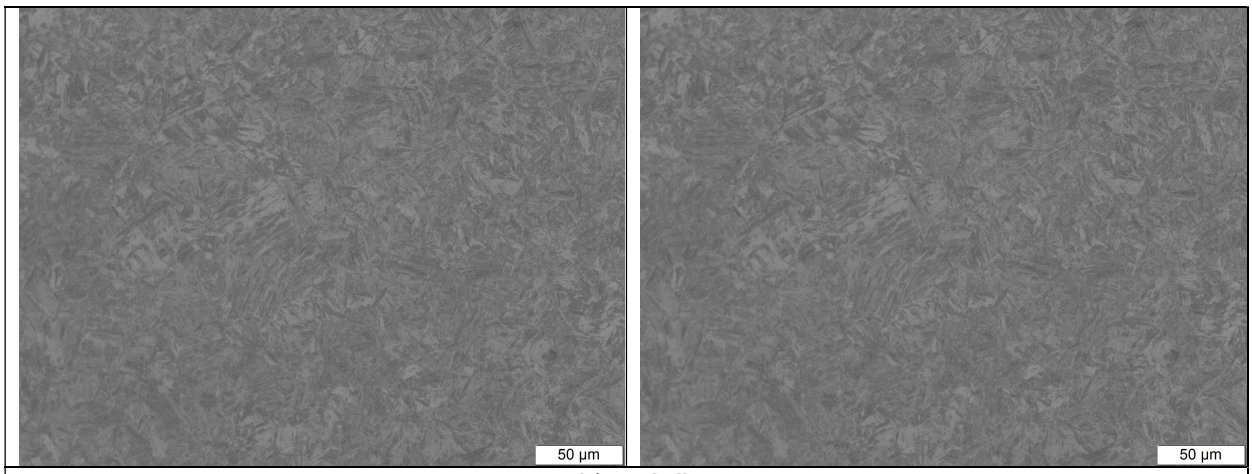



b) priečne

**Obr. 7 Vzorka č. 2 - šarža č. 20078**

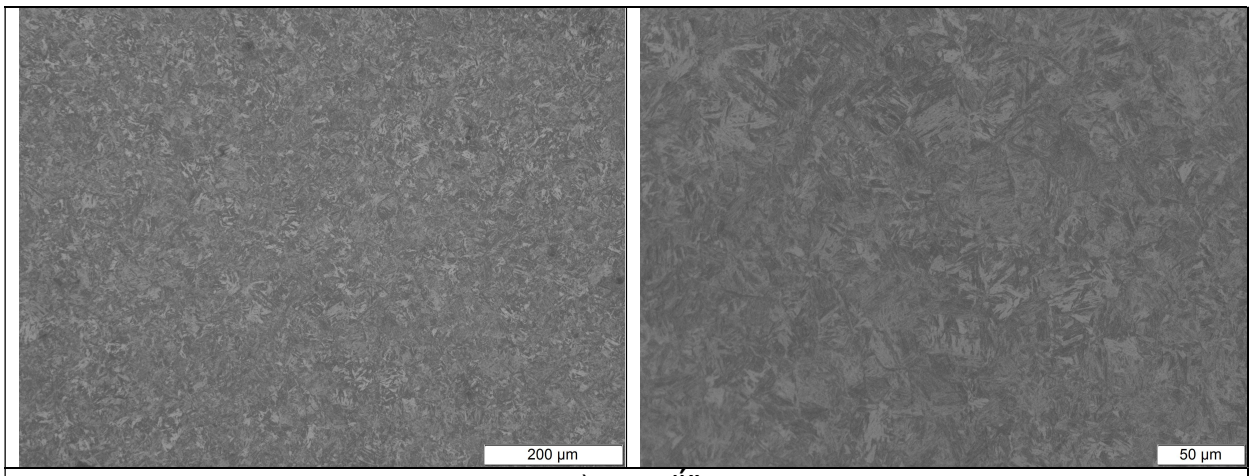



a) pozdĺžne

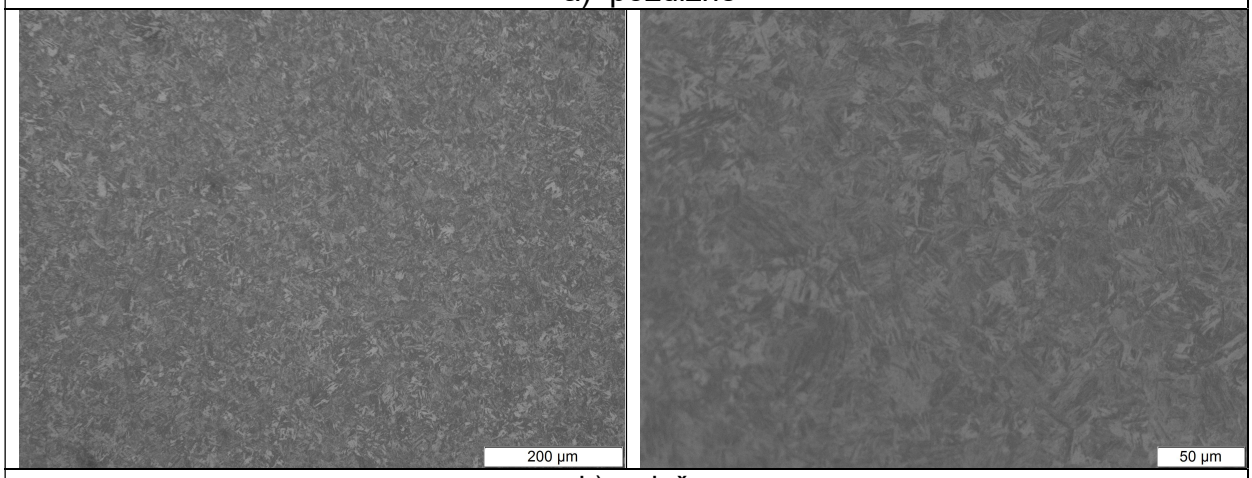



b) priečne

**Obr. 8 Vzorka č. 3 - šarža č. 21486**




a) pozdĺžne




b) priečne

**Obr. 9 Vzorka č. 4 - šarža č. 20078**

Meranie tvrdosti materiálu koncoviek

Výsledky merania tvrdosti materiálu ložiskových koncoviek sú uvedené v **tabuľke 4 a 5**. Priemerná tvrdosť skrutiek sa pohybuje v rozmedzí 470 – 503 HV10, pričom tvrdosť materiálu šarže 20078 je v intervale 479 – 493 HV10, materiálu šarže 21486 v intervale 493-503 HV10.

**Tabuľka 4 Namerané hodnoty tvrdosti materiálu ložiskových koncoviek šarží 20078, 21486 a 17684**

| Číslo vzorky | Číslo merania | d (mm) | HV10 |
|---|---|---|---|
| **1 – šarža č. 17684** | 1 | 0,199 | 468 |
| | 2 | 0,198 | 473 |
| | 3 | 0,199 | 468 |
| | priemer | | **470** |
| **2- šarža č. 20078** | 1 | 0,198 | 473 |
| | 2 | 0,196 | 483 |
| | 3 | 0,196 | 483 |
| | priemer | | **479** |
| **3 – šarža č. 21486** | 1 | 0,194 | 493 |
| | 2 | 0,193 | 498 |
| | 3 | 0,195 | 488 |
| | priemer | | **493** |
| **4 – šarža č. 20078** | 1 | 0,195 | 488 |
| | 2 | 0,195 | 488 |
| | 3 | 0,196 | 483 |
| | priemer | | **486** |
| **5 – šarža č. 20078** | 1 | 0,194 | 493 |
| | 2 | 0,194 | 493 |
| | 3 | 0,194 | 493 |
| | priemer | | **493** |
| **6 – šarža č. 21486** | 1 | 0,191 | 508 |
| | 2 | 0,191 | 508 |
| | 3 | 0,194 | 493 |
| | priemer | | **503** |

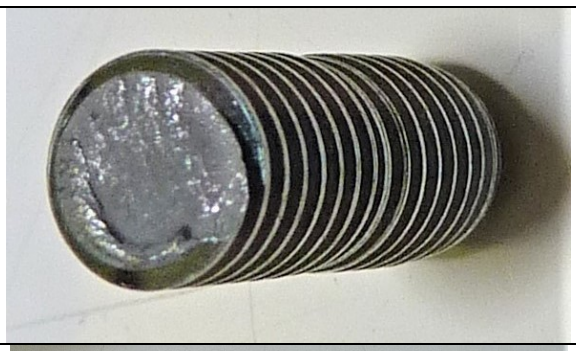
**Tabuľka 5 Priemerná tvrdosť materiálu koncoviek šarží č. 20078, č. 21486 a č. 17684**

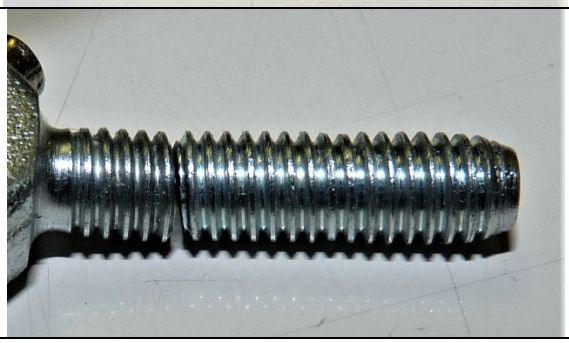
| šarža | Číslo vzorky | Tvrdosť (HV10) |
|---|---|---|
| **17684** | **1** | 470 |
| **20078** | **5** | 493 |
| | **4** | 486 |
| | **2** | 479 |
| **21486** | **6** | 503 |
| | **3** | 493 |

Hodnotám priemernej tvrdosti zodpovedá podľa STN EN ISO 18265 pevnosť v rozsahu 1520 až 1630 MPa.

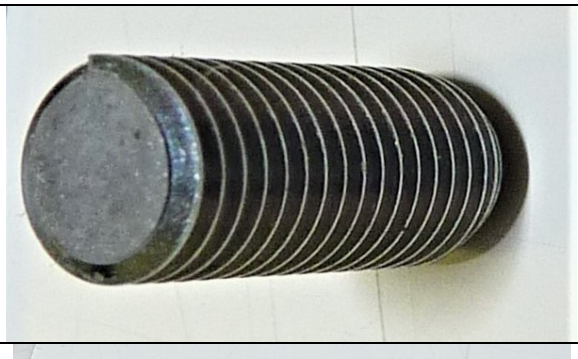
Rozbor lomu porušených koncoviek

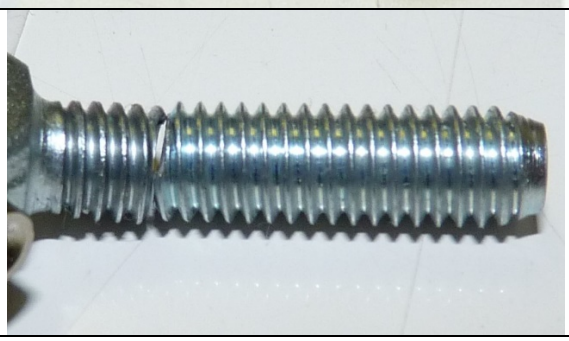
Morfológiu lomu vzoriek odobraných z exponovaného miesta v lietadle dokumentujú **obr. 10 a 11** a vzorky porušené ohybom v laboratóriu (**obr. 12 a 13**). K iniciácii lomu došlo vo všetkých prípadoch v päte piateho resp. šiesteho závitu od oka koncovky. Lom vzorky č. 6 je charakteristický so zreteľnou deformáciou po obvode v oblasti päty závitu. Ostatné vzorky sa porušili s minimálnou deformáciou v rovine porušenia.





**Obr. 10 Charakter lomu koncovky č. 9 zo šarže č. 20078, koncovka zlomená v mieste A lietadla DY-773D (obr. 1)**





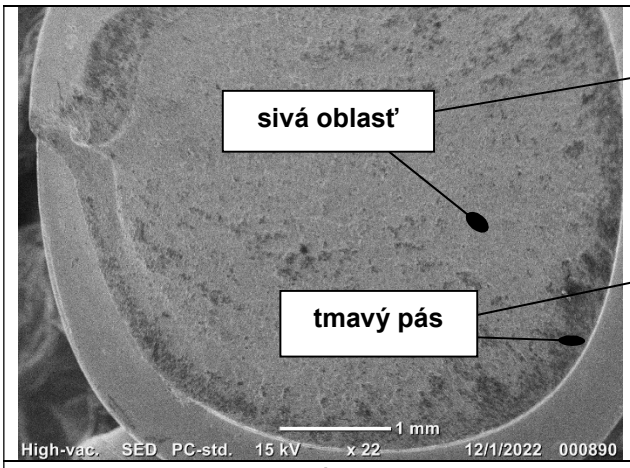
**Obr. 11 Charakter lomu koncovky č. 8 zo šarže č. 20078, koncovka zlomená v mieste B lietadla DY-774D (obr. 1)**

**Obr. 12 Charakter lomu koncovky č. 7 zlomenej vo výrobe zo šarže č. 20078**

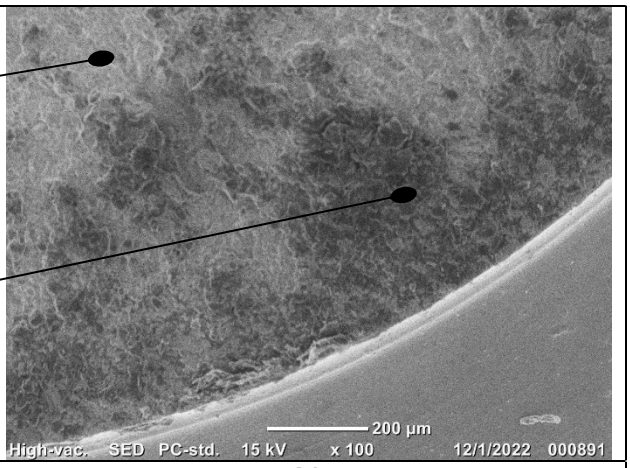
| a) vzorka č. 11 zaťaženie 165,6 kg s vysunutím 5 mm zo šarže 21486 | b) vzorka č. 10 zaťaženie 145 kg s vysunutím 5 mm zo šarže 20078 |
|---|---|

**Obr. 13 Charakter lomu koncoviek zlomených ohybom**

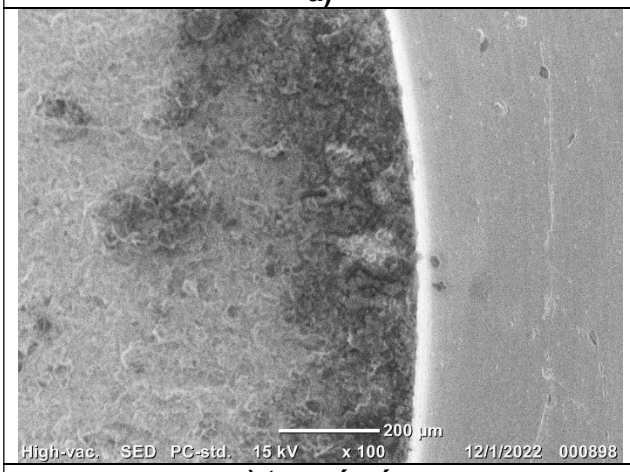
Mikromorfológiu lomu analyzovaných vzoriek dokumentujú **obr. 14 až 17**. Na všetkých lomoch sa po obvode povrchu pozoroval úzky tmavý pás s maximálnou šírkou cca 1 mm („golier“). Zvyšný povrch lomu koncoviek je sivý. Predstavuje cca 90 až 95% povrchu lomu. V úzkom tmavom páse sa na všetkých analyzovaných koncovkách zistila prítomnosť interkryštálového porušenia. Na vzorkách porušených v lietadle (**obr. 14 a 15**) sa v oblasti „goliera“ pozorovalo zvýšené množstvo nečistôt (oxidov) pochádzajúce pravdepodobne z prevádzky. Na vzorkách zlomených ohybom (č. 10 a 11) bolo množstvo oxidov výrazne menšie. Na zvyšku povrchu analyzovaných porušených koncoviek sa pozoroval transkryštálový tvárny a/alebo krehký lom.



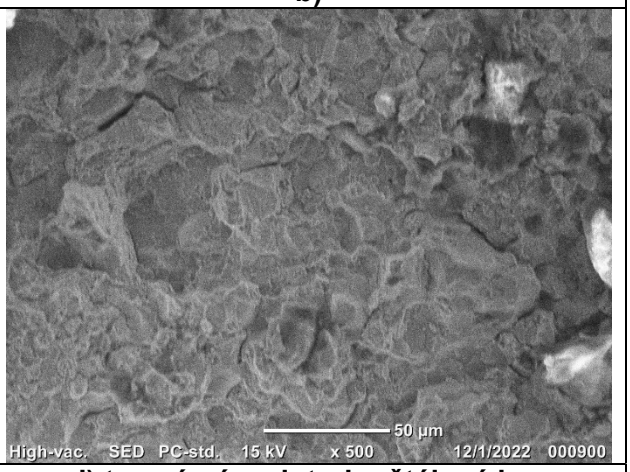

a)



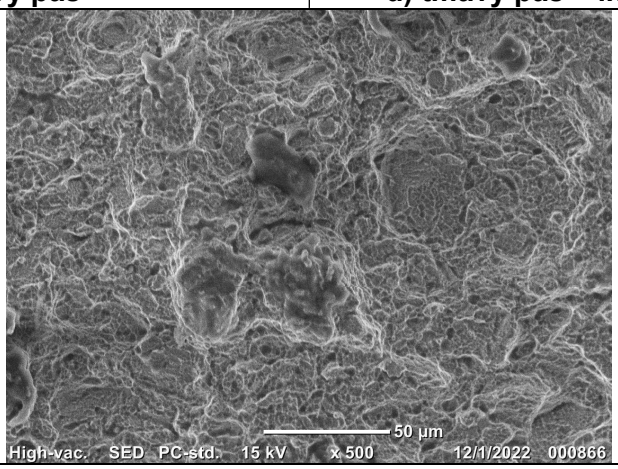

b)




c) tmavý pás

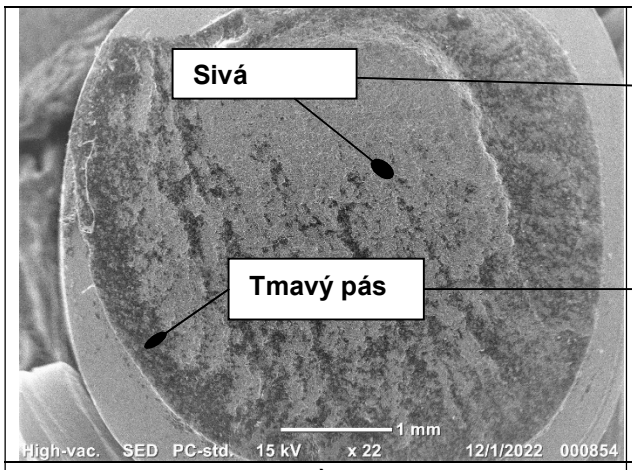



d) tmavý pás – interkryštálový lom

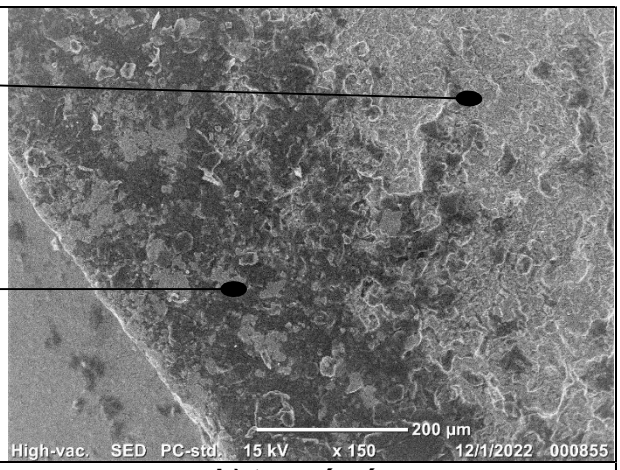



e) sivá oblasť – transkryštálový lom

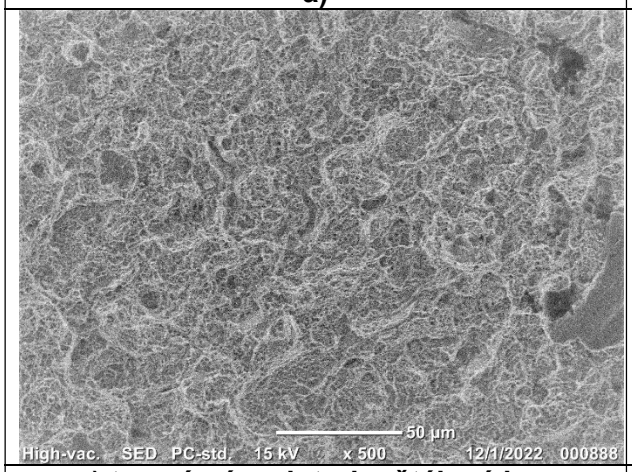
**Obr. 14 Morfológia koncovky č. 8 z miesta B DY-774D zo šarže č. 20078, koncovka zlomená v mieste B lietadla (obr. 1)**



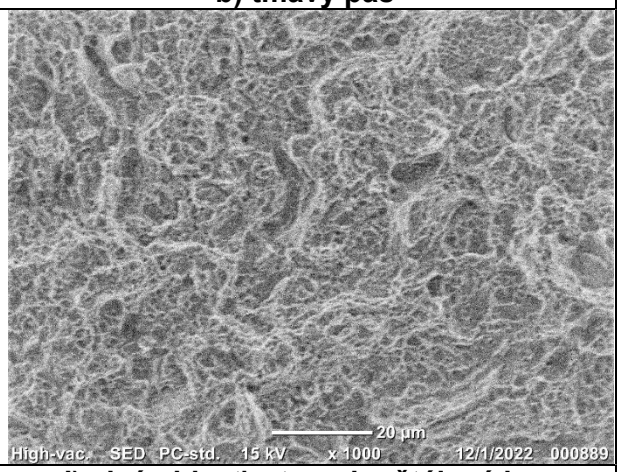

a)




b) tmavý pás

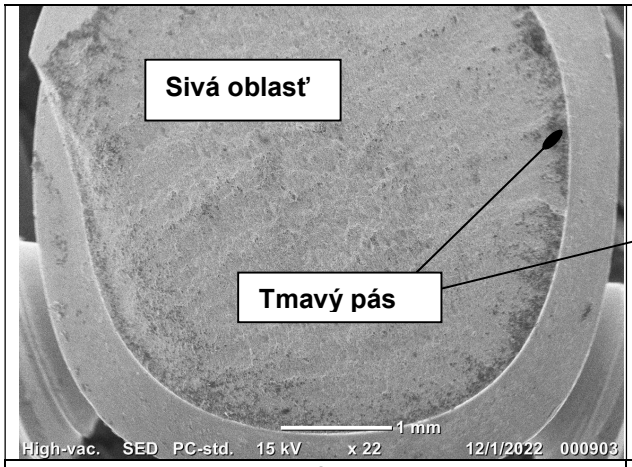



c) tmavý pás – interkryštálový lom

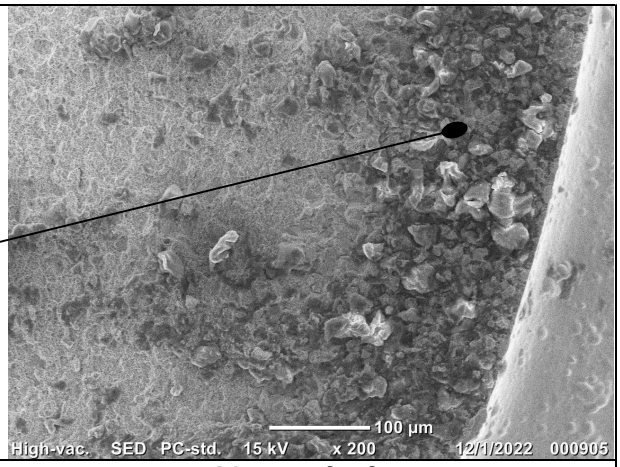



d) sivá oblasť – transkryštálový lom

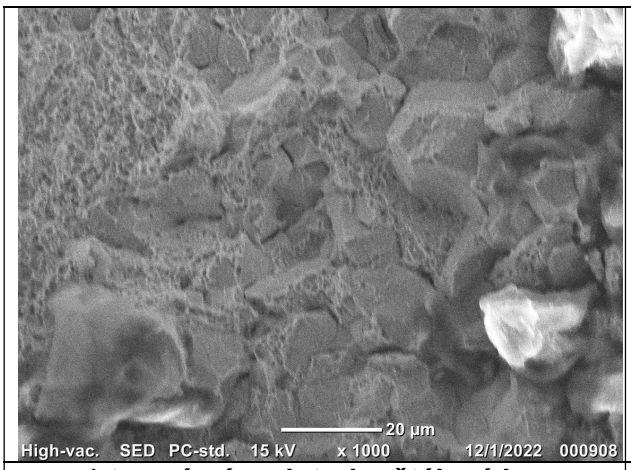
**Obr. 15 Morfológia koncovky č. 9 z miesta A DY-773D zo šarže č. 20078, koncovka zlomená v mieste A lietadla (obr. 1)**



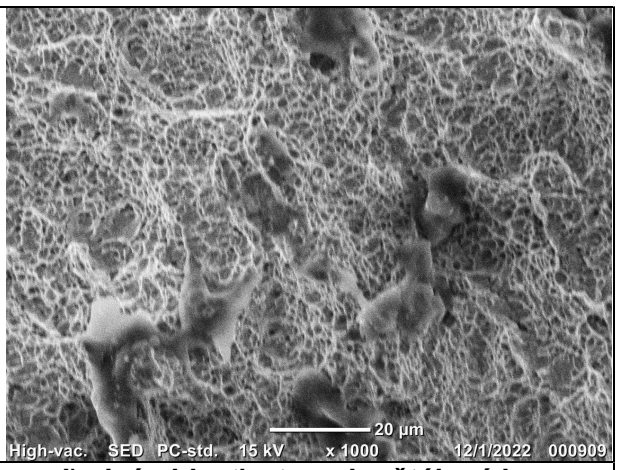

a)




b) tmavý pás

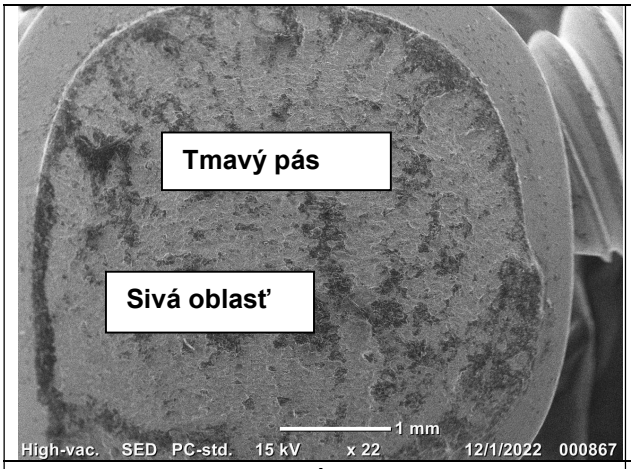



c) tmavý pás – interkryštálový lom

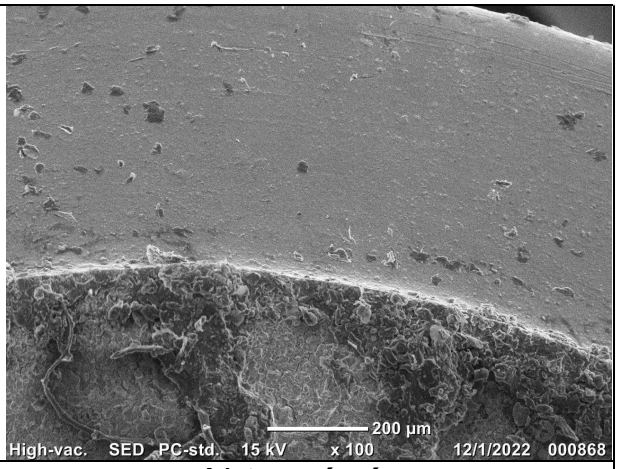



d) sivá oblasť – transkryštálový lom

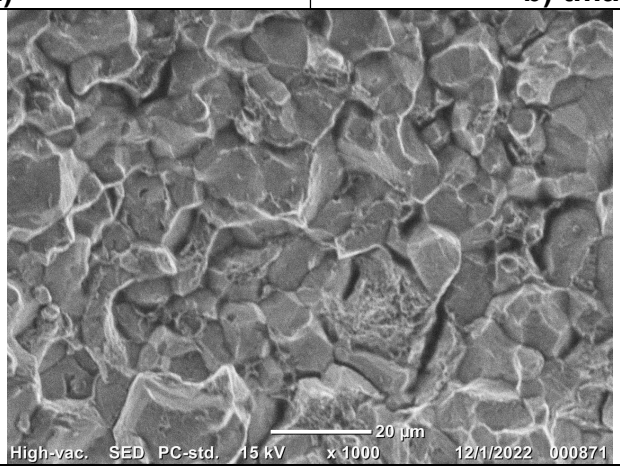
**Obr. 16 Morfológia lomu koncovky č. 10 zlomenej ohybom so zaťažením 145 kg a vysunutím zo šarže č. 20078**




a)




b) tmavý pás




c) tmavý pás - interkryštálový lom

**Obr. 17 Morfológia lomu koncovky č. 10 zlomenej ohybom so zaťažením 165 kg a vysunutím 5 mm zo šarže č. 21486**

V skúšobnom programe sa vykonali skúšky materiálu dvoch sérií ložiskových koncoviek. V prvej sérii sa na šiestich vzorkách (neporušených) posúdilo:

- chemické zloženie materiálu koncoviek a povlaku,
- mikroštruktúru,
- tvrdosť

materiálu ložiskových koncoviek.

V druhej sérii sa na piatich vzorkách porušených vo výrobe resp. v lietadle, analyzoval povrch lomu porušených koncoviek s cieľom stanoviť príčiny porušenia ložiskových koncoviek.

Rozborom chemického zloženia materiálu koncoviek sa zistilo, že všetky analyzované koncovky boli zhotovené z ocele legovanej Cr pričom obsah uhlíka bol v rozsahu 0,446 % až 0,518% a obsah Cr v rozsahu 0,720 % až 0,90 %.

Podľa **[1]** koncovky sa vyrábajú z ocele C22, ktorá podľa STN EN 10083-3 (zrušená v roku 2019) má zaručovaný obsah C = 0,18 až 0,24 %. Z toho vyplýva, že koncovky boli zhotovené z inej ocele. Norma STN EN 10083-3 bola nahradená normou STN EN ISO 683. Ani v tejto norme sa nenachádza oceľ, ktorej požiadavky by chemické zloženie ložiskových koncoviek spĺňalo. Pri ďalšej analýze noriem sa zistilo, že skrutky boli pravdepodobne zhotovené z ocele pevnostnej triedy 12.9 podľa STN EN ISO 898-1.

Chemickým rozborom materiálu povlaku koncoviek sa zistil vysoký obsah Zn a nízky obsah Fe (**tabuľka 2**). Indikácia obsahu železa je s veľkou pravdepodobnosťou spojená s prienikom elektrónového lúča, ktorý sa používa na rozbor, cez hrúbku povlaku. Rozborom mikroštruktúry koncoviek v pozdĺžnom smere sa zistilo, že hrúbka Zn povlaku na povrchu je cca 20 μm. Podľa morfológie mikroštruktúry bol povlak nanesený elektrolyticky.

Materiál všetkých analyzovaných skrutiek má mikroštruktúru martenzitickú (pravdepodobne popusteného martenzitu) zodpovedajúci stavu po kalení a popúšťaní. V mikroštruktúre jednotlivých koncoviek sa nepozoroval žiadny rozdiel. Podľa morfológie mikroštruktúry v oblasti závitu možno konštatovať, že závit koncoviek bol zhotovený valcovaním.

Tvrdosť materiálu koncoviek sa merala na pozdĺžnom reze v strede priemeru koncoviek. Na každej koncovke sa vykonali tri merania, z ktorých sa vypočítala priemerná hodnota tvrdosti. Priemerná tvrdosť materiálu koncoviek je v rozsahu 470 až 503 HV10. Hodnoty priemernej tvrdosti a mikroštruktúra analyzovaných koncoviek zodpovedajú materiálu vysokopevnej nízkolegovanej zušľachtenej ocele.

Priemernej tvrdosti materiálu koncoviek zodpovedá podľa STN EN ISO 18265 **[8]** pevnosť v rozsahu 1520 až 1630 MPa. Táto pevnosť spĺňa podľa STN EN ISO 898-1 požiadavky pre pevnostnú triedu 12.9 (min. 1220 MPa).

Najnižšia tvrdosť 470HV10 sa namerala na materiáli šarže č. 17684**,** na ktorej sa doteraz poškodenie neevidovalo.

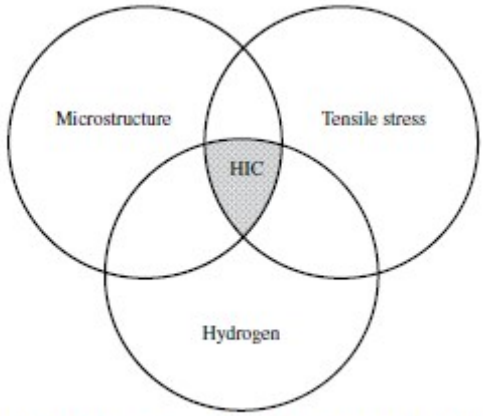
Najvyššia tvrdosť (493-503HV10) sa namerala na materiáli šarže č. 21486 (vzorky č. 3 a 6). Koncovka, ktorá zlyhala počas letu testovacieho lietadla DY-764D, bola z tejto šarže.

Na materiáli koncoviek šarže č. 20078**,** z ktorej jedna skrutka zlyhala po inštalácii do sériovo vyrábaného lietadla do 24 hodín a druhá sa neporušila ani pri zaťažení ťahom 13,5 kN, sa namerala tvrdosť v rozsahu 479 až 493HV10.

Rozborom makro- a mikro-morfológie lomu koncoviek riadkovacím elektrónovým mikroskopom sa zistilo, že porušenie sa iniciovalo v koreni/päte závitu. V tejto oblasti sa zistil interkryštálový charakter porušenia. Tento mechanizmus porušovania je typický pre lom vysokopevných ocelí s martenzitickou mikroštruktúrou a prítomnosťou atomárneho vodíka.

***Spôsob porušovania martenzitických ocelí po elektrolytickom pokovovaní***

Z vyššie uvedených zistení možno konštatovať, že k porušeniu koncoviek došlo v dôsledku interakcie troch faktorov materiálu koncoviek, a to martenzitickej mikroštruktúry vysokej tvrdosti, procesu elektrolytického pokovenia produkujúceho atomárny vodík a deformácie. Vplyv týchto faktorov znázorňuje **obr. 18.**




**Obr. 18 Vplyv vodíka, mikroštruktúry a ťahového napätia na vznik porušenia indukovaného vplyvom vodíka – HIC [6,7]**

Tvorba atomárneho vodíka H+ je sprievodný jav pri elektrolytickom pokovovaní, ktorý je všeobecne známy **[5].** Pri tomto procese dochádza podľa **[5]** k difúzii atomárneho vodíka do ocele, vzhľadom na to, že má výrazne menší priemer atómu v porovnaní s priemerom atómov železa/ocele. Pri zaťažení/deformácii ocelí, v ktorej sa nachádza difúzny vodík, dochádza k porušovaniu, ktoré je v materiálovom inžinierstve známe ako **vodíkom indukované krehnutie** resp. **vodíkom indukované praskanie** ocele (hydrogen embrittlement – hydrogen induced cracking) **[6,7]**. Atomárny vodíka H+ znižuje deformačnú schopnosť ocele a podľa obsahu vodíka zvyšuje a/alebo znižuje pevnosť ocele pri lome. Zmeny deformačnej schopnosti a pevnosti ocele sa prejavujú zmenou charakteru/mechanizmu lomu, ktorý sa uplatňuje pri porušovaní.

Vysokopevné materiály sa pri zaťažení bez vplyvu vodíka porušujú cez zrná (tzv. transkryštálové porušenie) tvárnym (húževnatým) a/alebo štiepnym (krehkým) mechanizmom. Mechanizmus porušovania vysokopevnej ocele sa vplyvom prítomnosti vodíka mení. Závisí od množstva vodíka a úrovne zaťaženia/deformácie. Na lomoch najmä vysokopevných ocelí, obsahujúcich atomárny vodík, sa vyskytujú dve morfológie porušenia, a to interkryštálový (lom po hraniciach zŕn) a/alebo transkryštálový tzv. kvázištiepny t.j. štiepny lom so znakmi vplyvu vodíka. Čím vyšší je obsah vodíka a nižšia úroveň zaťaženia, tým je podiel interkryštálového lomu väčší. Naopak, pri nízkom obsahu vodíka a vysokom zaťažení podiel interkryštálového lomu sa zmenšuje a rastie podiel transkryštálového kvázištiepneho lomu. Z toho dôvodu možno konštatovať, že proces elektrolytického pokovenia zinkom generujúci atomárný/difúzny vodík, sa podieľal na porušovaní ložiskových koncoviek.

***Porušenie ložiskových koncoviek***

Vzhľadom na vyššie uvedenú úvahu o vplyve elektrolytického pokovovania na generovanie atomárneho vodíka a jeho vplyv na vlastnosti ocelí **predpokladáme**, že k porušeniu ložiskových koncoviek, ktoré boli zhotovené z martenzitickej ocele, došlo v dôsledku:

- difúzie vodíka pri pokovovaní do ocele,
- deformácie koncoviek vyvolanej predpätím poisťovacou maticou.
- Porušenie koncoviek závisí od:
- tvrdosti materiálu,
- obsahu vodíka a
- úrovne deformácie.

Z výsledkov rozboru materiálu koncoviek a z informácií o jednotlivých šaržách z hľadiska výskytu ich porušenia pred a po montáži predpokladáme, že lom koncoviek:

- sa nepozoroval v šarži 17684, v ktorej vzorka mala najnižšiu tvrdosť t.j. 470 HV10,
- sa pozoroval v šarži 21486 s najvyššou tvrdosťou v rozsahu 493-503HV10,
- v šarži 20078 s tvrdosťou 479 až 493HV10 sa porušila jedna koncovka a druhá nie.

To znamená, že k porušeniu koncoviek dochádza v závislosti od tvrdosti materiálu.

Podľa zadávateľa koncovky zo šarže č. 17684 sa po montáži do lietadla neporušili. Koncovky zo šarže 21486 sa porušili a z 2 koncoviek zo šarže č. 20078 sa jedna porušila (č. 2) a druhá nie (č. 4). Stav jednotlivých koncoviek je znázornený v závislosti od CE (IIW) a tvrdosti v tabuľke 6 na **obr. 19**.

Tvrdosť materiálu koncoviek závisí od chemického zloženia, režimu kalenia a následne popúšťania. Vplyv chemického zloženia na tvrdosť po kalení sa v praxi posudzuje hodnotou uhlíkového ekvivalentu CE (IIW) zo vzťahu

CE (IIW) = C + (Mn/6)+(Cr+Mo+V/5)+((Ni+Mo/15) (%),

ktorý vyjadruje schopnosť prekalenia ocele. Vypočítané hodnoty uhlíkového ekvivalentu zo zisteného chemického zloženia sú uvedené v **tabuľke 6. Tabuľka 6** uvádza i priemernú tvrdosť materiálu koncoviek t.j. po kalení a popúšťaní.

Výslednú tvrdosť materiálu koncoviek významne určuje režim popúšťania, ktorý je daný výškou teploty a času.

Popúšťanie po kalení je tepelne aktivovaný proces. Teplota a čas sú ekvivalentné parametre a ich ekvivalenciu posudzuje Hollomon - Jaffe parameter

$$H = \frac{T\,(C + \log t)}{1000}, \text{ kde}$$

T – teplota (K), C – konštanta pre ocele 15, t – čas popúšťania (hod.)

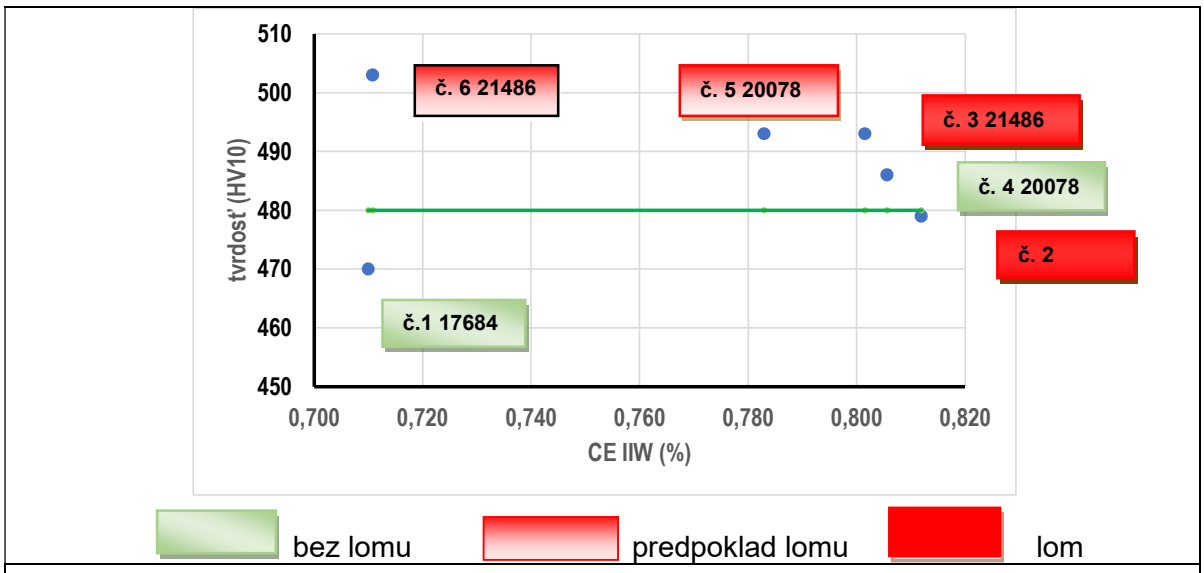
Pri rovnakej hodnote parametra H sa, nezávisle od teploty a času popúšťania, dosiahnu rovnaké vlastnosti ocele, v tomto prípade tvrdosť.

Meraním tvrdosti sa zistilo, že špecifickým prípadom sú koncovky šarže č. 21486 a č. 17684. Koncovky zo šarže č. 17684 s nízkou priemernou tvrdosťou (470HV10) sa neporušili. Koncovka zo šarže č. 21486 s vysokou tvrdosťou (503HV10) sa porušila a je predpoklad, že túto tavba má, vzhľadom na vysokú tvrdosť, veľký predpoklad na porušenia. To je napriek hodnote CE (IIW)=0,711 %, ktorá je prakticky rovnaká ako CE šarže č. 17684 (CE=0,710 %). Príčinou tohto rozdielu tvrdosti materiálu dvoch tavieb koncoviek sú rozdielne podmienky ich tepelného spracovania/zušľachťovania, a to najmä teploty a času popúšťania. Preto predpokladáme, že jednotlivé šarže koncoviek boli spracované hlavne rozdielnym režimom popúšťania. Výsledkom bola rôzna priemerná tvrdosť, a to dokonca pri tej istej hodnote CE (IIW).

**Tabuľka 6 Hodnoty priemernej tvrdosti a uhlíkového ekvivalentu CE (IIW) materiálu koncoviek**

| šarža | Číslo vzorky | Priemerná tvrdosť (HV10) | CE (IIW) (%) | poznámka |
|---|---|---|---|---|
| 20078 | 5 | 493 | 0,783 | lom* |
| | 4 | 486 | 0,806 | bez lomu |
| | 2 | 479 | 0,812 | lom |
| 21486 | 6 | 503 | 0,711 | lom* |
| | 3 | 493 | 0,802 | lom |
| 17684 | 1 | 470 | 0,710 | bez lomu |

*predpoklad




**Obr. 19 Závislosť tvrdosti materiálu koncoviek od uhlíkového ekvivalentu CE (IIW) a výskytu porušenia v konštrukcii**

***Požiadavka na vlastnosti materiálu ložiskových koncoviek***

Z vyššie uvedenej diskusie a údajov zadávateľa o správaní sa koncoviek z jednotlivých šarží vyplýva, že koncovky zo šarže č. 17684 v prevádzke nevykázali porušenie. Materiál koncovky z tejto šarže má priemernú tvrdosť pod 475HV10. Z toho dôvodu predpokladáme, že tvrdosť pod 475HV10 je limitom pre maximálnu priemernú hodnotu tvrdosti materiálu koncoviek na zabezpečenie ich spoľahlivej činnosti v konštrukcii lietadla.

Požiadavka maximálnej priemernej tvrdosti materiálu koncoviek rešpektuje vplyv chemického zloženia, tepelného spracovania, procesu pokovovania a deformácie vyvolanej v konštrukcii. Túto hodnotu tvrdosti materiálu koncoviek by mal objednávateľ požadovať od ich výrobcu pri objednávke koncoviek. Kritérium vychádza z údajov o správaní sa koncoviek po inštalácii do konštrukcie.

## 1.17 Informácie o organizáciách a riadení

Prevádzkovateľ lietadla je výrobca, držiteľ oprávnenia na projektovanie AP DOA číslo EASA.AP356, osvedčenia o schválení výrobnej organizácie číslo SK.21G.0002, osvedčenia o povolení organizácie vykonávajúcej údržbu číslo SK.CAO.001.Vykonáva skúšobné lety prototypov a experimentálne upravených lietadiel, skúšobné lety sériové, a skúšobné lety prevádzkové lietadiel typu WT9 Dynamic. Skúšobné lety zabezpečuje letecký a pozemný personál výrobcu, skúšobné lety prototypov a experimentálne upravených lietadiel vykonávajú piloti výrobcu a v špecifických prípadoch zmluvní piloti. Posádky pri skúšobných letoch dodržiavajú Letiskovú prevádzkovú príručku LZPE. Program a metodiku letových skúšok vypracováva za výrobcu oddelenie Projekčnej Organizácie firmy Aerospool Prievidza spol. s r.o..

Prevádzkovateľ použil lietadlo k vykonaniu vývojových letových testov na základe písomného povolenia majiteľa lietadla zo dňa 13.06.2022. Vývojový letový test podľa AS-ULL-15-002 bol vykonaný na základe Príkazu na letový test č.34/2022 (Formulár: QS-FORM2-500) vydaného prevádzkovateľom dňa 07.07.2022. Príprava lietadla na testovací let podľa AS-ULL-15-002 a podľa Work Order No. 001/DULF/2022 bola vykonaná dňa 07.07.2022 certifikovaným technikom údržby.

## 1.18 Doplnkové informácie

Vývojový letový test bol vykonávaný v rámci certifikačného procesu lietadla po zástavbe výkonnejšej pohonnej jednotky. Let bol zameraný na overenie letových parametrov a stability so zameraním sa na prejavy aeroelastického kmitania - trepotania

v rozsahu rýchlostí od 300-380 km/h s odstupom 10 km/h, a to za nasledujúcich podmienok letu podľa FTR č. 13-25-220707-1:

- FL 140,klesanie , vztlakové klapky-poloha 0°, nastavený výkon- voľnobeh,
- ALT: 10000 ft MSL, horizontálny let- klesanie, vztlakové klapky-poloha 0°, nastavený výkon- podľa požiadaviek.

Vyhodnocované parametre (podľa FTR č. 13-25-220707-1):
- vznik nadmerných vibrácií
- vznik tzv. flutteru (trepotanie)
- vznik tlmenia
- počet oscilácií
- účinnosť krídielok, výškového kormidla, smerového kormidla
- reverzný účinok kormidiel
- divergencia riadenia
- plynulý prechod do stúpania po dosiahnutí $V_D$ (384 km/h)

Počas vývojového letového testu nedošlo k prekročeniu výrobcom predpísaných parametrov lietadla.

Výrobca lietadla/ prevádzkovateľ prijal počas bezpečnostného vyšetrovania vlastné opatrenia na zaistenie bezpečnosti

Výrobca lietadla AEROSPOOL, spol. s r.o. prijal v priebehu vyšetrovania predmetnej leteckej nehody opatrenia na zaistenie bezpečnosti:

- pozastavenie prebiehajúcich letových testov podľa AS-ULL-15-002,
- rozšírenie ložiskových koncoviek art.č. 63250600 o novú chybnú šaržu: 220621 (ložiskové koncovky s číselným označením na tele koncovky- 20078 a 21486),
- spätné identifikovanie lietadiel vybavených ložiskovými koncovkami šarže: 220621,
- pozastavenie prevádzky lietadiel vybavených ložiskovými koncovkami šarže: 220621,
- revidovanie bulletinu a jeho doplnenie o nové informácie a poznatky,
- vydanie bulletinu č. SB600-2022-1 rev.2 – výmena ložiskových koncoviek v systéme ovládania výškového kormidla a v systéme ovládania krídielok.
- zmena dodávateľa ložiskových koncoviek.

EASA vydala dňa 06.12.2022 bulletin č. EASA SIB No: 2022-10 s odporúčaním identifikácie a následnej výmeny dotknutých ložiskových koncoviek.

## 1.19 Spôsoby odborného vyšetrovania

Boli použité bežné spôsoby vyšetrovania.

# 2. ANALÝZA

## 2.1 Všeobecne

2.1.1 Vyhodnotenie kamerových záznamov:
Po analýze zo záznamových zariadení umiestnených na trupe lietadla a v jeho kokpite BVK v spolupráci s výrobcom lietadla dospeli k názoru, že stratou ovládania výškového kormidla sa stalo lietadlo neovládateľným.

2.1.2 Zo záverov znaleckého posudku Kriminalistického a expertízneho ústavu č. PPZ-KEU-BA-EXP-2022/9340 vyplynulo nasledovné:
Poškodená kĺbová hlavica bola zhotovená z vysokopevnostnej ocele, pokovovanej zinkom, čo možno považovať za rizikový faktor z hľadiska možného rozvoja vodíkovej krehkosti materiálu. Samotná vodíková krehkosť materiálu bola v danom prípade preukázaná veľkou početnosťou vnútorných trhlín v materiáli rozvinutých pozdĺž hranice jeho zrn.

Hlavnou príčinou poškodenia skúmanej kĺbovej hlavice, teda bolo tzv. vodíkové skrehnutie jej materiálu.“

2.1.3 Zo záverov technickej správy Výskumného ústavu zváračského č.222/2201,ME277 vyplynulo nasledovné:
- Koncovky boli zhotovené z nízkolegovanej ocele s obsahom C cca 0,45% a Cr cca 0,8%,
- Materiál koncoviek bol tepelne spracovaný zušľachtením (kalenie, popúšťanie),
- Premierná tvrdosť materiálu koncoviek jednotlivých šarží je rozdielna,
- Priemerná tvrdosť materiálu koncoviek zodpovedá podľa STN EN ISO 18265 pevnosti v rozsahu 1520 až 1630 MPa,
- Materiál koncoviek spĺňa pevnosťou požiadavky STN EN ISO 898-1 pre pevnostnú triedu ocele 12.9,
- Koncovky boli elektrolyticky pozinkované s hrúbkou povlaku cca 20 µm,
- Rozdiely v tvrdosti materiálu koncoviek závisia od režimu tepelného spracovania, najmä od podmienok popúšťania- času a teploty výdrže pri popúšťaní.

Príčinou porušenia ložiskových koncoviek je interakcia ocele s vysokou tvrdosťou, difúzneho vodíka a predpätia vyvolaného deformáciou poisťovacou maticou mechanizmom vodíkového krehnutia.

2.1.4 Zo záverov interného vyšetrovania výrobného podniku Aerospool, spol. s r.o. č. AS ULL-90-001 vyplynulo nasledovné:

**Príčinou nehody lietadla bola zlomená ložisková koncovka na druhej tlačnej tyči „MN“ v riadiacom systéme výškového kormidla**. Riadiaci systém bol pred letovou skúškou konštrukčne odskúšaný a pokrýva očakávané medzné zaťaženie s konečným bezpečnostným faktorom f = 1,5. Dodatočné testy vykonané s koncami ložísk ukázali, že koniec ložiska, ak je v dobrom stave, je schopný odolať vyššiemu zaťaženiu, ako môže byť očakávané v prevádzke. Berúc do úvahy fakt, že deštrukcia koncových ložísk sa vyskytla v dvoch sériách při nezaťažených ložiskách predpokladáme, že ide o problém s vodíkovým skrehnutím alebo odchýlkami vo výrobnom procese ložiskových koncoviek a nie ako dôsledok ich inštalácie do systému riadenia výškového kormidla.

## 2.2 Lietadlo

Obhliadkou lietadla bolo zistené poškodenie- odlomenie kĺbovej hlavice tiahla zo sústavy riadenia výškového kormidla lietadla, konkrétne na prednej strane strednej spojovacej tyči riadenia výškového kormidla následkom čoho bola strata riaditeľnosti lietadla.

Pohonná jednotka pracovala až do jej vypnutia FTP pred aktiváciou záchranného padáka bez nedostatkov.

### 2.3 Podmienky letu

Skúšobný let sa vykonával za VMC. FTP vyhradený priestor pre vykonanie vývojového letového testu ako i jeho okolie poznal, vykonával let vo vyhradenom priestore skúšobných letov, ktorého poloha bola mimo husto osídlených oblastí miest a osád, ako aj mimo zhromaždiska ľudí na voľnom priestranstve.

### 2.4 Pilot

FTP bol spôsobilý podľa platných predpisov a mal prax ako pilot a inštruktor na lietadlách, vrátane vykonávania špeciálnych letov. FTP bol zoznámený s programom vývojového letového testu.

## 3. Z Á V E R Y / Príčina vzniku leteckej nehody

### 3.1 Zistenia

**Lietadlo**

- malo platné Letové povolenie vydané splnomocneným zástupcom Spolkovej republiky Nemecko,
- na lietadle bola vykonaná predletová prehliadka podľa AMM, prehliadku vykonal certifikovaný technik údržby, lietadlo bolo doplnené predpísaným druhom pohonných hmôt,
- pred vznikom leteckej udalosti nebol získaný žiadny dôkaz o poruche lietadla alebo o skutočnosti, ktorá by potenciálne ku poruche mohla viesť,
- až do momentu vzniku leteckej udalosti FTP nezistil žiadnu poruchu alebo odchýlku od predpísaných parametrov lietadla a ani jeho systémov,
- poškodenie lietadla zodpovedá polohe a intenzite v momente nárazu so zemským povrchom.

**Pilot**

- mal na požadovaný let platnú kvalifikáciu a z hľadiska zručnosti mal dlhoročné pilotné skúsenosti,
- mal platnú zdravotnú spôsobilosť na daný druh leteckej činnosti,
- mal platné obmedzené osvedčenie rádiotelefonistu leteckej pohyblivej služby I.
- pilot riešil vzniknutú núdzovú situáciu v súlade s prevádzkovou príručkou daného typu lietadla.

### 3.2 Príčiny leteckej nehody

Hlavnou príčinou vzniku leteckej udalosti bola strata ovládateľnosti pozdĺžneho sklonu lietadla z dôvodu straty funkčnosti ovládania výškového kormidla spôsobeného deštrukciou kĺbovej hlavice strednej spojovacej tyče riadenia výškového kormidla, ktoré bolo spôsobené vodíkovým krehnutím materiálu.

# 4. ODPORÚČANIA NA ZAISTENIE BEZPEČNOSTI

## 4.1.Prijaté nápravné opatrenia:

4.1.1 Výrobca/ prevádzkovateľ lietadla AEROSPOOL, spol. s r.o. prijal v priebehu vyšetrovania predmetnej leteckej nehody opatrenia na zaistenie bezpečnosti.

4.1.2 EASA vydala dňa 06.12.2022 bulletin č. EASA SIB No: 2022-10 na zistenie bezpečnosti.

## 4.2 Odporúčanie:

Na základe zistených skutočností z vyšetrovania príčin leteckej nehody BVK odporúča EASA, aby vykonala v rámci svojej právomoci vnútorný audit u výrobcu dotknutých ložiskových koncoviek za účelom identifikácie a následnej výmeny predmetných šarží ložiskových koncoviek výrobcom.

V Bratislave, 13.07.2023