

Hodnocení jakosti povrchu leteckého dílu

Bc. Adam Ondřej

Diplomová práce
2022

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Adam Ondřej**
Osobní číslo: **T20781**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Řízení jakosti**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Hodnocení jakosti povrchu leteckého dílu**

Zásady pro vypracování

1. Sestavení rešerše na zadané téma
2. Proměření vytipovaného dílu využitím v letounu Katana
3. Statistické hodnocení výsledků, včetně praktické aplikace

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Kompendium statistického zpracování dat*. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2196-8.

WHITEHOUSE, D. J. *Handbook of surface and nanometrology*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2011. ISBN 978-1-4200-8201-2.

AGGARWAL, Charu C. *Neural networks and deep learning: a textbook*. Cham: Springer, [2018].

Vedoucí diplomové práce: **prof. Dr. Ing. Vladimír Pata**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **3. ledna 2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2022**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 18. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je odhalit příčinu tvorby prasklin na leteckém dílu. Teoretická část začíná charakteristikami letounu, ze kterého pochází předmětný díl. Zařazení dílu je následováno popisem únavových lomů, jak obecně, tak i konkrétně na hliníkových slitinách, ze které je zkoumaný díl vyroben. Na závěr teoretické části diplomové jsou zmíněné postupy, které budou použity v části praktické.

Praktická část je díl uveden do kontextu, je zde odhadnuto pravděpodobné zatěžování dílu a zmíněno stanovisko výrobce letounu. Následuje postup přípravy jednotlivých vzorků, jejich makro i mikroskopické zkoumání a následné srovnání námi zjištěných faktů s mezinárodní literaturou pro ověření správnosti našich závěrů.

Klíčová slova: fraktografie, povrchová topografie, únavové lomy, cyklické zatěžování, podvozek letounu, oscilace

ABSTRACT

Aim of this master thesis is to investigate cause of cracks appearing on an airplane component. Theoretical part begins with characteristics of the airplane, where the subjected part is taken from. Following airplane introduction, a general overview of fatigue cracks in metals is mentioned, with special focus on fatigue properties of aluminum alloys, which is the material of the subjected part. At the very end of the theoretical part, scanning methods and principles used are shown on the theoretical basis.

In the practical part, the first appear identification of the subjected part and determination of possible destructive forces that can appear on nose landing gear, followed by showcase of sample preparation and its macro and microscopical evaluation. This part is ended by the comparison of our results with international literature to confirm the correctness of our conclusions.

Keywords: fractography, surface topography, fatigue cracks, cyclic loading, landing gear, shimmy

Rád bych poděkoval za příkladné vedení diplomové práce prof. Dr. Ing. Vladimírovi Patovi, za jeho ochotu při konzultacích a za jeho cenné rady v průběhu tvorby této práce. Dále bych rád poděkoval všem leteckým mechanikům, pilotům a konstruktérům z řad mých přátel a kolegů, kteří se mi vždy snažili maximálně pomoci v leteckých aspektech této práce.

V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině za jejich podporu v průběhu mého studia ve Zlíně.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÚVOD | 9 |
| I TEORETICKÁ ČÁST | 10 |
| 1 FUNKCE DÍLU A JEHO ZAŘAZENÍ DO SESTAVY LETADLA | 11 |
| 1.1 PODVOZEK LETADLA | 11 |
| 1.1.1 Uspořádání podvozku letadla | 11 |
| 1.1.2 Aerodynamika podvozku – aerodynamické kryty | 13 |
| 1.2 OSCILACE PODVOZKU | 14 |
| 1.3 LETOUN CIRRUS SR22 | 15 |
| 2 ÚNAVOVÉ LOMY A CYKlickÉ ZATÍŽENÍ KONSTRUKCE | 16 |
| 2.1 ÚNAVA MATERIÁLU | 16 |
| 2.2 HISTORIE ÚNAVY MATERIÁLŮ A JEJÍ VÝZNAM V NÁVRHU KONSTRUKCÍ | 17 |
| 2.3 INICIACE ÚNAVOVÉ TRHLINY..... | 19 |
| 2.3.1 Relativní význam iniciace trhliny a fází šíření trhliny | 19 |
| 2.3.2 Vliv amplitudy napětí..... | 21 |
| 2.4 ROZDĚLENÍ OBLASTÍ PODLE VELIKOSTI NAMÁHÁNÍ..... | 21 |
| 2.4.1 Oblast s velmi nízkým napětím..... | 21 |
| 2.4.2 Odolné oblasti | 21 |
| 2.4.3 Oblasti vysokého napětí | 22 |
| 2.4.4 Oblasti šíření trhliny I. stupně..... | 22 |
| 2.4.5 Oblasti šíření trhliny II. stupně..... | 23 |
| 2.4.6 Návrh pro teoreticky nekonečný počet cyklů..... | 23 |
| 2.4.7 Návrh pro bezpečný počet cyklů..... | 23 |
| 2.4.8 Wöhlerův diagram..... | 24 |
| 2.4.9 Cyklické zatěžování dílu | 25 |
| 3 ÚNAVA HLINÍKOVÝCH SLITIN A DETEKCE ÚNAVOVÝCH LOMŮ V LETECTVÍ | 26 |
| 3.1.1 Vizuální kontrola..... | 28 |
| 3.1.2 Kontroly s využitím penetrantu..... | 28 |
| 3.1.3 Kontroly využívající magnetických vlastností..... | 28 |
| 3.1.4 Rentgenování dílu | 28 |
| 3.1.5 Ultrazvukové kontroly | 28 |
| 3.1.6 Kontrola s využitím vířivých proudů | 29 |
| 3.1.7 Kontroly akustických emisí..... | 29 |
| 3.2 LOMOVÉ CHARAKTERISTIKY HLINÍKOVÝCH SLITIN..... | 30 |
| 3.2.1 Typické šíření únavového lomu v hliníkových slitinách. | 31 |
| 4 TEORIE POVRCHU | 32 |
| 4.1 STRUKTURA POVRCHU | 32 |
| 4.1.1 Tvar povrchu | 34 |
| 4.1.2 Vlnitost povrchu..... | 34 |

| | | |
|-----------|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1.3 | Drsnost povrchu | 34 |
| 4.2 | METODY MĚŘENÍ POVRCHU | 35 |
| 4.2.1 | Kontaktní metody měření povrchu..... | 35 |
| 4.2.2 | Bezdotykové měření povrchu | 36 |
| 4.2.3 | Interferometry | 37 |
| 4.3 | FRAKTOGRAFIE | 38 |
| II | PRAKTICKÁ ČÁST..... | 40 |
| 5 | CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE | 41 |
| 6 | ZAŘAZENÍ VZORKŮ DO KONTEXTU | 42 |
| 6.1 | ÚVODNÍ ZJIŠTĚNÍ A IDENTIFIKACE DÍLU..... | 42 |
| 6.2 | IDENTIFIKACE ZATĚŽUJÍCÍCH JEVŮ | 44 |
| 6.3 | STANOVISKO VÝROBCE LETOUNU..... | 46 |
| 7 | PŘÍPRAVA VZORKŮ..... | 47 |
| 7.1 | OZNAČENÍ VZORKŮ | 48 |
| 8 | MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ..... | 49 |
| 8.1 | ZKOUMÁNÍ POVRCHU TRHLINY S VYUŽITÍM MIKROSKOPU..... | 49 |
| 8.2 | MĚŘENÍ VIBRACÍ SESTAVY PODVOZKU ZA PROVOZU | 51 |
| 8.3.1 | 3D Profilometr Zygo | 52 |
| 8.4 | MĚŘENÍ POVRCHU | 54 |
| 8.4.1 | Vzorky dílu A..... | 56 |
| 8.4.2 | Vzorku dílu D..... | 61 |
| 8.4.3 | Vzorky dílu E | 65 |
| 8.5 | VYHODNOCENÍ SMĚRU NAMÁHÁNÍ S VYUŽITÍM 3D POVRCHOVÉ TOPOGRAFIE | 69 |
| 8.5.1 | Porovnání s referenčním vzorkem | 69 |
| | ZÁVĚR | 73 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY..... | 74 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 77 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 78 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 81 |

ÚVOD

Únavové lomy kovových materiálů jsou již od dob průmyslové revoluce odpovědné za naprostou většinu selhání všech konstrukcí. Toto se nevyhýbá ani leteckým konstrukcím, kde vzhledem k neustálému vývoji, stavbě stále větších a rychlejších, které budou schopné létat dále a výše, a to vše při snaze ušetřit každé gram hmotnosti stroje jsou na letecké konstrukční materiály kladené extrémní nároky. Únavové lomy od počátku využívání kovových materiálů v letectví ve 40. letech minulého století stály za celou řadou leteckých neštěstí.

V dnešní době, vlivem rozvoje výpočetní techniky i moderních bezkontaktních metod měření jsme schopni s vysokou přesností měřit praskliny, které se na dané konstrukci vyskytnou a následně potlačit možnost jejich tvorby úpravou konstrukce. Fraktografie ve spojení s 3D bezkontaktními profilometry jsou tak velmi účinné nástroje při zkoumání původu a typu prasklin na kovových konstrukcích.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 FUNKCE DÍLU A JEHO ZAŘAZENÍ DO SESTAVY LETADLA

V této kapitole bude popsán význam dílu na konkrétním typu letadla, kdy budou popsány základní parametry a určení letounu následované popisem podsestavy podvozku, kde se daný díl nachází.

1.1 Podvozek letadla

Přistávací podvozek se řadí mezi nejnamáhanější prvky letecké konstrukce. Podvozek letounu musí snášet několik typů namáhání, od změn teplot a působení aerodynamických sil, až po mechanické zatížení, způsobené jízdou letadla po zemi a tím nejkritičtější momentem, samotným přistáním. Při přistání musí podvozek zastavit sestup letadla a udržet jeho hmotnost, při ostřejším přistání i nižší násobky hmotnosti celého letounu, kdy zároveň s dosedáním letadla jsou roztočeny pneumatiky podvozku kontaktem s přistávací plochou, což může způsobovat vibrace. Právě kombinace vibrací s mechanickým namáháním vzniklým dosednutím letadla (hlavně namáhání na tlak a ohyb) spolu s namáháním vlivem proudění vzduchu a podmínkami okolního prostředí dělá z přistávacího podvozku letadla jednu z nejvíce. [1]

1.1.1 Uspořádání podvozku letadla

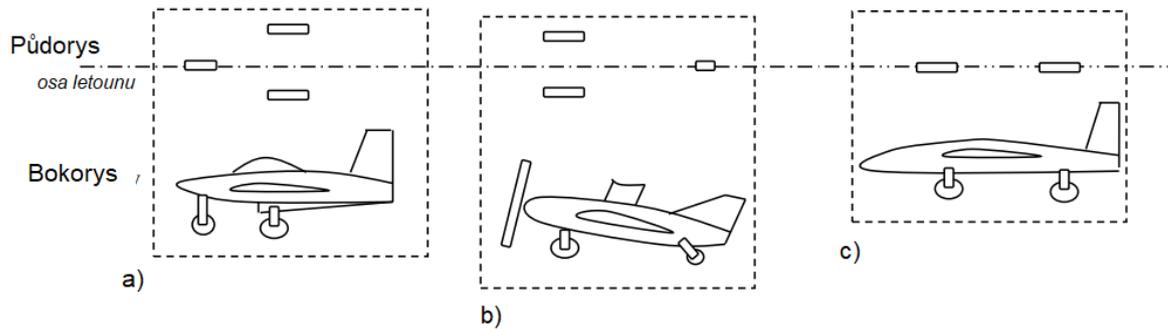
Podvozek letadla je z hlediska designu a konstrukce celého letadla vytvořen až jako poslední část, kdy všechny ostatní parametry celého stroje, jeho hmotnost, rychlost, výkony jsou známy a podle nichž je podvozek posléze dimenzován. Podle určení letounu a zamýšlených vlastností je nejprve zvolena ideální konfigurace podvozku, kdy dojde k výběru ze základních druhů uspořádání podvozku. Při volbě uspořádání podvozku jsou provedeny dvě volby. První z nich spočívá v posouzení rychlostí, kterých by letadlo za letu mělo dosahovat a odtud volba aerodynamicky ideálního uspořádání: [2]

- Podvozek pevný – využíváno u pomalejších letadel, kde aerodynamika podvozku výrazně neomezuje dosažení cestovních rychlostí, je využíván pro svou jednoduchost jak konstrukční, tak z pohledu údržby, čímž je docíleno nižších provozních nákladů. Tyto podvozky jsou dodatečně v prostoru kol opatřeny aerodynamickými kryty, které alespoň částečně snižují odpor podvozku za letu.
- Podvozek zatahovací – zatahovací podvozky jsou známé z dopravních letadel a obecně všech typů letadel, které se pohybují ve větších rychlostech, obecně nad 400 km/h. Mechanizace zatahovacího podvozku je komplexní systém vyžadující údržbu

a pravidelné kontroly, ovšem díky zataženému podvozku během letu je dosaženo mnohem nižšího aerodynamického odporu a tím je možné dosáhnout nejen vyšších rychlostí, ale i nižší spotřeby paliva a pohodlnějšího ovládání letounu.

Podvozky letadel jsou také rozdělovány podle jejich rozložení na letadle. Zde jsou dva typy podvozku, podvozek hlavní, který se nachází poblíž těžiště letounu, zpravidla okolo kořene křídla, tak aby vzhledem k poloze těžiště bylo letadlo při pohybu po zemi na podvozku stabilní a také aby hlavní podvozek přenášel a rozkládal energii na konstrukčně nejtužší část letadla-kořeny křídel. Druhým typem podvozku je podvozek pomocný, který je využíván jako přídatná podpora letounu a také jako řídicí prvek k ovládání směru jízdy letadla. Jednotlivé druhy uspořádání jsou: [1,2]

- Se zadním(ostruhovým) kolem – tento typ podvozku se používal v počátcích letectví, kdy je letadlo opatřeno dvěma hlavními podvozkovými nohami, po jedné pod hlavními křídly a jedním zpravidla malým kolem umístěným pod ocasem letounu, kdy letadlo opticky posazené na ocase. Zád'ové kola nebývají řízená, letadla s touto konfigurací jsou při jízdě po zemi ovládané pomocí přibržd'ování brzdami na hlavním podvozku na jedné straně, čímž dojde k zatáče, zadní kolo je zde pouze jako pojezd.
- S před'ovým kolem – V dnešní době nejčastější uspořádání podvozku, kdy je letoun opatřen třemi podvozkovými nohami, dvě hlavní podvozkové nohy pod křídly (u největších dopravních a transportních letadel může být hlavních podvozkových nohou více) a před'ovým podvozek pod před'ím letadla, která má funkci jednak pojezdovou a ve většině případů také řídicí, kdy tímto podvozkem je možné otáčet ve svislé ose, čímž je potom směřováno celé letadlo. Hlavní výhodou této konfigurace je mimo možnost přímého vstupu do řízení letounu také výraznější stabilita a bezpečnost při brždění letounu po přistání a fakt, že letounu se při pohybu po zemi nachází v horizontální pozici, což zlepšuje výhled pilota ze stroje, zvýšený komfort cestujících a snadnější manipulace s nákladem letounu.
- Tandemový podvozek – jedná se o neobvyklé uspořádání podvozku letadla, kdy dvě hlavní podvozkové nohy jsou za sebou v podélné ose letadla a křídla jsou podepírána menšíma podvozkovými nohami. V této konfiguraci nemusí být žádné z kol řízené



Obrázek 1. Ilustrace možností uspořádání letadlového podvozku. a) Podvozek s předovým kolem, b) podvozek s ostruhovým kolem, c) tandemový podvozek. [2]

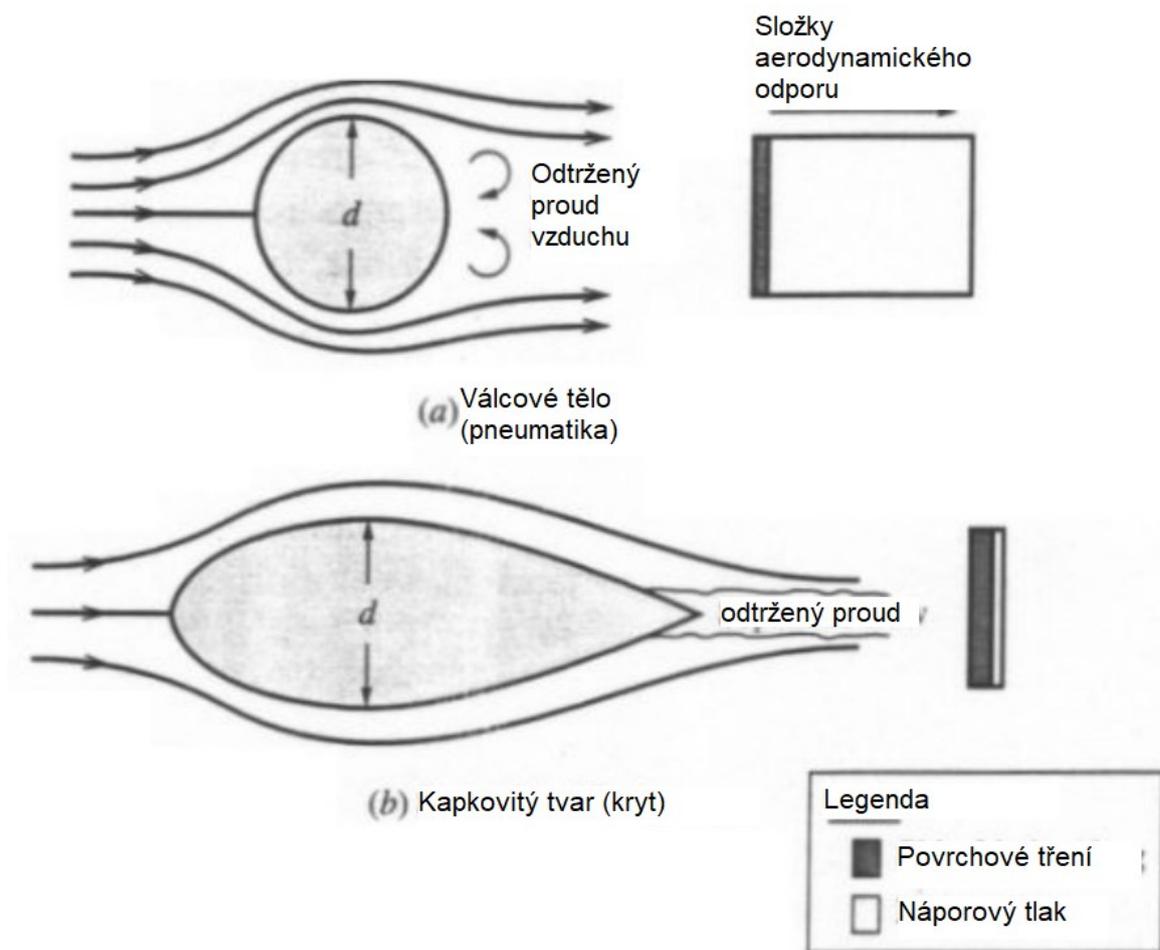
1.1.2 Aerodynamika podvozku – aerodynamické kryty

Malé letouny, jako například Cirrus SR22 mají kola podvozku pro lepší aerodynamické vlastnosti zakryté aerodynamickými kryty, které zlepšují obtékání vzduchu okolo podvozkového kola letounu. V případě použití takového krytu zůstane vystavená pouze malá část spodku kola pro kontakt s letištním povrchem, zatímco zbytek kola je zcela zakryt. [2]



Obrázek 2. Aerodynamický kryt kola na letounu Cessna 150 [2]

Za účelem kontroly pneumatiky nebo výměny některé ze zakrytých součástí podvozku musí být tento aerodynamický kryt kola jednoduše demontovatelný. Předmětem této diplomové práce je pak díl – držák právě takového aerodynamického krytu. Rozdíl v aerodynamických vlastnostech podvozku bez krytu a s aerodynamickým krytem můžeme vidět na obrázku 3, kde je na příkladech tvaru těles jasně vidět snížení aerodynamického odporu a lineární obtékání vzduchu v případě tvaru aerodynamického krytu. [2]



Obrázek 3. Aerodynamické srovnání profilu pneumatiky a krytu kola přistávacího podvozku [2]

1.2 Oscilace podvozku

Samovolně vyvolané rotačně-podélné oscilace podvozku, které se můžou objevovat u některých podvozků, zejména u předových rotačních podvozkových noh, ale i u ostatních podvozkových konstrukcí, jsou předmětem zátěžových testování a certifikačních zkoušek, než je letoun certifikován leteckým úřadem. Neustálý vývoj leteckých konstrukcí, používání flexibilních kompozitních konstrukcí, zvyšující se vzletová hmotnost letounů a používání radiálních pneumatik dává prostor může v jisté kombinaci vybudit oscilování podvozku, kdy toto chvění může v extrémních případech dosáhnout samovolně maximálních výchylek podvozku letounu. Tomuto je předcházeno tlumícím systémem, u dopravních letounů aktivními tlumiči, u menších letounů pasivními prvky jako polymerní tělesa v bodech uložení podvozku do konstrukce letadla a speciálně tvarovaných „anti-shimmy“ pneumatik. [2]

1.3 Letoun Cirrus SR22

Cirrus SR22 je jednomotorový čtyřmístný (může být i pětimístný) letoun vyráběný od roku 2001. Jedná se o dolnoplošník s výrazným podílem kompozitních materiálů. Vznikl vývojem z předchozího modelu, Cirrus SR20, kdy došlo k použití větších křídel, byla zvýšena kapacita paliva a instalován výkonnější motor. Neustálým vývojem stroje bylo dosaženo implementování tzv. „Glass Cockpitu“, kdy jsou tradiční mechanické palubní přístroje nahrazeny digitální systémem. Od roku 2010 je k dispozici také SR22T, což je verze s upraveným motorem opatřena turbodmychadlem. Obecné parametry se můžou nepatrně lišit vzhledem podle konkrétní verze letounu. V následující tabulce je uveden přehled základních parametrů letadla.: [3,4]

Tabulka 1. Přehled základních parametrů letounu Cirrus SR22. [3]

| | |
|-----------------------------------|----------------------|
| Délka: [m] | 7,92 |
| Šířka: [m] | 11,67 |
| Typ pohonné jednotky: | Continental IO-550-N |
| Cestovní rychlost: [km/h] | 339 |
| Dostup: [m] | 5300 |
| Maximální vzletová hmotnost: [Kg] | 1663 |
| Hmotnost prázdného letounu: [Kg] | 1029 |
| Dolet: [km] | 1943 |

Jedná se o jedno z nejvíce prodávaných letadel vůbec, kdy v celkových číslech jde o nejprodávanější letadlo určené pro všeobecné letectví vyrobené s vysokým podílem moderních kompozitních materiálů a také o nejvíce vyráběný typ letounu [3]

Příďový podvozek je tvořen ocelovou trubkovou vzpěrou, připevněnou k uložení motoru. Příďové kolo je volně naklápěcí a může dosáhnout maximální výchylky až 108° na každou stranu od podélné osy letounu. Absorpce rázových sil v příďovém podvozku je zajištěna polymerními puky (od sériového čísla 1886 jsou puky nahrazeny olejovým tlumičem rázů) Příďový podvozek je neřízený, ovládání směru jízdy po zemi je řízeno rozdílem brzdného účinku na kolech hlavního podvozku. [2,3]

2 ÚNAVOVÉ LOMY A CYKlickÉ ZATÍŽENÍ KONSTRUKCE

V této kapitole je nejprve popsán fyzikální původ vady materiálu pro identifikaci místa, které bude náchylnější k tvorbě defektů působením namáhání, dále pak popis cyklického zatížení, které je příčinou vzniku únavových lomů, dále pak přehled únavových lomů, jak můžeme opticky rozeznat, že se jedná o únavový lom, přehled a rozdělení únavových lomů podle povrchu materiálu uvnitř trhliny a identifikaci směru zatížení odpovědného za vznik konkrétní trhliny.

2.1 Únava materiálu

Únava materiálu je proces kumulativního poškození, který je způsoben opakovaným proměnlivým zatížením. K iniciaci a šíření trhliny dochází v důsledku nahromaděného poškození vlivem cyklicky působícího proměnlivého zatížení v plastických oblastech dílu. Únava materiálu je jedna z nejčastějších příčin selhání dílu nebo konstrukce a je tedy předmětem mnoha studií snažících se popsat chování a předvídání výskytu únavového lomu. První významnější výzkumy o únavových charakteristikách a jejich působení na mechanické konstrukce vznikly s rozšířením oceli a kovu coby konstrukčních materiálů při průmyslové revoluci, s vývojem prvních parních strojů a železnice. [5,6]

Obecným vzorcem lze vypočítat přibližnou dobu pro vytvoření únavové trhliny. N_i (i – inicializace) je počet cyklů, které jsou potřeba k iniciaci únavové trhliny. Dále počet cyklů N_p (p – propagation), které jsou potřeba pro šíření trhliny až po její kritickou délku, kdy při překročení dojde k prasknutí a tudíž k selhání dílu. Celkový počet cyklů N_t (t – total), které jsou potřeba k selhání dílu, lze tedy vyjádřit jako: [5,6]

$$N_t = N_i + N_p$$

Hranice, kdy úvodní iniciační trhlina přejde do volně šířené únavové trhliny však není přesně definována. Toto by stanovení minimální velikosti vady, která tvoří jež trhlínu, což z praktického hlediska nelze. [5,6]

Celkem se tedy únava materiálu skládá ze tří fází: iniciace trhliny, šíření trhliny a konečné selhání. Obvykle se, při zkoumání únavových lomů na konkrétním dílu, předpokládá, že jedna z těchto fází převládá a díl je poté zkoumaný konkrétně pro danou fázi únavových lomů. Vždy je však lepší předpokládat nedokonalost samotného materiálu už při výrobě, vlivem krystalizační nedokonalosti či jiných vad, nečistot, zpracování, a určit, jak rychle by se případně takovéto vady materiálu mohly okamžitě šířit. Na základě takovýchto

předpokladů jsou potom řízeny výpočty a konstruování složitých konstrukcí, jako například lodě, mosty nebo právě letecká technika. [5,6]

Pokud chceme přesně předpovídat únavové charakteristiky mechanické součásti, musíme nejprve vyhodnotit počet cyklů, ke kterým dojde před iniciací trhliny v každé výrazně namáhané součásti dílu. Ve většině případů, samotná iniciace únavového lomu zabírá přibližně 90% časové osy celého průběhu únavového lomu. Z materiálových studií vyplývá, že iniciace trhliny je obvykle výsledkem výskytu plastických deformací, obvykle jejich zhuštění na malém objemu. [6,7,8]

Z konstrukčního hlediska tyto plastické deformace v materiálu vyplývají z obecných vlastností materiálu, jejich krystalických mřížek, kdy tyto nedokonalosti mohou být podpořeny nedokonalým zpracováním materiálu. Z praktického hlediska musíme dát do souvislosti počet nutných cyklů pro vytvoření makroskopické iniciační události s provozními podmínkami mechanické součásti (aplikovaná zatížení, návrh součásti) za účelem výpočtu celkového počtu cyklů do selhání. [6,8]

2.2 Historie únavy materiálů a její význam v návrhu konstrukcí

Únava materiálu a únavové lomy jsou jednou z nejčastějších příčin selhání konstrukcí nebo součástí strojů. Strukturální integrita byla vždy překážkou v průmyslovém rozvoji. Důsledky únavových lomů na kovových materiálech se významně začaly projevovat při rozvoji strojírenství v 19. století. Průmyslová revoluce, zejména rozvoj železniční dopravy, byla od počátku ovlivněna určitým počtem vážných nehod, jako například vlakové neštěstí ve Versailles v roce 1842, kde prasklá vlaková náprava zapříčinila smrt 60 lidí. Tato nehoda se počtem obětí vyrovná dvěma nehodám letounu DeHaviland Comet, které se staly při jeho uvádění do provozu v roce 1954. [8]

Mimo například právě vlaky, lodě a mostní konstrukce, letadla jsou od svého počátku až do dnešní doby velice náchylné na únavové lomy. Se zvyšujícími se nároky na konstrukci letadla, s příchodem proudových dopravních letadel a jejich rostoucím významu v přepravě lidí, únavové lomy jsou dodnes jedním z nejobávanějších poškození letounu. První vážné nehody, jako ty, kterých se účastnily letouny Comet však nebyly poslední. Můžeme zmínit například nehodu letu Aloha v roce 1988, kde vlivem prasklin vzniklých únavou materiálu v kombinaci s korozí došlo k odtržení části kabiny, vyobrazené na obrázku 4. [8,9]



Obrázek 4. Boeing 737 Společnosti Aloha Airlines po nouzovém přistání 28. dubna 1988.

Rozsah poškození způsobený únavou materiálu spojovacích nýtů je evidentní [8]

Další příklad se týká havárie McDonnell Douglas DC-10, která se stala v Pensacole, kde došlo k roztržení motoru vlivem únavové trhliny na jedné z lopatek rotoru uvnitř proudového motoru. [8]

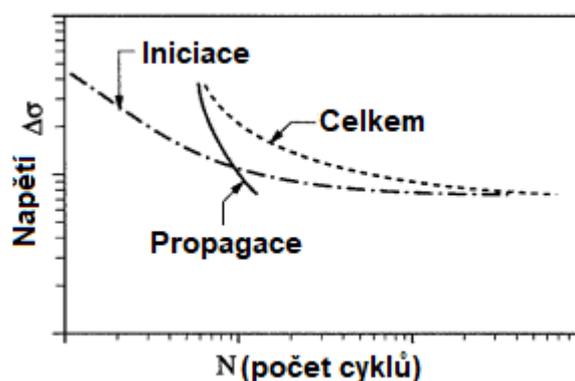
Únavové materiálu však dodnes trápí mnoho dalších oblastí strojírenství a dopravy. Například u hlavy válců vznětových motorů, kde může například vlivem termomechanického zatížení dojít k únavě materiálu a k prasknutí hlavy válce vlivem jeho nesprávné konstrukce. [8]

2.3 Iniclace únavové trhliny

Přesná definice iniciace únavové trhliny se může lišit podle toho, zda se zaměříme na mikrostrukturální vývoj materiálu nebo na vznik konkrétní trhliny. Pro vyhodnocení vývoje iniciace trhliny se obvykle spoléháme na mikropřaskání. Schopnost detekce mikropřasklin na zkoumané součásti vždy závisí na rozlišení pozorovacích metod a přístrojů. Navíc, neexistuje jednotná definice, do jaké fáze se ještě jedná o inicializační trhlínu, většinou je však vyjadřována jako počet cyklů N_i potřebných k vytvoření trhliny o délce 0,1mm, kdy tato délka přibližně odpovídá velikosti zrn většiny kovových materiálů. Z pozorování únavových lomů poté můžeme sledovat pravidlo, že pokud trhlína dosáhne této inicializační délky, začne se poté plynule šířit řezem profilu nebo součástí. [6,7,8,10]

2.3.1 Relativní význam iniciace trhliny a fází šíření trhliny

Klasické únavové testy, jako například Wöhlerova křivka, která udává napětí jako funkci počtu cyklů N_F vedoucích k únavě, obecné informace o odolnosti materiálu (stádia iniciace, šíření a konečného selhání). Tyto konkrétní testy umožňují kvalitativní posouzení vhodnosti materiálu pro konstrukci, ne vždy jsou však hodné z kvantitativního hlediska vzhledem ke struktuře. Na obrázku 5. můžeme vidět příklad Wöhlerovy křivky s oddělením iniciační fáze N_i a fáze šíření trhliny N_p . Dále také můžeme z grafu vyčíst vývoj napětí A_0 jako funkce poměru N_i/N_F , kdy N_i je počet cyklů vedoucích k iniciaci trhliny a N_T celkový počet cyklů vedoucích k únavě. [8,10]



Obrázek 5. Wöhlerova křivka ukazující počet cyklů potřebných pro iniciaci trhliny, šíření trhliny a celková únavová životnost jako funkce aplikované amplitudy napětí. [6]

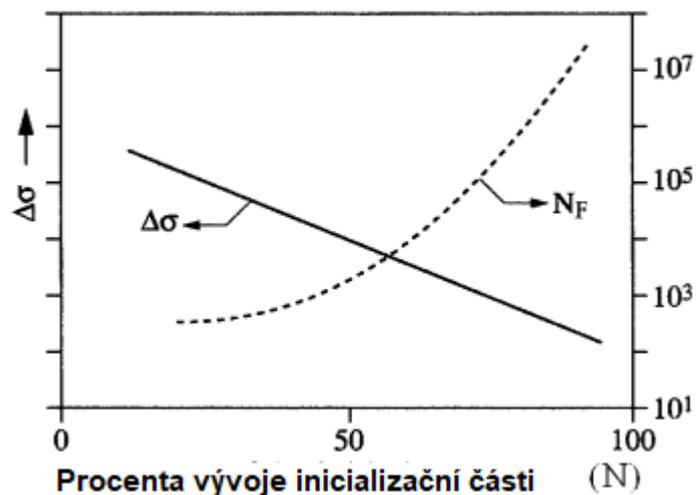
Relativní význam iniciační fáze a fáze šíření trhliny tak závisí na: [6,8,10]

- Amplitudě napětí
- Geometrii zkoumané součásti
- Metalurgická povaha materiálu
- Teplota a další vlastnosti okolního prostředí
- Předchozí namáhání materiálu a součásti.

Všechny uvedené faktory se mohou vyskytnout a vzájemně se ovlivňovat, odtud tedy náročnost předpokládání celkového možného zatížení součásti. [6,7,8]

Poměr N_i/N_F se snižuje se změnou amplitudy napětí (nebo deformace) tak, že v oblasti velmi nízkého počtu cyklů představuje hlavní část životnosti fáze šíření trhliny. Se stejnou přímou úměrou se zvyšuje počet iniciačních míst, pokud roste napětí. [8]

V případě umělého vytvoření místa se zvýšenou koncentrací napětí (obvykle například vrubování tělesa při zkoušení), se poměr N_i/N_F sníží. Obecně jsou mikrotrhliny nejrychleji iniciovány v tvárných materiálech. V materiálech, které vykazují iniciační fázi na skluzových pásech se poměr N_i/N_F se naopak zvyšuje s poklesem teploty okolí. Pokud je materiál podroben povrchové úpravě, jsou na povrchu součásti vytvořeny zbytková napětí, které vyvolává zvýšený výskyt inicializačních trhlín. [8]



Obrázek 6. Graf znázorňující procento životnosti dílu potřebné k vytvoření iniciační fáze trhliny jako funkci napětí ($\Delta\sigma$) a celkový počet cyklů potřebných k selhání (N_F). [8]

2.3.2 Vliv amplitudy napětí

Vývoj poškození vlivem únavy materiálu je obecně pozorován pomocí optických nebo rastrových elektronových mikroskopů na hladkých vzorcích bez jakýchkoliv významných vad. Obvykle totiž dochází k iniciaci trhliny na povrchu vzorku. Vzácně může k iniciaci trhliny dojít uvnitř objemu profilu, například uvnitř svarů (tzv. rybí oko) nebo litinách (dutiny vytvořené mikrosmršťováním). [8,10]

Existují tři hlavní důvody, proč se únavové trhliny vyvíjejí na povrchu vzorku: [8]

- Dislokace se mohou oproti vnitřnímu objemu volněji šířit
- Povrch častěji obsahuje defekty krystalických mřížek
- Povrch je vystaven vlivu okolního prostředí

2.4 Rozdělení oblastí podle velikosti namáhání

Z popisu vzniku, iniciace trhliny víme, že na součásti existují místa, která jsou náchylnější k tvoření iniciačních únavových trhlín více než ostatní oblasti součásti. Tyto oblasti lze obecně rozlišit podle lokálně působících napětí. [6,8]

2.4.1 Oblast s velmi nízkým napětím

Jde o oblasti, kde jsou zatížení nižší než mez únosnosti. Tyto zatížení se vyznačují dislokačními a kluzovými pohyby, které jsou dokonale vratné. V těchto oblastech nevznikají reakční síly, které by bránily či případně ovlivnily dislokace a struktura materiálu tak není nenávratně poškozena. [5,6,8]

2.4.2 Odolné oblasti

V takových oblastech dochází k působení cyklického namáhání, které svou amplitudou mohou dosahovat blízkosti meze kluzu kdy dochází ke tvorbě kluzových pásů (v rámci některých zrn materiálu) a tyto změny lze snadno pozorovat na leštěných površích. Vznik těchto kluzových pásů může být pozorován zejména u jednofázových kovů a slitin, jako například železo, měď, zinek, nikl, mosaz, vysokouhlíkové oceli, austenitické oceli, hliník a slitiny hliníku. [6,7,8]

U velkého počtu kovů dochází vlivem vzniku kluzných pásů ke tvorbě mikrotrhlin vlivem změn a deformací vzniklých lisováním a protlačováním. Prostředí totiž reaguje s takto poškozenými oblastmi na povrchu součásti a brání jejich pohybu, což má za výsledek poškození kovu. [6,7,8]

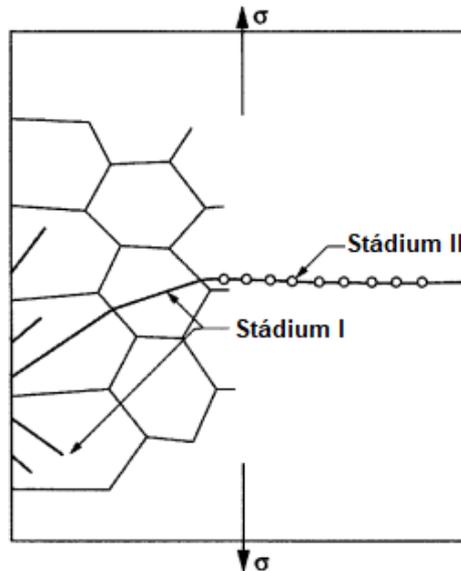
2.4.3 Oblasti vysokého napětí

Iniciace únavových trhlin při vysokém napětí zahrnuje řadu mechanismů, které jsou podobné mechanismům u přechozích oblastí, vlivem většího namáhání je však celý proces tvorby únavových trhlin urychlen a lze nalézt větší počet iniciačních míst. [6,8]

2.4.4 Oblasti šíření trhliny I. stupně

Iniciace mikrotrhliny je i v tomto případě způsobena stejnými mechanismy popsány v předchozích oblastech a je obvykle následována dalším šířením trhliny v předem daném krystalografickém směru, i když je iniciace intergranulární. Trhliny I. stupně jsou charakteristické svými lomovými vlastnostmi křehkého lomu. Tyto trhliny jsou křehké, bez větších rýh a orientací trhlin. Tvorba trhlin I. stupně byla pozorována u různých slitin hliníku, mědi, železa, niklu a titanu. Takovéto trhliny jsou citlivé na velikost zrna, zejména u slitin, které jsou odolné vůči kluzu. Obecně platí, že zmenšení velikosti zrna vede k prodloužení doby trvání šíření trhliny I. stupně u mosazi, austenitických nerezových ocelí, titanových slitin a nízkouhlíkových ocelí. [8,10]

Výskyt a růst trhlin prvního stupně se omezuje na povrchy součásti. Od jisté hloubky je pak následovaný trhlinou II. stupně, která se pak šíří kolmo na výsledný směr zatížení. Přejít mezi trhlínami I. a II. stádia je způsoben snížením smykového tření vlivem růstu trhliny a spolu s tím se zvyšujícím se normálním napětím. Tím je dáno omezení délky trhliny I. stupně ve srovnání s celkovou lomovou plochou, kdy ovšem tvorba lomu prvního stupně může být zodpovědná až za 99% únavové životnosti, doby potřebné ke vzniku únavového lomu, protože růst trhliny v každém cyklu je v takovém případě řádově několik nanometrů, je tedy prakticky celý vyjádřený Wöhlerovou křivkou. [8,15]



Obrázek 7. Vizualizace šíření lomu v I. a II. stádiu, zleva povrch vzorku a patrná velká zrna v oblasti povrchu. [8]

2.4.5 Oblasti šíření trhliny II. stupně

K lomu I. stupně však nemusí dojít vždy, únavová trhlina může být přímo iniciována podle mechanismu trhliny II. stupně. K tomuto dochází, pokud jsou přítomny významné štěpné inkluze vzniklé při hrubém obrábění, vedoucí k ostrým zářezům nebo například uvnitř objemu slitiny, kdy jsou takovéto trhliny iniciovány vlivem vnitřních sil během tuhnutí materiálu během zpracování. [4,8]

2.4.6 Návrh pro teoreticky nekonečný počet cyklů

Při návrhu můžeme využít takzvaný „návrh pro teoreticky nekonečný počet cyklů“, čímž je prakticky součást naddimenzována natolik, že po celý zamýšlený životní cyklus případné únavové trhliny nikdy nepřešly do volně šířeného křehkého lomu. Toto řešení má však několik nevýhod, nejvýraznější z nich je obvykle nadměrná hmotnost navrženého dílu, což je v letectví zcela zásadní negativum. Toto řešení však lze využít u nízko-namáhaných drobných dílů, které svou hmotností prakticky neovlivní celkovou hmotnost stroje a zároveň se odstraní nutnost tyto menší a let neohrožující díly kontrolovat a měnit. [6,11,]

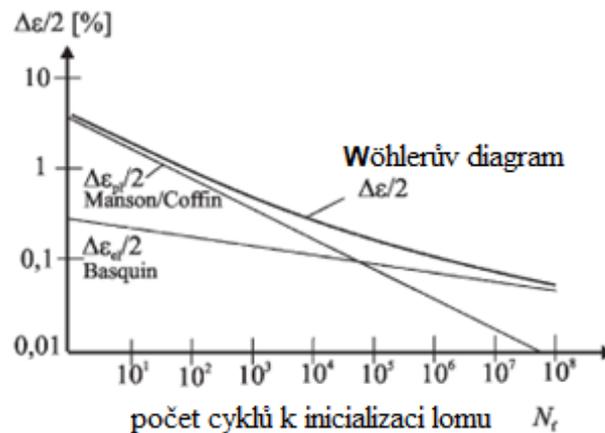
2.4.7 Návrh pro bezpečný počet cyklů

Návrh pro bezpečný počet cyklů však předpokládá existenci počátečních nedostatků zvoleného konstrukčního materiálu, které se budou šířit a růst během navržené životnosti

dílu. Počet cyklů zatěžování a odlehčování, které způsobí, že se trhlina začne šířit a dosáhne kritické délky, kdy dojde k nekontrolovanému lomu a selhání dílu, je jedním z nejdůležitějších kritérií tohoto přístupu. Dvěma důležitými otázkami v procesu navrhování takového dílu jsou tedy prahová hodnota délky trhliny a rychlost jejího šíření. Tyto dva pojmy jsou hlavním předmětem v obecném výzkumu únavových vlastností materiálu. [6,11]

2.4.8 Wöhlerův diagram

Při navrhování dílu metodou „bezpečného počtu cyklů“ je nutné znát počet zatěžovacích cyklů, které budou díl zatěžovat během jeho plánované životnosti. Právě pomocí Wöhlerových diagramů založených na napětí nebo deformaci lze předpovědět přibližný počet cyklů potřebných pro dosažení kritéria selhání, které může být buď, v závislosti důležitosti a bezpečnosti dílu, definované jako úplný lom nebo překročení kritické délky trhliny nebo maximální povolené deformace. Wöhlerův diagram založený na napětí (obr. 8.) se používá pro predikci únavové životnosti podle směru působení nominálního napětí. [6,11]

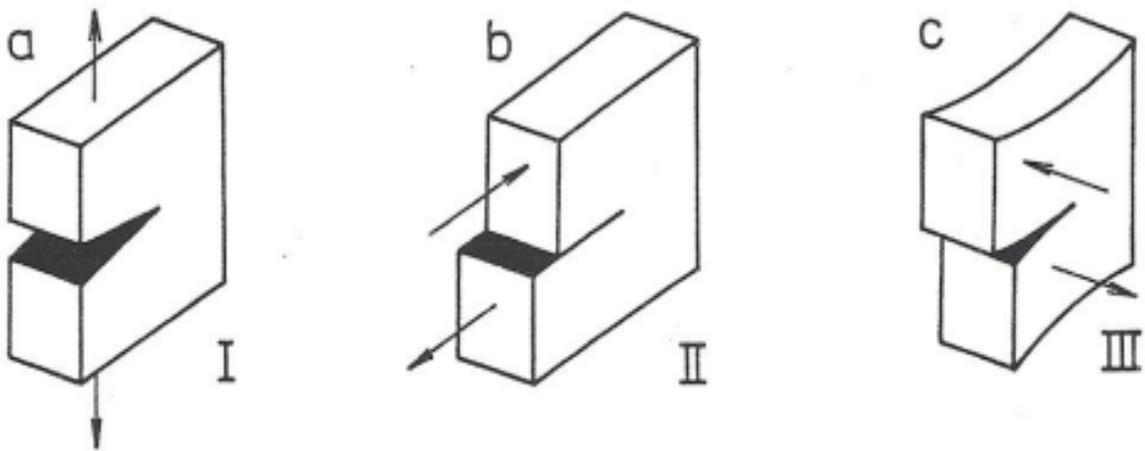


Obrázek 8. Znárodnění Wöhlerova diagramu podle nominálního napětí [8]

2.4.9 Cyklické zatěžování dílu

Pro vytvoření únavového lomu je vždy potřeba cyklické, opakující se zatížení působící vždy opačně, případně kombinace cyklických zatížení, kdy sílu můžou působit i ve více osách. Existují tři základní zatěžovací módy, ostatní možnosti lze vždy vyjádřit jako kombinaci těchto základních smyslů zatížení: [13,14,15]:

- a) Namáhání v tahu – růst trhliny je řízen tahovou složkou σ_y tenzoru napětí
- b) Namáhání ve smyku – růst trhliny je řízen smykovou složkou τ_{xy} tenzoru napětí
- c) Namáhání ve střihu - růst trhliny je řízen střihovou složkou τ_{yz} tenzoru napětí.



Obrázek 9. Zatěžovací módy tělesa s trhlinou, a - tahový, b - smykový, c – střihový [12]

Na obrázku 9 jsou zmíněné základní směry zatěžujících sil, které pokud jsou cyklicky opakované, mohou vést k únavovému lomu materiálu, ač vlastní velikost napětí při každém jednom cyklu zdaleka nedosahuje kritického napětí nutného pro deformaci dílu. [6,12,13]

3 ÚNAVA HLINÍKOVÝCH SLITIN A DETEKCE ÚNAVOVÝCH LOMŮ V LETECTVÍ

3.1 Pravidelné prohlídky

Důležitým ukazatelem a hodnotou při navrhování a následných inspekcích je maximální povolená délka trhliny (a_p), která určuje, jak velká trhlina se na konkrétním díle může vytvořit, než by došlo k ohrožení funkce a bezpečnosti dílu. Existuje několik možností, jak při návrhu letecké konstrukce tuto hodnotu získat. Vždy je základem těchto výpočtů životnost dílu (H), které určuje parametry a frekvenci pravidelných prohlídek, které jsou nejčastěji používaným nástrojem k odhalení vzniku poškození a únavy materiálu na strojních součástech a konstrukcích, letectví nevyjímaje. [14,17]

Trhliny musí být vždy objeveny ještě před dosažením maximální povolené délky trhliny (a_p) prostřednictvím správně rozvržených pravidelných kontrol. Při těchto kontrolách, které jsou postupem podobné těm v běžném průmyslu, ovšem prováděné mnohem častěji. Nehledě na metodu, při počáteční iniciaci trhliny, kdy je únava materiálu nevýznamná a nedetekovatelná. Tato délka (a_0) je obecně definována jako délka, během které trhlina nelze prakticky odhalit. K odhalení a případné opravě proto musí dojít v časovém intervalu mezi a_0 a a_p . Na obr. 10. vidíme náhled diagramu ukazující průběh šíření trhliny vzhledem k časovému horizontu. [14,16,17]



Obrázek 10. Diagram provedení periodických kontrol vzhledem k šíření únavové trhliny, a_i -iniciace trhliny, a_0 – délka po kterou nelze trhlina detekovat, a_p – maximální povolená délka trhliny [14]

Při jakékoliv kontrole provedené před nebo v čase t_1 (obr. 10) by vznikající trhlina nebyla odhalena, naopak v čase t_2 by trhlina již mohla dosahovat délky a_p , čímž by byla ohrožena bezpečnost dílu. Interval periodických kontrol (I) proto musí být kratší než než: [14]

$$H = t_2 - t_1$$

Obecně ve strojírenství se kontrola provádí minimálně dvakrát v intervalu pro inspekci (H), ovšem v letectví se kontroly provádí častěji vlivem přísných bezpečnostních limitů a požadavků na bezpečnost. Přirozeně, jakmile je trhlina objevena, daný díl musí být buď opraven nebo zcela nahrazen, ovšem k detekci trhlín často dochází mnohem dříve než jak stanovuje a_p a proto nemusí oprava proběhnout okamžitě, aby nedošlo k vyřazení stroje z provozu třeba v případě aktuální nedostupnosti náhradního dílu, nápravné opatření musí být však naplánováno tak, aby bylo zajištěno, že objevená trhlina nedosáhne bodu a_p . Tímto postupem bývá v případě méně namáhaných součástí a součástí které bezprostředně neohrožují provoz (v letectví bezpečné provedení letu) zajištěno výrazné snížení provozních nákladů. Bez ohledu na momentě iniciace trhliny, kontroly naplánované v režimu H/2 vždy poskytnou dvě příležitosti pro detekci trhliny, pokud je počátek inspekce, hodina nula, jako začátek zatížení dílu, jeho namontování na stroj a spuštění do provozu, i když je při první inspekci šance na objevení lomu malá. Podobně, pokud je zvolen například režim H/3, vždy proběhnou tři kontroly v intervalu mezi a_0 a a_p . [14,16]

Existuje několik technologií a metod kontroly konstrukcí na vznik lomů a prasklin. Tyto metody jsou rozděleny na přímé a nepřímé: [16,17,18]

- Přímé metody:
 - Vizuální kontroly
 - Kontroly s využitím penetrantu
 - Kontroly využívající magnetických vlastností
 - Rentgenování dílu
- Nepřímé metody:
 - Ultrazvukové kontroly
 - Kontrola s využitím vířivých proudů
 - Kontroly akustických emisí

3.1.1 Vizuální kontrola

Kontrolování dílu pouhým okem za pomoci lupy, slabších mikroskopů, lamp a zrcátek. Použití této metody je možné pouze na snadno dostupných místech a odhalení trhliny vyžaduje vysoce zkušený personál. [16]

3.1.2 Kontroly s využitím penetrantu

Barevný kapalný penetrant se nanese na materiál v oblasti možné trhliny, kde se poté povrch materiálu omyje a barevný penetrant zůstává usazen v hloubce případných vad a prasklin. Po identifikování a vyhodnocení velikosti trhliny je v případě vrácení dílu do provozu barevná kapalina očištěna. Jde o modifikaci vizuální kontroly a platí stejné omezení, kdy tuto metodu lze využít pouze na snáze dostupných místech při dosažení nepatrně vyšší schopnosti detekce než v případě čistě vizuální kontroly. [14,16,17]

3.1.3 Kontroly využívající magnetických vlastností

Součást, která má být kontrolována je pokryta vrstvou fluorescenční kapaliny obsahující železný prášek. Součást je poté umístěna do silného magnetického pole a je pozorována pod ultrafialovým světlem. Případné trhliny naruší magnetické linie, čímž je ovlivněna distribuce železného prášku po povrchu a tím i fluorescenční kapaliny, patrné při následném pozorování pod UV lampou. Tuto metodu lze využít pouze u dílů vyrobených z magnetických materiálů a jsou náročnější na vybavení zkušební laboratoře. Jde o vysoce citlivou metodu s vysokou pravděpodobností odhalení případných prasklin a defektů. [14,16,18]

3.1.4 Rentgenování dílu

Rentgenové záření emitované přenosným zařízením skrze zkoumaný díl je zachycováno na fólii umístěnou za dílem. Trhliny, které absorbují méně rentgenového záření, než okolní materiál jsou pak ohraničené černými čarami na fólii. Tato metoda se vyznačuje vysokou všestranností a citlivostí. Problém nastává v případě vzniku trhlin v zaoblených prostorách nebo na okraji výztuže. Drobné povrchové vady na velmi tenkých profilech jsou pomocí této metody velmi obtížně detekovatelné. [17]

3.1.5 Ultrazvukové kontroly

Sonda (piezoelektrický krystal) přenáší vysokofrekvenční vlny do materiálu, které se odráží na opačném konci dílu a také na případných defektech jak na povrchu, tak i uvnitř zkoumané

součásti. Vstupní impulz a odrazy jsou zobrazovány na osciloskopu. Doba mezi vysláním impulzu, jeho odrazem a následným vrácením impulzu pomáhá určit hloubku případné praskliny. V případě větších trhlin se vyslaná vlna může od trhliny odrazit do jiného směru. Jde o univerzální metodu díky širokému spektru detekčních sond a frekvenčnímu rozpětí vln. V případě objevení defektu uvnitř materiálu, jeho velikost a orientace jde jen velmi složitě touto metodou zjistit. [16,18]

3.1.6 Kontrola s využitím vířivých proudů

Cívka indukuje vířivý proud uvnitř kovové součástky, která v reakci indukuje proud na cívce, kdy v případě přítomnosti trhliny se indukce cívkou změní. Proud měřený na cívce je tedy ukazatel stavu případných defektů na dílu. V případě zkušeného personálu jde o velmi citlivou metodu, která není nákladná (nízké pořizovací ceny vybavení) a je schopna odhalit praskliny či jiné vady materiálu i na těžko dostupných místech, například uvnitř děr. Touto metodou se nedá zjistit případná velikost nebo orientace trhliny. [17]

3.1.7 Kontroly akustických emisí

Jde o měření velikosti vln tvořených uvnitř materiálu vlivem plastické deformace na špičce trhliny a v důsledku růstu trhliny. Kontrola touto metodou vyžaduje zatížení součásti v průběhu zkoušení pro vytvoření vnitřních vln. Výhodou této metody je možnost jejího neustálého použití při provozu součásti, jde však o poměrně drahou metodu, kdy správné provedení měření a interpretace výsledků vyžaduje vysoce kvalifikovaný personál. [17,18]

3.2 Lomové charakteristiky hliníkových slitin

Lomová odolnost hliníku je ve významné míře závislá na čistotě vstupních složek, stáří materiálu, přítomnost nekovových sloučenin, termomechanická úprava slitiny a vnitřní parametry, jako velikost a orientace zrn a povrchová textura součástí. [15,19]

Komerčně používané složky přidané do hliníkových slitin jsou vybírány ze skupin slitin 2xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx, které nabízejí střední až vysokou pevnost a odolnost vůči mechanickému namáhání. Z toho slitiny skupin 5xxx a 6xxx nabízejí střední až velmi vysoké pevnosti v kombinaci s vysokou odolností vůči korozi a vysokou houževnatost, díky které je lomová houževnatost mezi nejvýznamnějšími parametry při navrhování konstrukcí. Hliníkové slitiny zmíněných tříd také dobře snášejí nízké teploty. [14,15,19]

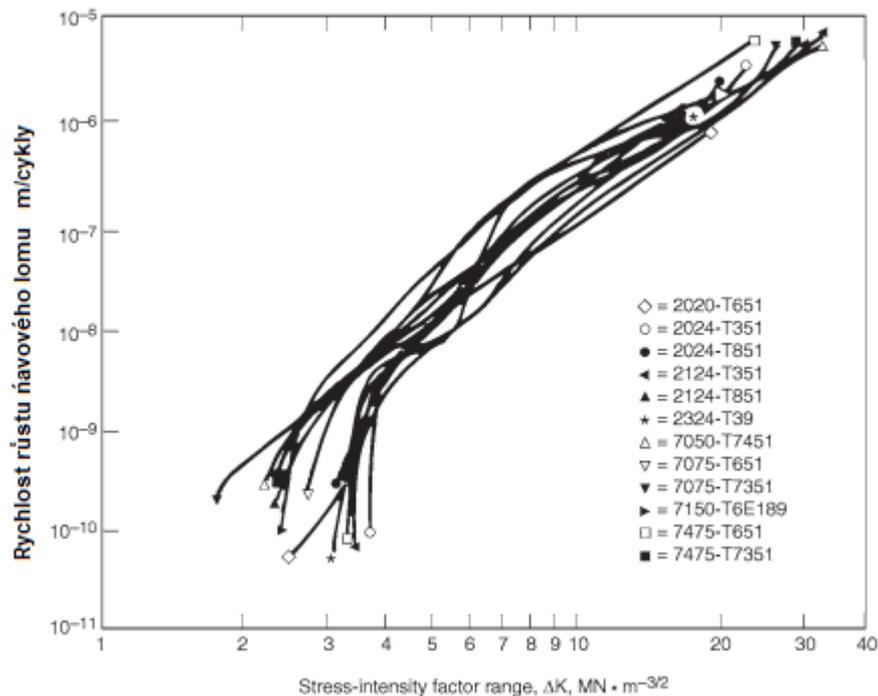
Slitiny skupiny 2xxx a 7xxx se obecně používají v aplikacích zahrnující vysoké namáhání konstrukcí, letectví nevyjímaje. Slitiny hliníku skupiny 7xxx jsou pak v letectví nejrozšířenějším konstrukčním materiálem. Obecně tato skupina nedosahuje takové odolnosti vůči praskání v důsledku namáhání a koroze, avšak těmto poruchám se dá předejít správnou konstrukcí a správnou volbou konkrétní slitiny. Slitiny, pro které je lomová houževnatost důležitým parametrem souvisejícím s konstrukcí (skupina 2xxx a 7xxx) se rozdělují do dvou skupin: [14,19, 20]

- Vysokopevnostní slitiny vyvinuté především pro jejich vysokou lomovou houževnatost a pevnost
- Konvenčně používané vysokopevnostní slitiny určené pro výrobky, u kterých lomová houževnatost není nejdůležitějším parametrem při jejich volbě (používané například pro snížení hmotnosti na méně namáhaných dílech)

Výzkumy hliníkových slitin skupiny 2xxx a 7xxx prokázaly, že tyto nejsou nepříznivě ovlivněny vysokými frekvencemi působícího cyklického zatěžování nebo mírnou změnou teploty. Slitiny 7xxx jsou mají nejvyšší a pro letectví nejvýhodnější kombinaci pevnosti a houževnatosti ze všech druhů hliníkových slitin. Dalším vytvrzováním (stárnutím) hliníku může dojít k mírnému snížení pevnosti (na přijatelnou mez), avšak vytvrzovaná slitina získá lepší vlastnosti co do houževnatosti, koroznímu praskání a lepší odolnosti vůči únavovému lámání. [14]

3.2.1 Typické šíření únavového lomu v hliníkových slitinách.

Při zkoumání křivek rychlosti růstu únavových trhlin u mnoha materiálů vykazujících významné rozdíly v mikrostruktuře je pozoruhodným rysem podobnost křivek rychlosti růstu trhlin. Na obrázku 11. můžeme vidět křivky rychlosti růstu trhliny pro hliníkové slitiny třídy 2xxx a 7xxx v laboratorních podmínkách. Pro praktické aplikace těchto rozdílných tříd hliníkových slitin jsou tyto rozdíly důležité pro dosažení co nejdelší životnosti tvořené konstrukce, z mechanického hlediska však nejde o veliké rozdíly. Obecně můžeme tvrdit, že rychlosti růstu únavových trhlin se u třídy 2xxx a 7xxx příliš neliší v případě mírného prostředí a jsou ovlivňovány pouze nepatrně různými faktory jako například metalurgické složení a zpracování, výrobní praxe nebo celková pevnost konkrétní slitiny. Ty metalurgické faktory, které přispívají ke zvýšené lomové houževnatosti, také obecně přispívají ke zvýšení odolnosti proti šíření únavových trhlin při relativně vysokých hodnotách zatěžující síly. [14,15,20]



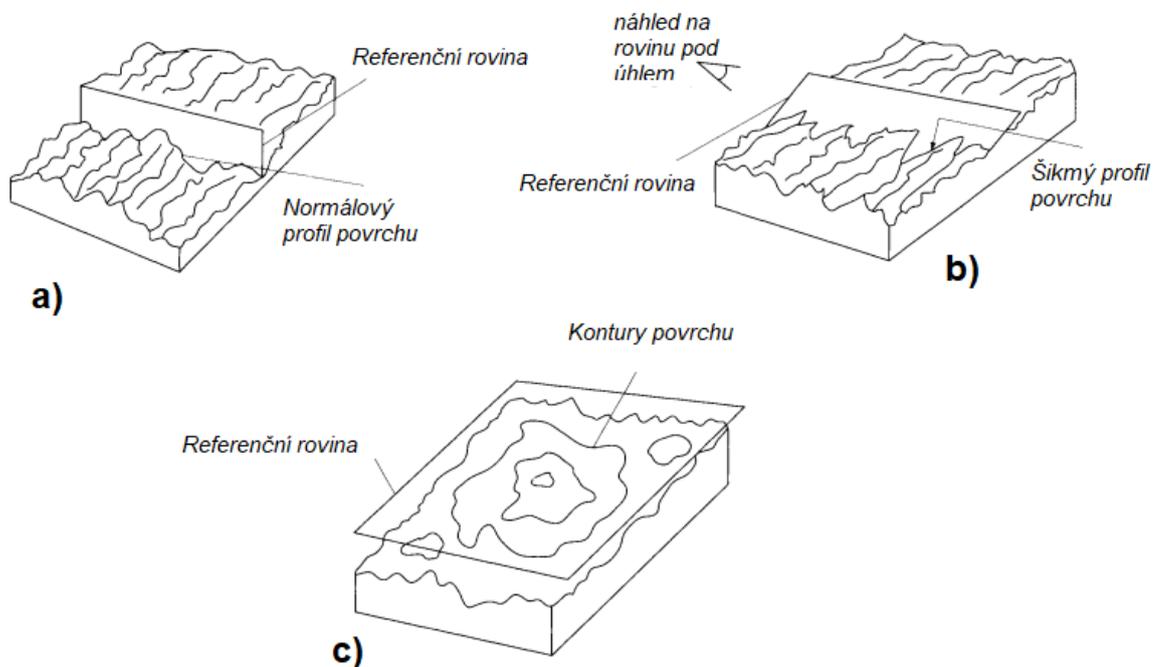
Obrázek 11. Znázornění minimálních vlivů rozdílů v mikrostruktuře a tepelného zpracování jednotlivých slitin třídy 2xxx a 7xxx na rychlost šíření únavového lomu. [14]

4 TEORIE POVRCHU

S neustále rostoucími požadavky na kvalitu a vlastnosti konstrukčních materiálů roste také potřeba jejich kontroly, měření, pro zajištění požadovaných vlastností. V oblasti měření drsnosti povrchu v současné době probíhá rozvoj bezkontaktních metod za využití počítačově zpracovaných 3D modelů pomocí různých snímacích metod, stejně jako rozvoj všech metod s asistencí výpočetní techniky. Dříve široce využívané kontaktní metody založené na principu snímajícího hrotu taženého po měřeném povrchu se v současné době dostává do stínu těchto bezkontaktních metod, kterou je například i bezkontaktní profilometrie, která bude využita v praktické části této diplomové práce. [21,22.]

4.1 Struktura povrchu

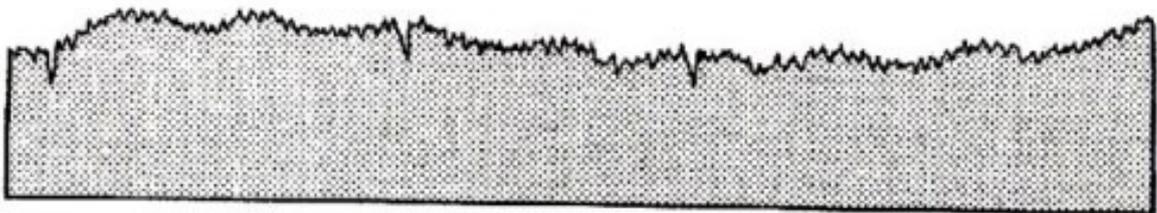
Teoreticky prvním krokem při získávání profilu povrchu tělesa je orientace přístroje, který má profil měřit. Geometricky lze toto definovat jako umístění roviny, ve které bude provedený průřez povrchem, který bude obsahovat požadovaný profil povrchu tělesa. Nejpoužívanější je umístění této roviny normálově k povrchu tělesa, ovšem lze využít i jiné metody s různými benefity zvoleného přístupu. [22]



Obrázek 12. Různé umístění referenční roviny pro získání profilu povrchu. a) Rovina normálová k povrchu, b) Rovina vložena pod úhlem, c) rovina rovnoběžná s povrchem.

Na obrázku 12. můžeme vidět tyto jednotlivé možnosti umístění roviny vzhledem k obecnému směru povrchu. Nejpoužívanější normálové proložení referenční roviny podává nezkreslený přehled o podobě povrchu. Takto vzniklý profil můžeme vidět na obrázku 13. V případě proložení referenční roviny pod úhlem skrze zkoumaný povrch bude výsledný profil „zvětšený“ na výšku, což by bylo výhodné využít například při měření velmi malých drsností a nerovností. Příklad c) na obrázku 12. ukazuje položení referenční roviny rovnoběžně se směrem povrchu tělesa, kdy výsledkem této metody je topografická mapa povrchu, kdy jednotlivé kontury povrchu spojují stejně vysoká místa. Tato povrchová topografie je velmi využívaným výstupem při použití bezkontaktních měřících zařízení a bude předmětem praktické části této diplomové práce. [22]

Výsledkem těchto různých metod proložení referenční roviny je profil povrchu. Tato 2D křivka, která je výslednicí ať už kontaktního či bezkontaktního měření slouží jako základní ukazatel tvaru povrchu. Na obrázku 13. můžeme vidět tuto křivku, která se skládá ze tří základních složek profilu, které můžeme po měření následně filtrovat a oddělovat, a to na základě jejich vlnové délky. [22]



Obrázek 13. Obecný profil povrchu. [23]

Základními složkami profilu povrchu jsou tedy: [22]

- Vlnitost
- Drsnost
- Tvar

Každá z uvedených složek profilu je zpravidla tvořena jinými procesy, kdy, pokud jsme schopni odhalit a odfiltrovat samostatně jednotlivé složky, jsme schopni také pochopit a popsat procesy a vlivy při tvoření povrchu samotného. V následujícím přehledu jsou popsány základní vlastnosti každé této složky. [22]

4.1.1 Tvar povrchu

Jde o obecný tvar povrchu po odfiltrování vlnitosti a drsnosti povrchu. Základní tvar povrchu je dán výrobní dokumentací dané součástky a případné odchylky mohou vznikat například nevhodně zvolenou technologií obrábění povrchu nebo nevhodnými parametry použité technologie. [22]



Obrázek 14. Tvar povrchu [22]

4.1.2 Vlnitost povrchu

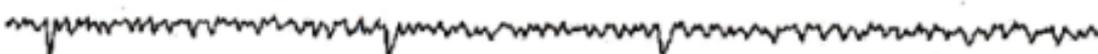
Vlnitost povrchu popisuje větší nerovnosti povrchu, tzv. makronerovnosti povrchu. Jde o větší nerovnosti než drsnost vlivem větší vlnové délky. Po odfiltrování drsnosti a obecného tvaru dílu vlnitost může ukázat případné nedostatky na technologii využitě ke zpracování dílu, například špatnou kalibraci nebo opotřebení stroje, vibraci nástroje nebo jiné poškození a opotřebení stroje. [22]



Obrázek 15 . Vlnitost povrchu. [22]

4.1.3 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu je složka struktury povrchu s nejmenší vlnovou délkou, analogicky k vlnitosti jde o tzv. mikronerovnost povrchu. Drsnost povrchu je nepravidelnost povrchu, která je zpravidla dána zvolenou metodou obrábění, metodou odběru třísky z povrchu. Různé technologie dosahují různých drsností povrchu, od řezání až po jemné dokončovací operace. [22]

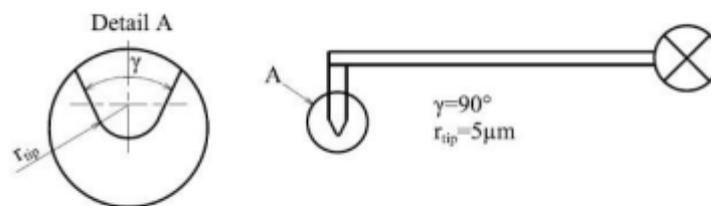


Obrázek 16. Drsnost povrchu. [22]

4.2 Metody měření povrchu

4.2.1 Kontaktní metody měření povrchu

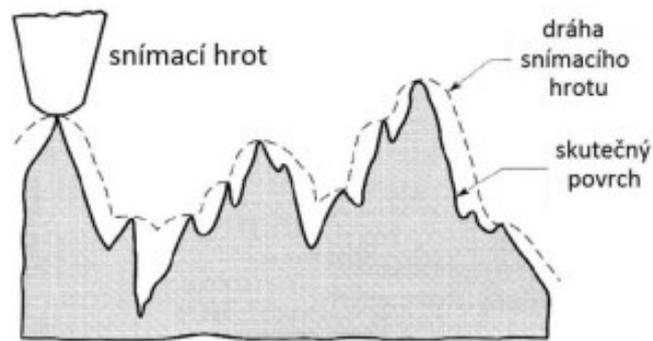
V praxi stále hojně využívaný a historicky nejpoužívanější jsou stále kontaktní metody měření povrchu. Princip funkce kontaktního měření spočívá ve snímácím hrotu, který snímá nerovnosti zkoumaného povrchu. Tento hrot je za konstantní rychlosti veden po povrchu a kontaktem s jakoukoliv nerovností dochází k pohybu hrotu, čímž je získán mechanický signál, který je dále v přístroji převeden na signál digitální, který může být následně zpracován na počítači. [23,24]



Obrázek 17. Geometrie snímácího hrotu. [23]

Z mechanického kontaktního snímání však vznikají neduhy a odchylky této metody. Jednak mechanické opotřebení jak samotného hrotu, tak i možnost poškození povrchu zkoumaného povrchu, pokud je tento vyroben z měkkého materiálu, což může mít za následek nemožnost dalšího využití zkoumaného vzorku. Tvarem hrotu, který je definovaný v normě ČSN EN ISO 25718-601 (obrázek 17.), je také zapříčiněna odchylka celého měření, se kterou je nutno počítat při vyhodnocování naměřených dat. Naměřená křivka dotykovým profilometrem je zkreslena vlivem zaoblení hrotu (obrázek 18.), kdy vliv této chyby je při vyhodnocení zmenšen pomocí daných korelací. [23]

V praktickém využití tak jde o relativně jednoduchou a levnou metodu měření, která je široce využívaná a dostupná. Tato metoda je na výzkumném poli však již překonána právě bezkontaktními metodami, které dosahují obecně mnohem vyšších přesností. [23,24]

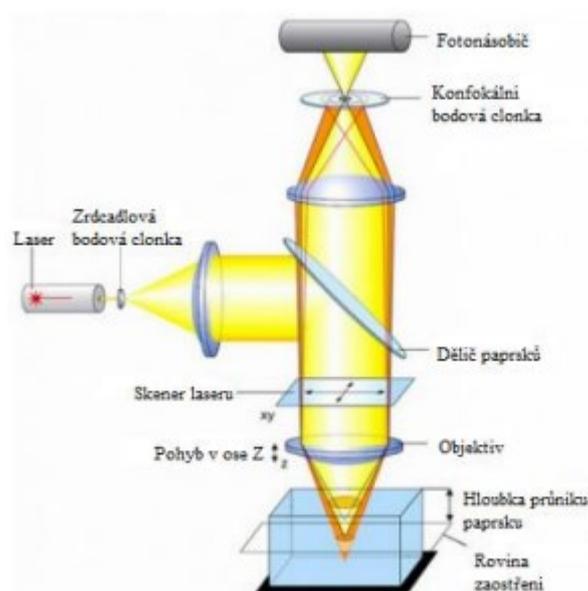


Obrázek 18. Odchylka kontaktního metody měření zapříčiněná zaoblením snímacího hrotu.

[24]

4.2.2 Bezdotykové měření povrchu

Hlavní výhodou využití bezkontaktních metod je zabránění poškození povrchu zkoumaného vzorku při dosahování řádově přesnějších výsledků měření. Namísto využití snímacího hrotu, jako v případě kontaktních metod měření, je v případě bezkontaktního měření využit soustředěný světelný paprsek, který je vyzařován měřicím přístrojem a následně odrážen od povrchu snímaného vzorku, kdy takto odražený světelný paprsek je zpětně zachytáván snímací optikou přístroje. Při snímání 3D snímků povrchu může být využita takzvaná LSCM metoda, která kombinuje konfokální optiku s laserovým paprskem která dosahuje vysokého rozlišení a kontrastu výsledných snímků. Schéma systému LSCM kombinující konfokální optiku a laserový zdroj můžeme vidět na obrázku 19. [25,26]



Obrázek 19. Schéma konfokální optiky. [25]

Celá tato metoda je tedy závislá na odrazových a absorpčních vlastnostech zkoumaného povrchu. Různé materiály, kovové, nekovové atd. mají jiné vlastnosti absorpce, stejně jako různé tvary profilu povrchu mají různé rozptylové vlastnosti, což může podstatně ovlivnit výsledky měření. Rovné povrchy kovových materiálů mají obecně velmi vysokou odrazivost, zatímco drsné povrchy část paprsku rozptylují do okolí a neodrazují zpět do optiky přístroje. Nevýhodou případného využití bezdotykových měřících přístrojů je řádově dražší přístroj oproti tradičním kontaktním přístrojům a také nutnost řízeného prostředí, kdy vlivem principu odrazu paprsku jsou bezkontaktní technologie citlivé na případné znečištění měřeného povrchu, stejně jako parametry okolního prostředí, jako teplota, tlak a vlhkost vzduchu.[25, 26]

4.2.3 Interferometry

Obecně, princip optického interferometrického měření je obdobný jako u ostatních bezkontaktních metod, založený na odrazu paprsku od měřeného povrchu zpět do měřidla. Interferometr porovnává vzdálenost mezi délkou paprsku referenčního světla a „měřícího“ světla se známou vlnovou délkou světla. [26]

Moderní interferometrické systémy lze klasifikovat různými způsoby. Všechny různé typy interferometrů, například Michelsonův Interferometr, Fizeauův Interferometr, Linnikův interferometr, kde každý je schopný měřit na jiném rozsahu, avšak mají jednu společnou vlastnost. Všechny pracují s vlnovou délkou světla, proto můžeme rozdělit tyto interferometry podle počtu přednastavených vlnových délek na: [26,27]

- Systémy používající jednu vlnovou délku
- Systémy používající dvě rozdílné vlnové délky
- Systémy využívající více vlnových délek

Profilometry využívající jednu vlnovou délku světelného zdroje jsou již další dobu používané k měření a scanování hladkých povrchů při dosahovaných přesnostech v řádech nanometrů. Omezením těchto jednovlnných interferometrů je schopnost měřit v rozpětí maximálně poloviny použité vlnové délky. Interferometry, používající dvě rozdílné vlnové délky se snaží toto interferometrické omezení vyřešit a v současné době je tato technologie aktivně rozvíjena. Při použití více než dvou vlnových délek dokáže interferometr pracovat na podstatně větším rozpětí bez omezení jednou vlnovou délkou. Interferometry více

délkové používající bílé světlo jsou v dnešní době nejpůvodnější a nejmodernější měřicí technikou na trhu [26,27]

4.3 Fraktografie

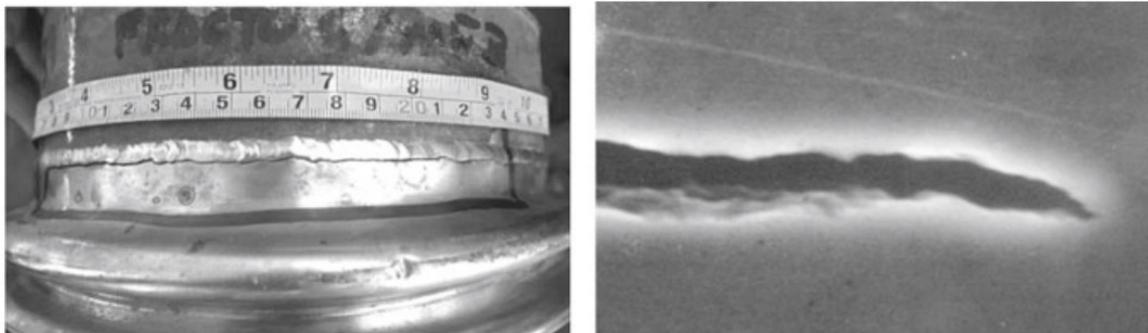
S rozvojem bezkontaktních metod měření a asistencí výpočetní techniky při analyzování a vykreslování dat prošla a dále prochází výraznými změnami i fraktografie – disciplína zabývající se identifikací a charakterizací vlastností povrchu lomu, včetně schopnosti kvantifikovat a vyhodnocovat zkoumané lomy. [28]

Účelem kvantifikační fraktografie je získání schopnosti vytvořit časovou osu popisující trhlinu, kdy se trhlina začala šířit, jak dlouho trvala propagace této trhliny, než byla odhalena nebo než došlo k selhání dílu a také kritickou délkou trhliny, která může nebo přímo vedla k selhání dílu. Tyto fraktografické výstupy jsou poté využity k posouzení životnosti dílu podobných vlastností, kde je předpokládáno podobné namáhání a tvorba podobných prasklin jako při fraktografických zkouškách, kdy na základě těchto měření jsou stanovovány intervaly kontrol těchto součástí. [28]

Fraktografické studování povrchu se provádí na dvou různých měřítkových úrovních, na kterých lze identifikovat vlastnosti zkoumaného lomu. Tyto úrovně jsou: [29]

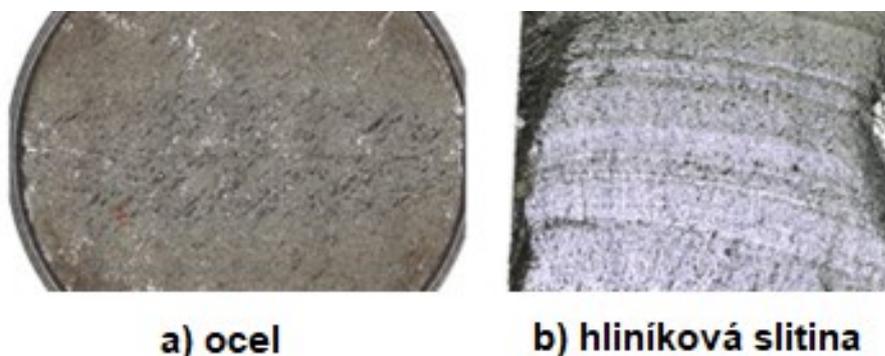
- Makroskopické: Vztahují se k fyzikálním vlastnostem povrchu trhliny a defektního dílu obecně, které lze pozorovat pouhým okem
- Mikroskopické: Popisují fyzikální a metalurgické vlastnosti povrchu lomu při využití zvětšení, na kterém lze popsat vztahy celého procesu vzniku trhliny k mikrostrukturálním vlastnostem povrchu lomu. Pro pozorování těchto vlastností je potřeba využít mikroskopu nebo jiné zvětšující techniky.

Tyto rozdílné přístupy fraktografického pozorování povrchu dílu jsou pro porovnání vidět na obrázku 20. Obecně platí, že makroskopické zkoumání doplňuje mikroskopické a naopak pro získání kompletního pohledu na zkoumaný lom.[28, 29]



Obrázek 20. Srovnání fraktografického pohledu na lom. Vlevo makroskopické pozorování lomu, vpravo mikroskopické zkoumání špičky trhliny. [29]

V případě fraktografie s využitím bezkontaktních způsobů měření, například interferometru k získání podoby 3D profilů můžeme na základě takových snímků poměrně jednoduše chování praskliny, jak byla ovlivněna případnými metalurgickými aspekty a nedokonalostmi, jak se jednotlivé materiály chovají při únavových lomech a z orientace trhliny a případně jejich mikroskopických vlastností také odhadnout směr zatěžující síly, což jsou ty nejdůležitější parametry popisující vzniklou trhlínu. Pokud dokážeme takto popsat trhlínu, dokážeme odhalit také příčinu jejího vzniku, kdy následně mohou být provedena protipatření pro minimalizaci tvorby podobných trhlin. Na obrázku 21. můžeme vidět rozdílný vzhled trhliny vzniklé na ocelových a hliníkových slitinách. [29,30]



Obrázek 21. Rozdíly v optické podobě únavových lomů. a) ocel 10HNAP, b) Hliníková slitina 2017-T4 [30]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je identifikace prasklin na leteckém díle. Díly, které byly připraveny přímo z ostrého provozu letounu je nejprve potřeba prozkoumat na případné vnější kazy a posoudit možné namáhání dílu tak, abychom mohli jednoznačně tvrdit, že poškození a následné selhání dílu vzniká vlivem cyklického namáhání, které vede k vzniku a šíření únavového lomu. Z již popraskaných dílů budou následně vyřezány vzorky tak, aby došlo ke kompletnímu rozkrytí trhliny, a tato trhlina bude posléze měřena bezkontaktní metodou pro získání 3D pohledu na čelo lomu. Obrazový výstup z 3D scanu bude následně porovnán s výstupy mezinárodních výzkumů únavových lomů hliníkových slitin, kde jsou za pomoci povrchové topografie popsány podoba a vzhled únavového lomu pro ověření našich závěrů. Z umístění a funkce dílu bylo již před samotným měřením předpokládáno zatěžování vlivem přistání a jevů s ním spojených, kdy vlivem vibrací může docházet k cyklickému namáhání konstrukce letounu.

6 ZAŘAZENÍ VZORKŮ DO KONTEXTU

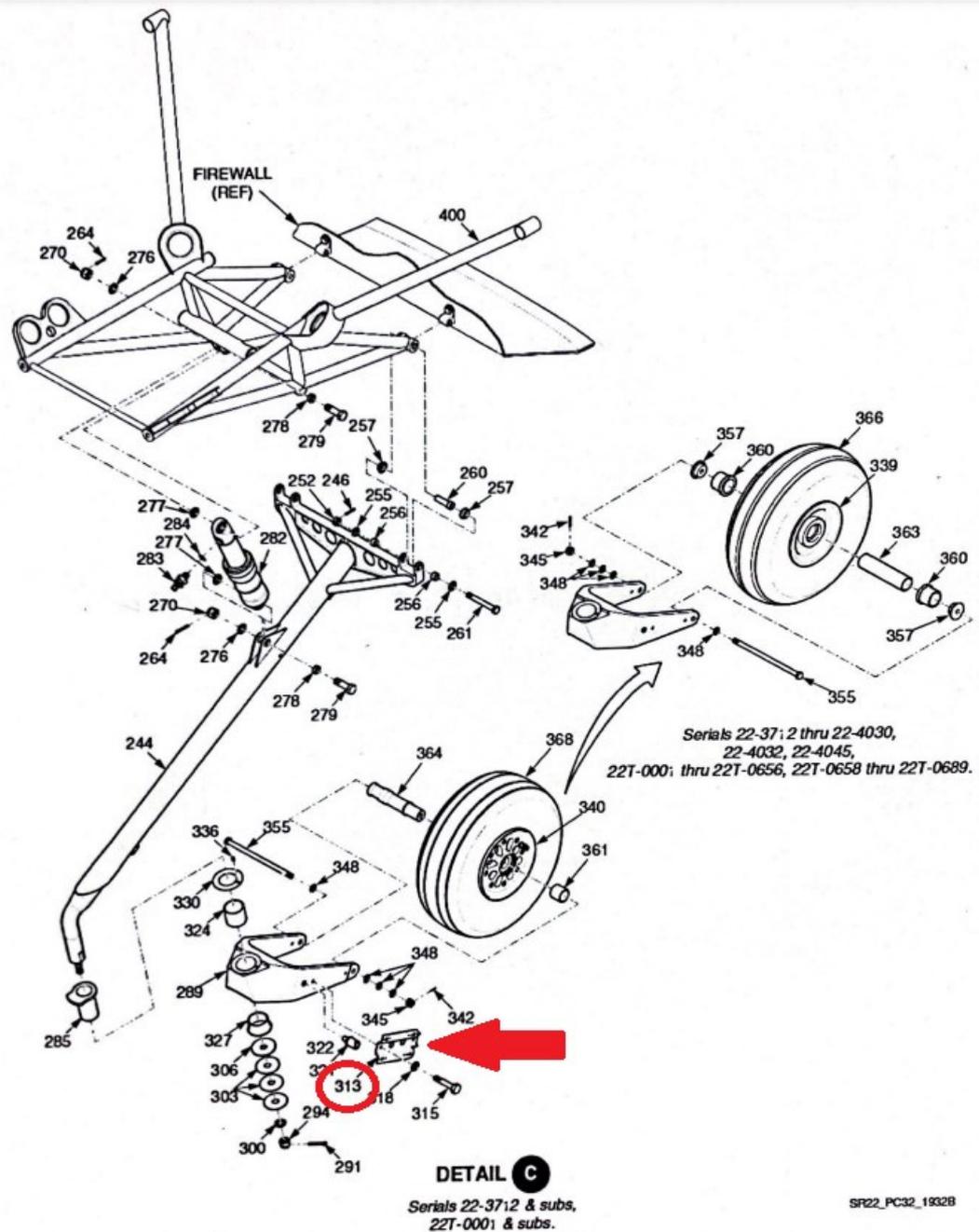
K dispozici bylo společností Aeromec dodáno 8 dílů, vyjmutých ze strojů Cirrus SR20/22, které tato firma provozuje v počtu tří strojů. Poskytovatel dílu při úvodní konzultaci uvedl, že tyto díly z neznámého důvodu „praskají“ a je nutná jejich mimořádná optická kontrola v řádu desítek hodin provozu, k výrazné deformaci dílu poté dochází před dosažením 100 letových hodin a je nutná jeho výměna, opravovat tento díl nelze, přičemž jediná možnost kontroly k dispozici na pracovišti je optická kontrola mechanikem na přítomnost trhlin. Tyto díly nejsou kritické pro bezpečné provedení letu, a proto nejsou podrobovány periodickým kontrolám za využití drahých zkušebních metod. Po přezkoumání montážního postupu leteckého mechanika při výměně dílu a vhodnosti dílu samotného, kdy bylo zkontrolováno výrobní číslo a legální původ dílu, bylo dokázáno, že v náhradě je na stroj montovaný správný díl podle správného postupu uvedeného výrobcem letounu.

6.1 Úvodní zjištění a identifikace dílu

Ve spolupráci s leteckým mechanikem proběhla při předání dílu optická kontrola aktuálně použitého dílu přímo na letounu pro předání náhledu aplikace dílu a činnosti spojené s jeho montáží a demontáží ze stroje, stejně jako předvedení originálního balení dílu. V servisní dokumentaci letounu bylo dohledáno číslo dílu a jeho zařazení do sestavy příďové podvozkové nohy letounu. Na obr. 22 je díl zvýrazněn v katalogu přiloženém k sestavě příďové podvozkové nohy letounu, která je na obrázku 23.

| CIRRUS | | ILLUSTRATED PARTS CATALOG | | MODELS SR22 AND SR22T | | |
|-------------------|----------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------|-----------------------|
| NO P I C | ITEM PART NUMBER | S Y M B O L | A T T A C H M E N T U R E | EFFECTIVE | | U N I T S |
| | | | | FROM | TO | |
| | | | 12345678 | 22 / 22T | 22 / 22T | |
| | 300 NAS1149F0832P | A | WASHER | 3712 / 0001 | / | 1 |
| | | | ALTERNATE FOR P/N NAS1149F0863P | | | |
| | 303 51853-001 | A | BELLEVILLE SPRING WASHER | 3712 / 0001 | / | 3 |
| | 306 AN970-8 | A | WASHER | 3712 / 0001 | / | 1 |
| | - 309 11633-006 | | ..FORK | 3712 / 0001 | 4012 / 0643 | 1 |
| | | | FOR SPARES USE P/N 11633-007 | | | |
| | - 310 11633-007 | | ..FORK | 4013 / 0644 | / | 1 |
| | - 312 11799-003 | | ..PANT BRACKET | 3712 / 0001 | 3952 / 0535 | 2 |
| | | | FOR SPARES USE P/N 11799-004 | | | |
| | 313 11799-004 | | ..PANT BRACKET | 3953 / 0536 | / | 2 |
| | 315 AN3H3A | A | ..BOLT | 3712 / 0001 | / | 4 |
| | 318 NAS1149F0332P | A | ..WASHER | 3712 / 0001 | / | 4 |

Obrázek 22. Výňatek z katalogu součástek příďové podvozkové nohy letounu Cirrus SR22, zvýrazněn zkoumaný díl č. 313 PANT BRACKET [31]



Obrázek 23. Sestava předového podvozku letounu Cirrus SR22 se zvýrazněným dílem č.313 PANT BRACKET. [31]

Identifikovaný díl PANT BRACKET slouží k uchycení aerodynamického krytu kola předového podvozku ke snížení aerodynamického odporu letounu. Tento kryt je tedy primárně namáhaný nápořem vzduchu opačném ke směru letu.

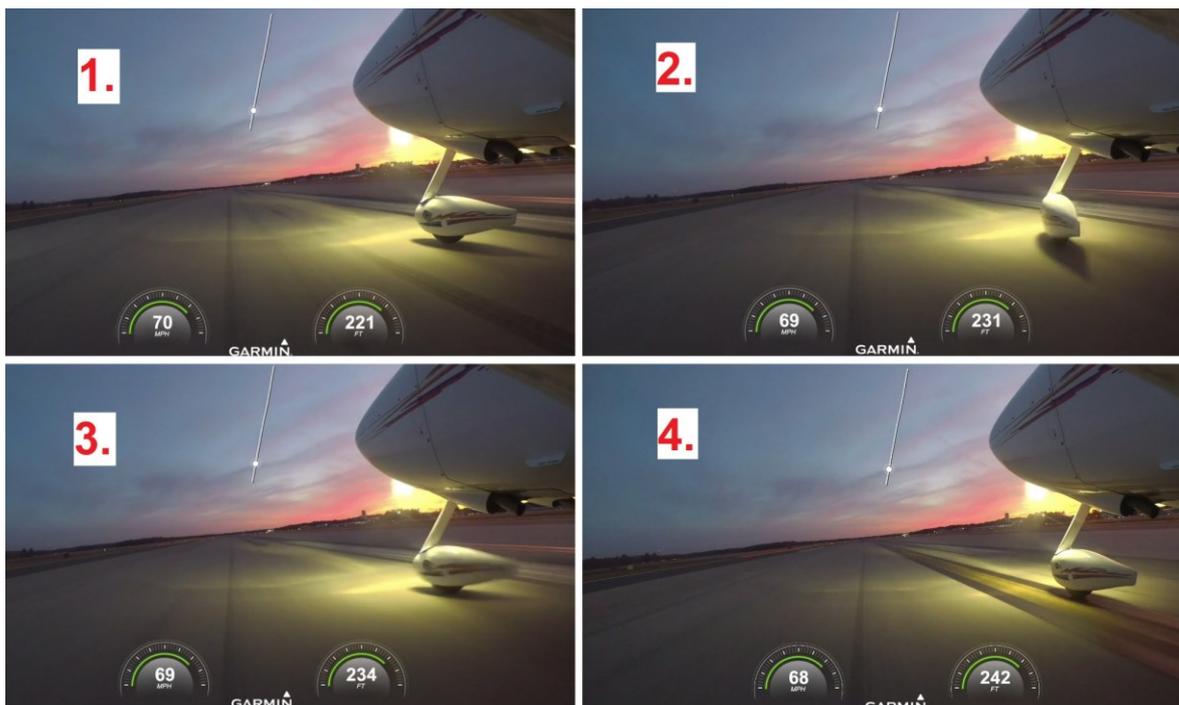
Vyjádření majitele letounu a technické obsluhy stroje naznačuje možné selhání dílu z důvodu jeho poddimenzování vzhledem k možnosti rázového zatěžování při přistání. Toto by již mohlo naznačovat cyklicky se opakující zatěžování vznikající při „tvrdých přistáních“.

6.2 identifikace zatěžujících jevů

Primárním účelem zkoumaného dílu je držení aerodynamického krytu předového podvozku. Jak již bylo řečeno majitelem letounu a jeho technické obsluhy, hlavní zatížení daného dílu vznikají náporům vzduchu na uchycený kryt a možná zatížení spojená s „tvrdým přistáním“ stroje. V případě nevhodně provedených přistání by smysl zatěžování již naváděl k cyklickému zatěžování a možnosti vzniku únavových lomů. Vzhledem k velikým zatěžovacím silám by potom na samotném vzorku při měření měli být patrné veliké „zuby“, kde došlo k extrémnímu zatížení dílu a velkému postupu lomu samotného. Toto bude prověřeno v kapitole vyhodnocení dat.

Další možností zatěžování předového podvozku je tzv. „shimmy“ efekt, kdy dojde ke kmitání konstrukce bezprostředně při dotyku kola podvozku s povrchem dráhy. Vlivem pružnosti pneumatiky může vzniknout kmitání, kdy je podvozek vychylován do stran. Uspořádání podvozku na letounu SR22 potom tomuto efektu může nahrávat svým uspořádáním, jelikož se jedná o vlečený podvozek neřízený, kde kolo letounu je „vlečeno“ za hlavní podvozkovou nohou (na sestavě díl č. 244). Podvozek je zde neřízený, to znamená absenci větších „protisil“ vlivem táhel řízení – podvozková noha musí být volně otočná pro jednoduché zatáčení se strojem při pojíždění po zemi, změna směru je zde dosažena asymetrickým brzděním jednoho či druhého kola hlavního podvozku. U této konstrukční kombinace podvozku je „shimmy“ efektu bráněno pouze jediným prvkem – „pukem“, z automotive dílem podobným silentbloku na nápravách automobilů k tlumení všech vibrací konstrukce. Tento pasivní prvek však nemůže zabránit veškerým kmitům, už vůbec ne pokud jsou kombinované s nevhodně provedeným přistáním. Z principu shimmy efektu je pak zřejmá možnost cyklického namáhání při každém takovém přistání.

Po bližším zkoumání různých článků, bulletinů výrobce stroje a prohledávání videí z průběhu přistání tohoto letounu bylo nalezeno několik záběrů, kde k tomuto efektu dochází na totožném typu letounu, Cirrusu SR22 i jeho starší generaci SR20. Záběry z tohoto videa, volně dostupného na internetu natočeného v roce 2019 jsou přiloženy na obázku. 24. Zde je jasně patrná výrazná boční výchylka podvozku v momentě doteku pneumatiky předového podvozku s povrchem dráhy.



Obrázek 24. Ukázka z videa chování předřového podvozku při přistání s jasně patrnou výchylkou vlečeného kola. 1 – Moment těsně před dotykem, klidový stav, 2 – moment doteku kola s povrchem, okamžitá maximální výchylka vlečeného kola, 3 – Kmit na opačnou stranu do maximální výchylky, 4 – Výsledné ustálení podvozku [32]

Extrémní výchylky, které mohou vznikat při dotyku kola podvozku s dráhou, jak je patrné na obrázku 24 jsou jasným důkazem, že u typu SR20/22 může docházet k shimmy efektu. Obecně je však přistávací podvozek na možnost výskytu tohoto efektu dostatečně dimenzován a nemělo by dojít k ohrožení bezpečnosti letu. Všechny kritické části podvozku procházejí pravidelnými prohlídkami a jsou periodicky vyměňovány pro zabránění možnosti selhání kritické součástky a selhání konstrukce jako celku. Díl, který drží tento aerodynamický kryt, však není označen jako kritický, a proto nepodléhá takto důkladným prohlídkám a není předepsána životnost – k výměně dílu by mělo docházet „on condition“, tedy v momentě, kdy mechanik při vizuální prohlídce zjistí poškození součástky. K tomuto by však za normálních podmínek nemělo docházet, nikoliv v horizontu desítek hodin provozu letounu.

6.3 Stanovisko výrobce letounu

Na webových stránkách výrobce letounu Cirrus je k dispozici servisní bulletin SA19-02 týkající se předového podvozku, vydán 24. 01. 2020. Předmětem tohoto bulletinu je odhalení a minimalizování kmitání (anglicky „shimmy“) předové podvozkové nohy letounu

V tomto dokumentu je uvedeno, že výrobce od roku 2016 obdržel několik zpráv a reklamací týkající se vibrování předové podvozkové nohy, kdy tento jev se nejvíce vyskytoval při přistání v momentě doteku podvozku s přistávací plochou a následnému roztáčení pneumatik. Vibrace podle hlášení šlo významně pociťovat i v kabině letounu. Ve výjimečných případech se kmitání podvozku objevovalo i při pojíždění letounu po zemi a při zrychlování v průběhu startu.

Doporučení výrobce v tomto dokumentu sestává ze dvou základních částí:

- Udržování správného tlaku v pneumatice předního podvozku
- Doporučení k co nejjemnějšímu provádění přistávacího manévru pro minimalizaci zatěžování podvozku

Závěrem dokumentu je zmíněno, že pokud pilot bude pociťovat „extrémní vibrace“, letoun by měl být uzemněn a přední podvozek podroben inspekci, v případě objevení prasklin na dílech pak doporučují kontaktovat výrobce. Doporučení vydané výrobcem jsou na obrázku 25, v anglickém originále vyjmuté z původního dokumentu SA19-02

3. ACTIONS

NLG shimmy events can be significantly reduced or eliminated by keeping NLG tire pressure at 30 - 35 psi (207 - 241 kPa).

Note: NLG shimmy may not necessarily be pilot landing technique related, but certain actions may minimize or exacerbate it.

Pilot actions that will likely eliminate or mitigate nose wheel shimmy include the following:

- Minimize side-load on landing by landing with the longitudinal axis aligned with the runway.
- Gently lower the nose gear to the runway on landing and avoid abruptly releasing control yoke back pressure.
- If shimmy is experienced on landing, add back-pressure to the control yoke to minimize weight on the nose gear. Minimize use of brakes until shimmy subsides.

If excessive or significant shimmy is experienced, further flight operations should be discontinued until Inspection/Check - Nose Gear Strut Assembly is performed. (Refer to AMM 32-20)

Obrázek 25. Výňatek z anglického originálu bulletinu SA19-02 popisující doporučené postupy pro minimalizování výskytu vibrování (shimmy) předového podvozku (NLG).

7 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Z celkového počtu 8 dílů bylo určeno pět vhodných vzorků pro další zkoumání a měření vzhledem k postupu tvorby trhliny. Všechny tyto díly byly při předání demontovány z letounu a bylo provedeno hrubé očištění pro následnou manipulaci se vzorky. Detail jednoho dílu s přínýtovanými závity pro montáž na letoun a se vznikající trhlinou v rádiusech dílu je na obrázku 26.



Obrázek 26. Detail zkoumaného dílu. Na fotografii jsou jasně patrné lomy na částech soustředujících napětí – rádiusy.

Všechny obdržené díly nesly jasné známky opotřebování a všechny byly v minimálně jednom místě prasklé. Podle velikosti prasklin bylo vytypováno 5 vzorků vhodných pro další měření a zkoumání. Díly byly označeny A-E a jednotlivé rohy očíslovány pro jednoduchou orientaci a reprodukovatelnost měření. Takto označené díly byly poté rozřezány úhlovou bruskou s kotoučem na řezání ocelí – materiál dílu je tvrdá slitina hliníku, dural, a proto se pomocí úhlové brusky daly vzorky jednoduše dělit. Všechny odříznuté části byly opatřeny šipkou naznačující orientaci na dílu pro jejich vzájemnou nezaměnitelnost a jednoduchou identifikaci umístění. Takto označené vzorky byly poté zkontrolovány, zda při oddělování nedošlo k poškození povrchu čela lomu. Na obr. 27. vidíme detail kompletního pracovního označení dílu včetně již provedených řezů pro získání jednotlivých vzorků k dalšímu zkoumání.



Obrázek 27. Detail dílu E po rozřezání včetně kompletního pracovního označení všech vzorků

7.1 Označení vzorků

Všechny díly byly označeny písmeny A-E pro jasnou identifikaci spolu s číselným označením každého odřezku – vzorku (např. E1 až E4 včetně šipek „pro orientaci“ viditelné na Obr. 27.). V následující tabulce 2 jsou ke každému dílu jsou uvedeny tzv. letové hodiny, které udávají součet doby, kdy bylo letadlo v provozu opatřeno tímto dílem (doba od namontování po selhání, kdy bylo letadlo ve vzduchu).

Tabulka 2. Životní cyklus dílu vyjádřený v letových hodinách letounu

| Díl: | Cyklus: [h] |
|------|-------------|
| A | 97 |
| B | 86 |
| C | 91 |
| D | 96 |
| E | 79 |

8 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ

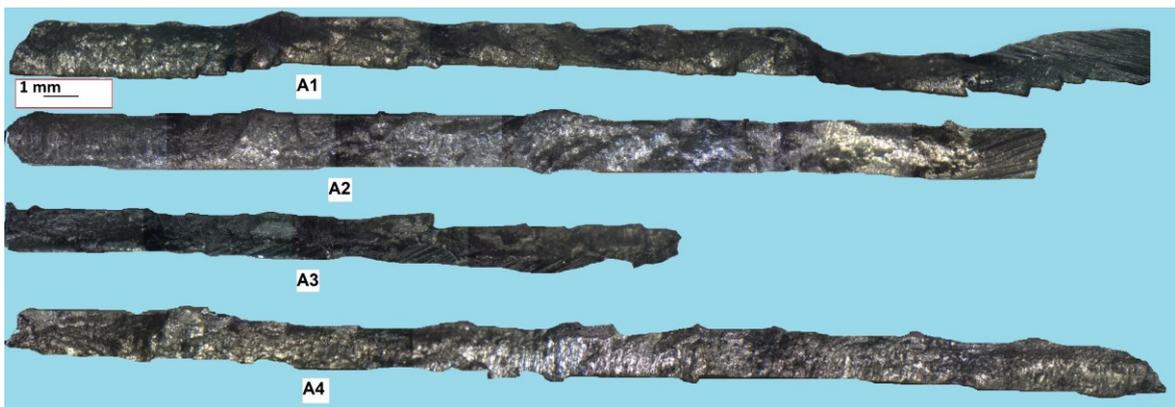
Zkoumání dílu probíhalo ve třech hlavních fázích:

1. Zkoumání povrchu trhliny mikroskopem
2. Měření vibrační podvozkové nohy letounu (neúspěšně)
3. Měření povrchu bezkontaktním profilometrem

V následující části diplomové práce je popsáno použité vybavení pro zkoumání dílu v jednotlivých fázích a postup měření a obrazový výstup z každého měření. V případě měření vibrací se bohužel nepodařilo nalézt ideální uložení měřicího aparátu schopného vydržet podmínky za letu v kombinaci a dosáhnout smysluplného výsledku měření

8.1 Zkoumání povrchu trhliny s využitím mikroskopu

První metoda pro zkoumání povrchu trhliny, určení jejich základních charakteristik a identifikace typu trhliny probíhalo na mikroskopu Leica. Pro zkoumání povrchu trhliny byl zvolen díl A, který po předběžné vizuální kontrole obsahoval nejvhodnější trhliny. Zkoumání trhliny vždy probíhalo na celé její délce, kdy vzniklé snímky byly následně uspořádány vedle sebe pro získání digitálního obrazu celé trhliny. Na takto zpracované trhlince mohl být určen následující postup, kdy bylo zvoleno měření bezkontaktním profilometrem.



Obrázek 28. Náhled celých lomových linií dílu A. Celé linie vznikly ručním seskládáním jednotlivých snímků z mikroskopu vedle sebe.

Primárním účelem tohoto snímkování bylo identifikovat linie naznačující únavové lomy. Ty se mohou vyskytovat jako soustředné kružnice nebo rovnoběžné linky, kde při opakovaném působení namáhajících sil dochází k pozvolné propagaci trhliny. Pro identifikaci takových

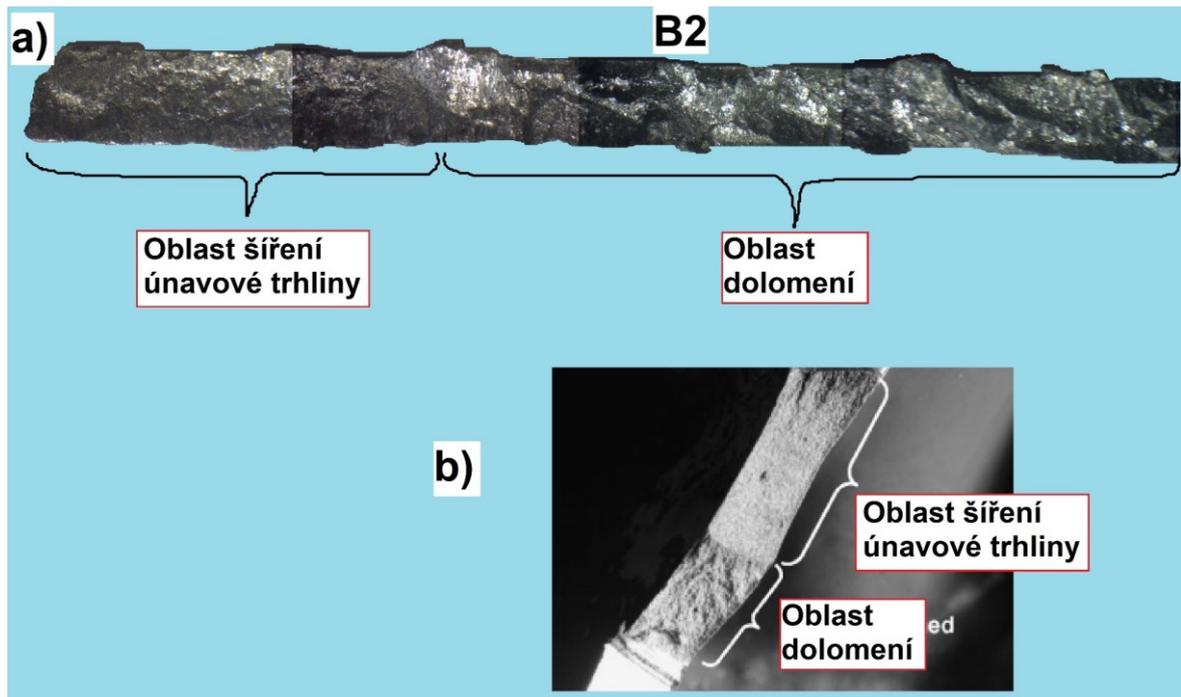
linií ovšem potřebujeme větší detail (Obr. 29.), kde jsou tyto identifikované linie naznačené červenou čarou. Od tohoto momentu bylo jasné, že minimálně tento zkoumaný vzorek (A4) selhal primárně vlivem únavového lomu. Stejný jev bylo možné pozorovat u všech zkoumaných vzorků, u některých i pouhým okem.



Obrázek 29. Odhalení únavových trhlin. Nahoře originální pohled. Dole kopie se zvýrazněnými místy trhlin (červená čára). Tento „žebřík“ zvýrazňuje pozvolnou propagaci lomu.

Dalším krokem při pozorování lomu pod mikroskopem bylo prověřit, zda se na dílu vyskytuje jednoznačně rozlišitelné pole inicializační trhliny, kdy lom postupuje velmi pomalu – šíření lomu I. stupně, který při dosažení kritické délky přejde na lom II. stupně, který se potom velice rychle šíří až dojde k selhání dílu.

Na obr. 30. vidíme porovnání námi zkoumaného vzorku se vzhledem únavového lomu zkoumaného v Indii v roce 2007, shodně také na dílu a slitině hliníku aplikované v letectví. Na obou zkoumaných površích je zde jasně patrná nejprve oblast propagace, pozvolného šíření únavové trhliny



Obrázek 30. Porovnání vzhledu lomu pro určení, zda jde o únavový lom. a) Námí zkoumaný díl B2 obsahující obě fáze únavového lomu, b) Porovnávaný obrázek z výzkumu únavových lomů v Indii, 2007 [34]

8.2 Měření vibrací sestavy podvozku za provozu

Pro změření velikosti a frekvence všech zatěžujících sil bylo rozhodnuto o měření vibrací přímo na letounu v provozu. Při zkoumání možností, jakým způsobem toto měření prakticky provést jsme došli ke dvěma možnostem kontaktního měření:

1. S využitím kalibrovaných akcelerometrů
2. S využitím improvizovaného zařízení

Z důvodů dostupnosti měřící aparatury, stejně tak jako její citlivosti na okolní prostředí a celkové hodnoty přístroje v případě jakéhokoliv poškození v průběhu měření bylo přistoupeno k volbě improvizovaného zařízení. Při volbě ideálního zařízení bylo čerpáno z odborného článku (35), který jako nejlepší možnou metodu nabízel využití běžného smartphonu nebo tabletu, ideálně s operačním systémem Android (ne však výlučně). Hlavní problematikou z pohledu dat a jejich následného vyhodnocování byla obecně nižší přesnost akcelerometrů běžně instalovaných ve smartphonech oproti profesionálním akcelerometrům. Přesné akcelerometry jsou schopné měření s přesností 10^{-9} g s maximálním rozsahem průměrně okolo ± 1 g. Akcelerometry instalované ve smartphonech však nejsou na takovou přesnost konstruované, největší důraz je zde kladen na miniaturizaci a hmotnost.

Novější zařízení jsou dnes běžně vybaveny akcelerometry typu MEMS, které dosahují rozsahu měření ± 4 g s přesností do 10^{-4} g. [35]

Pro naše měření bylo rozhodnuto o využití staršího smartphonu Samsung Galaxy J5 SM-J500H. Hlavní faktory při volbě tohoto zařízení byla minimální zbytková hodnota zařízení a dostatečná přesnost integrovaného akcelerometru. Vzhledem k tomu, že tyto měření měly probíhat v zimě, telefon musel být schopný po dobu letu vydržet velmi nízké okolní teploty, stejně jako přípravek na jeho uchycení k letounu. Dále musel být telefon, pokud možno co nejpevněji přichycen k letounu, aby nedošlo k jeho uvolnění za letu. Zároveň však musel být vnější obal telefonu, pokud možno co nejbližší (bez jakýchkoliv mezivrstev) ke zkoumané součásti.

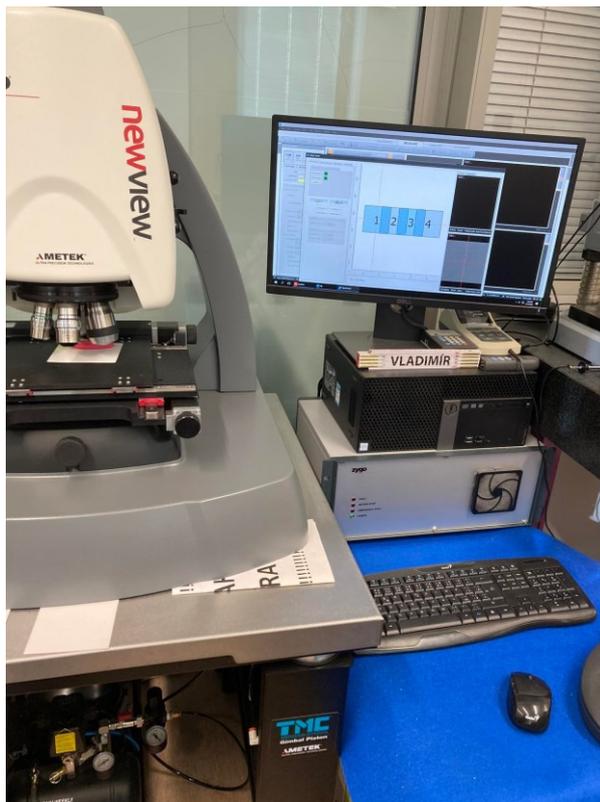
Pro uchycení zařízení bylo vyzkoušeno několik různých možností, jak smartphone dostatečně zafixovat na hladkém povrchu aerodynamického krytu kola. S různými kombinacemi využívajícími primárně izolační pásku však nebylo dosahováno uspokojivých výsledků měření ani spolehlivosti uchycení k letounu. Nebylo možné použít pevnějšího spoje, jelikož není možné mechanicky zasahovat do součásti letadla (vrtání, lepení) Po pozemních zkouškách bylo dosavadní řešení označené jako nebezpečné pro veřejnost a pro letoun samotný, pokud by došlo k uvolnění zařízení během letu. Zároveň uchycení převážně izolační páskou vzhledem ke své pružnosti značně zkreslovalo jakákoliv naměřená data. Z tohoto důvodu bylo po konzultaci s vedoucím diplomové práce od dalších měření na letounu za letu opuštěno.

8.3 Měření povrchu bezkontaktním profilometrem

Po vyhodnocení povrchu trhliny na mikroskopu, kde bylo potvrzeno podezření na únavové lomy bylo potřeba získat detailnější pohled na lom samotný. Bylo přistoupeno ke zkoumání bezkontaktní metodou na 3D profilometru, který dokáže podat obrazový výstup pro následné porovnávání našich výstupů s obecnou charakteristikou únavového lomu.

8.3.1 3D Profilometr Zygo

K bezkontaktnímu měření povrchu byl použit profilometr Zygo NewView 9000, kterým disponuje metrologická laboratoř UTB. Jedná se o výkonný interferometrický systém, na kterém lze měřit nejrůznější druhy povrchů, od hladkých až po drsné. Schopnost měřit povrch s vysokým odleskem byla klíčová v případě našeho měření duralových vzorků.

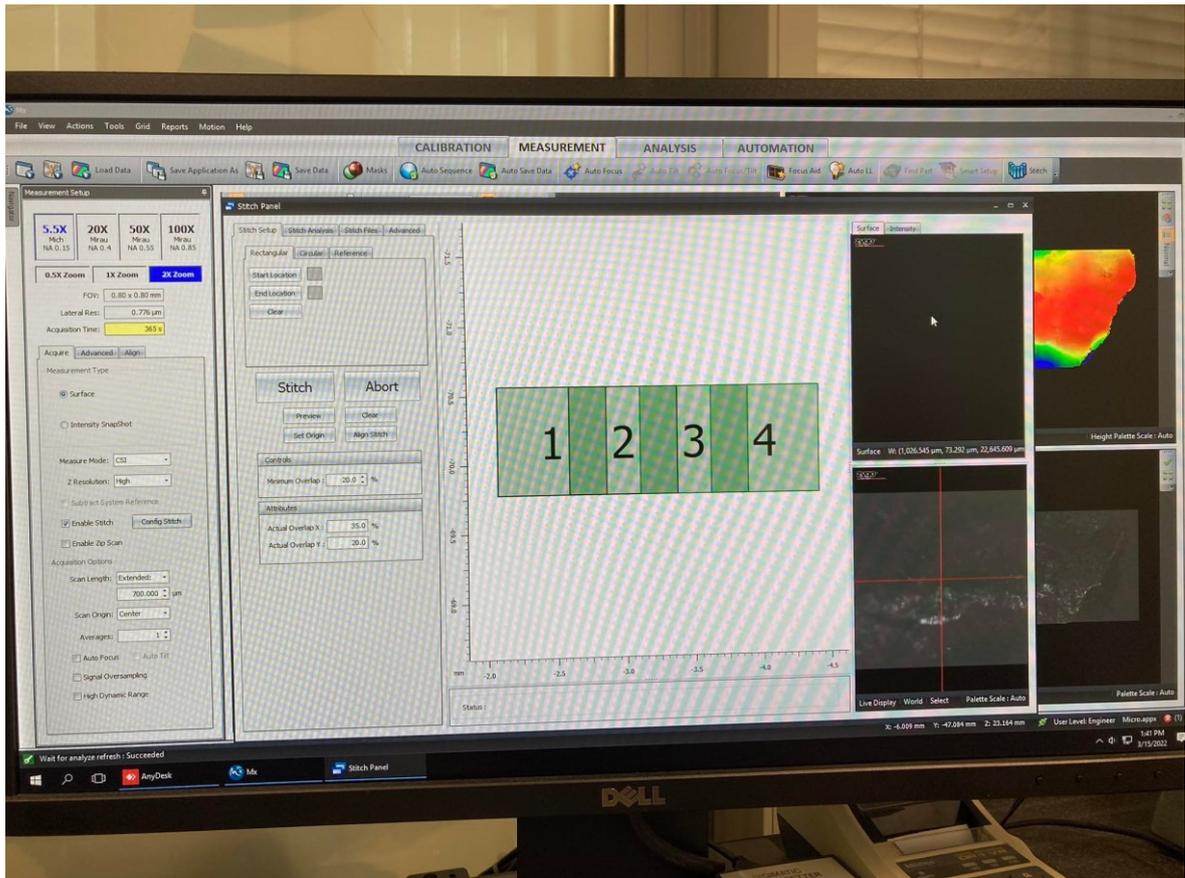


Obrázek 31. Pracovní stanice profiloměru Zygo NewView 9000 v laboratořích UTB

Na profilometru Zygo lze předdefinovat pole, na kterém chceme provést měření, kdy software přístroje následně propočítá počet snímků a jejich rozložení tak, aby byla pokryta celá požadovaná plocha. V případě našeho měření bylo potřeba odhadnout hrubé nastavení přístroje a následně toto nastavení odladit pro získání požadovaného výsledku. Výsledné hodnoty nastavení přístroje jsou shrnuty v tabulce 3. a na obrázku 32., který znázorňuje pole vstupu do softwaru profilometru.

Tabulka 3. Hodnoty nastavení profilometru Zygo NewView 9000

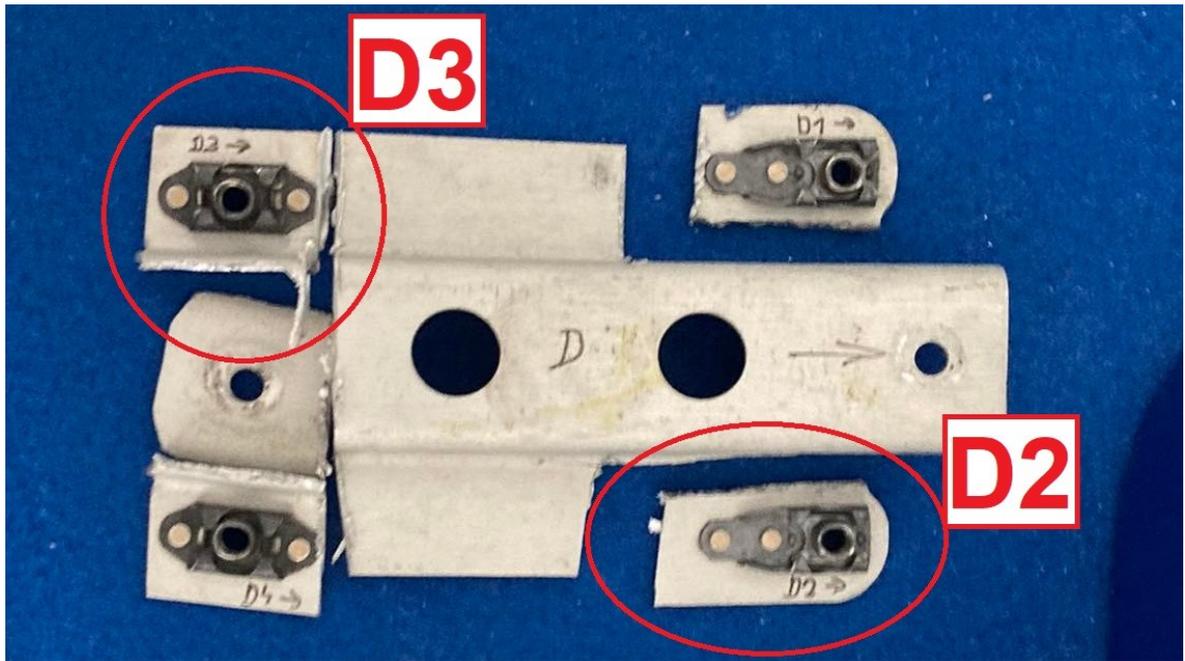
| Parametr: | Hodnota: |
|------------------------------------------|-------------------|
| Objektiv: | 5.5x Mich NA 0.15 |
| Přiblížení: | 2x |
| Doba snímání: [s] | 365 |
| Délka snímané oblasti: [μm] | 700 |
| Překrývání snímků – OSA X: [%] | 35 |
| Překrývání snímků – OSA Y: [%] | 20 |



Obrázek 32. Náhled softwaru Mx ovládající profiloměr Zygo včetně námi použitých hodnot pro dané měření.

8.4 Měření povrchu

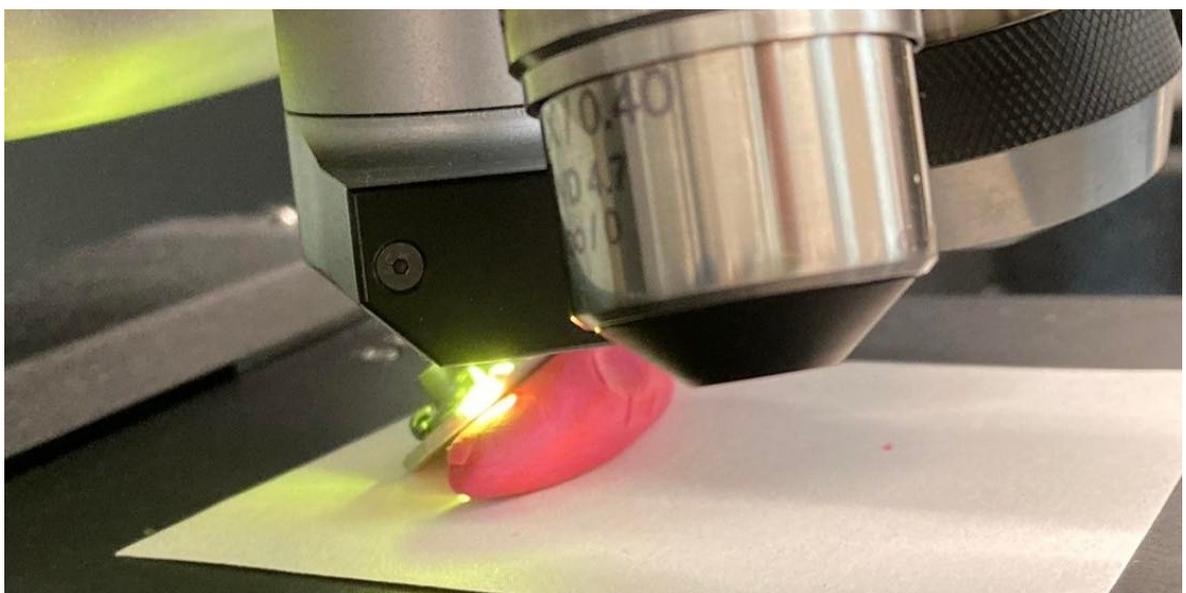
S využitím bezkontaktního profilometru bylo provedeno měření na vzorcích dílů A, D a E. Z každého dílu byl vzat vzorek z přední části dílu a ze zadní části dílu, identifikace vzorků je naznačena na obr. 33. Při měření jednotlivých vzorků bylo měření soustředěno na inicializační část trhliny, kde je nejjasnější postupný růst a propagace trhliny, kdy pro měření takto malých drsností se nejlépe uplatní právě vysoce přesné přístroje jako například univerzitní profiloměr Zygo.



Obrázek 33. Příklad volby vzorků pro měření na bezkontaktním profilometru Zygo. Zvýrazněné díly reprezentují „přední“ a „zadní“ typ vzorku podle jejich umístění na díle.

Na díle je naznačena tato orientace šipkou směrem dopředu.

Na jednotlivých dílech bylo poté provedeno měření s grafickým výstupem pro možnost jejich následného vyhodnocení a porovnání. Pro samotné snímání vzorku bylo potřeba jeho natočení čelem lomu proti snímači, čehož bylo dosaženo podepřením vzorku kusem plastické hmoty. Vzorek připravený pod snímací optikou bezkontaktního profilometru můžeme vidět na obrázku 34.



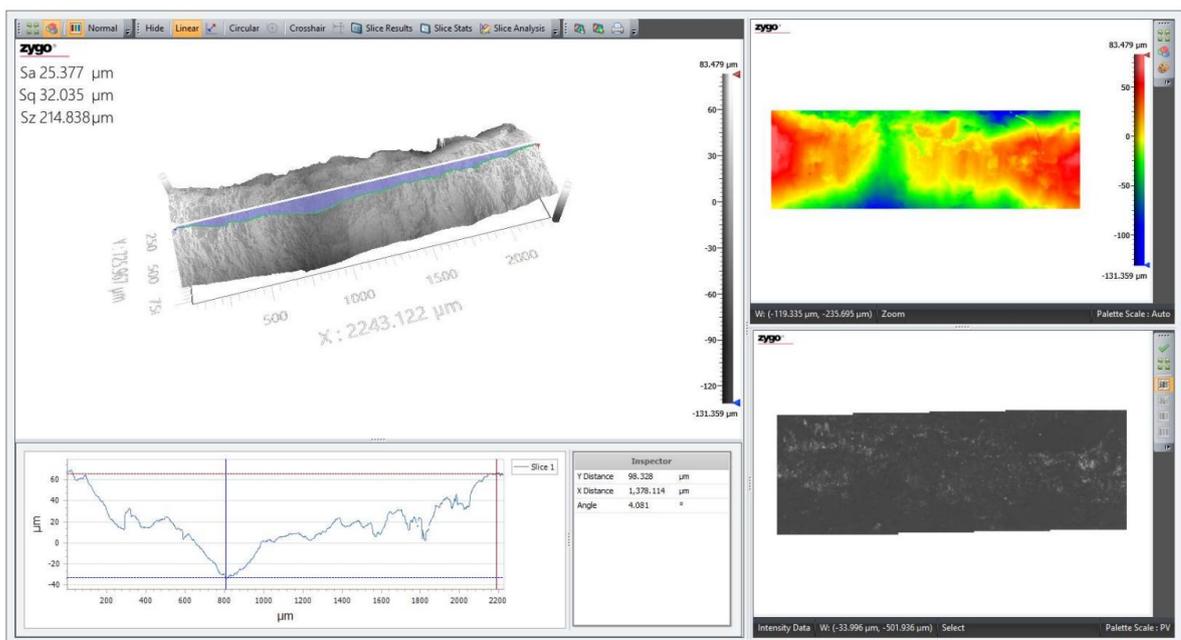
Obrázek 34. Náhled uložení vzorku pod snímací optiku bezkontaktního profilometru Zygo.

Každý snímek pořízený bezkontaktním profilometrem obsahuje v levém horním rohu naměřené hodnoty zvolených parametrů. Tyto zvolené parametry jsou:

- Sa – Aritmetický průměr posuzovaného povrchu
- Sq – Kvadratický průměr posuzovaného topografického povrchu
- Sz – Maximální výška topografického povrchu na definované oblasti

8.4.1 Vzorky dílu A

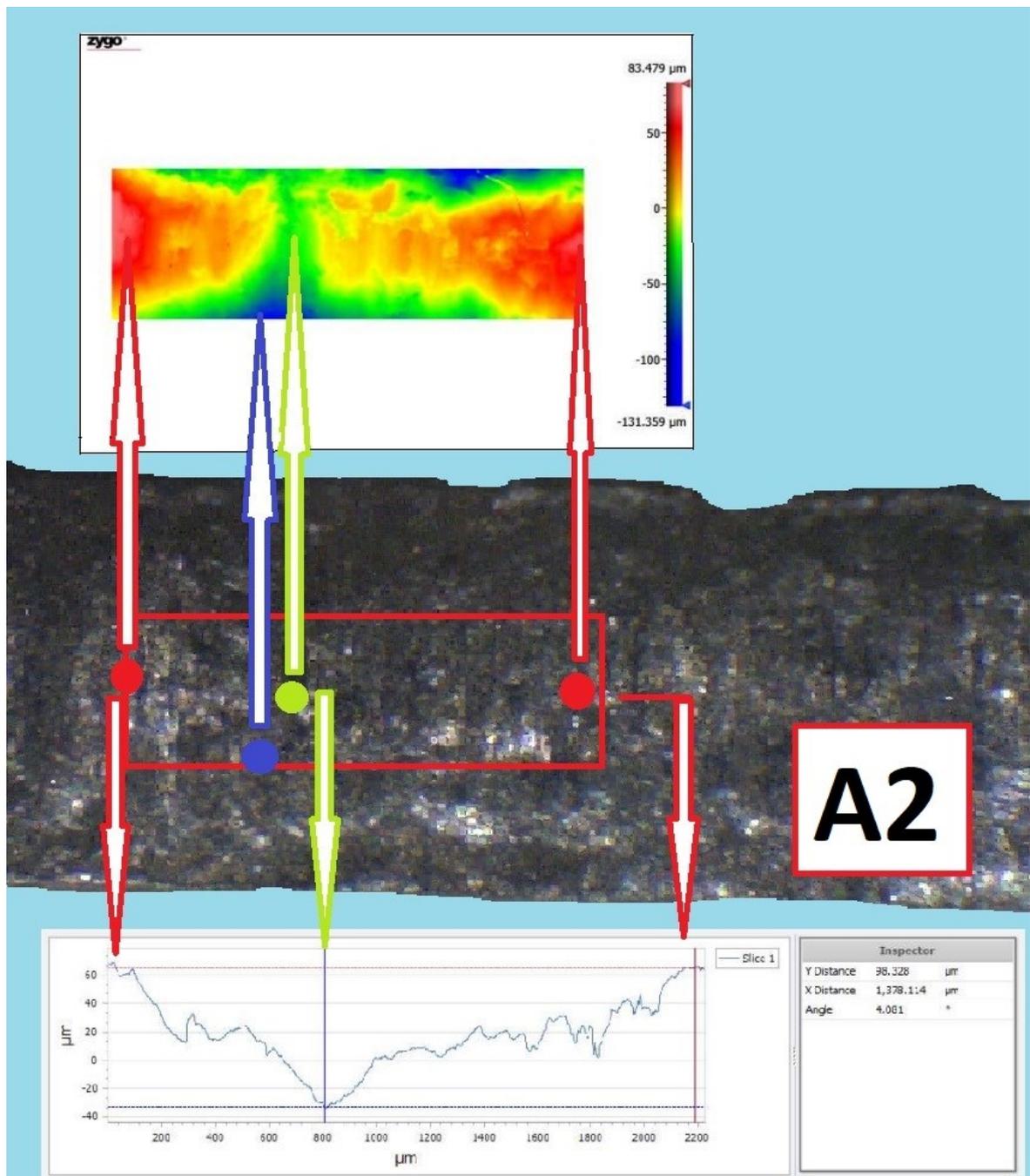
První měření probíhalo na vzorcích vyjmutých z dílu A. Pro měření byly použity vzorky A2 a A3, podle rozvržení na obr. 33. Měření každého vzorku bylo stanoveno na délce 2 mm, při použití nastavení přístroje podle tabulky 3. Po provedení scanování povrchu vytvoří software profilometru Zygo okno obsahující všechny požadované výstupy.



Obrázek 35. Výstup ze softwaru Mx po scanování povrchu vzorku A2 profilometrem Zygo.

Při vyhodnocování naměřených dat je potřeba definovat linku ve 3D obrazu, od které budou potom odečteny vzdálenosti od povrchu. Takto vzniklá linie „inspector“ je vykreslena na 3D modelu povrchu modro-fialovou barvou. Po definování této linie poté vzniká průřez profilem, který je viditelný v levém dolním rohu okna výstupu.

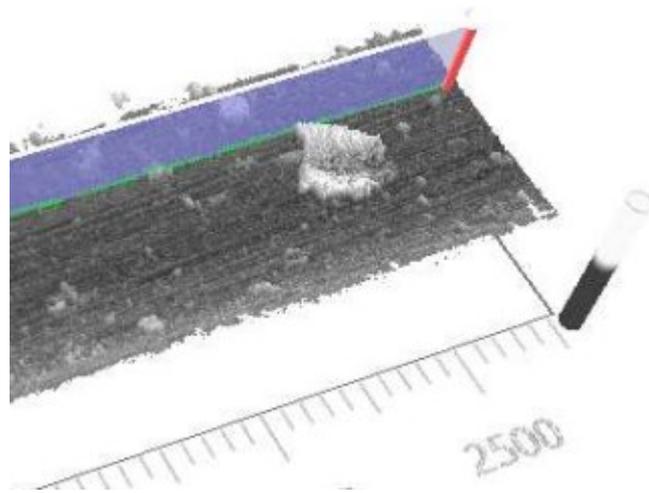
Výsledky zkoumané oblasti vzorku A2 jsou na obrázku 36. přiřazeny ke snímkům z mikroskopického pozorování celého čela trhliny. Na tomto snímku srovnání můžeme vidět 2D barevný pohled na povrch zkoumané oblasti, který podle barvy a přiložené stupnice podává přehled o hloubce jednotlivých bodů na zkoumaném povrchu.



Obrázek 36. Přiřazení oblasti zkoumané profilometrem Zygo ke snímkům vzorku A2 pořizených na mikroskopu. Ve spodní části obrázku je vložena křivka popisující profil povrchu. Minimální a maximální hodnoty jsou zvýrazněné šipkami.

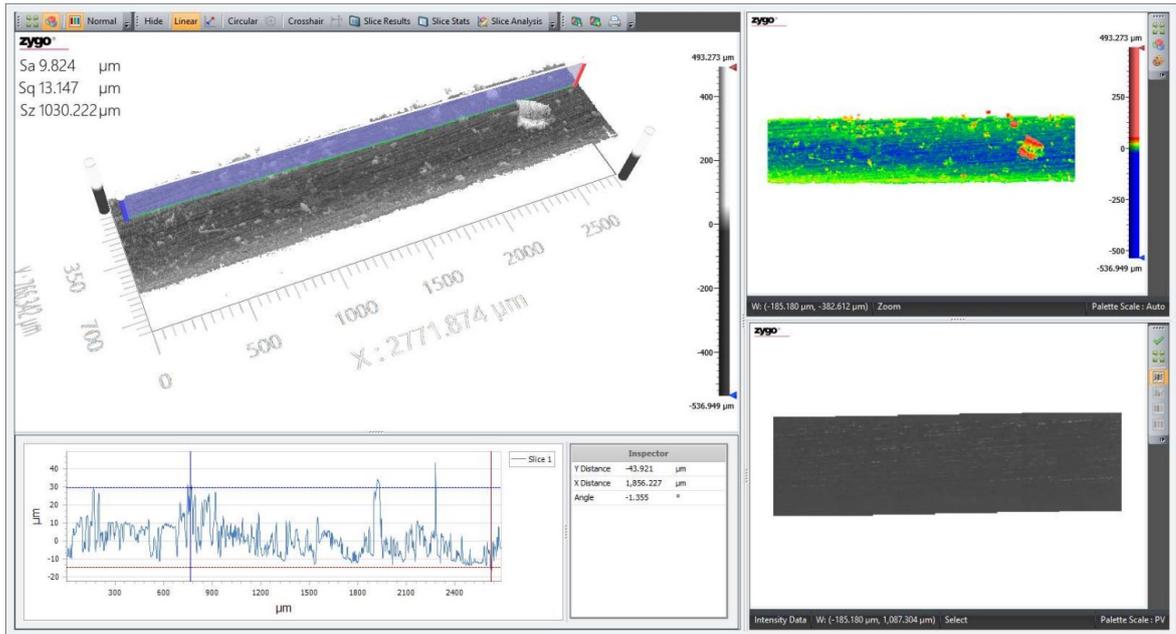
Na snímcích z obrázku 36 je vidět výrazný „zub“, který je znázorněn zelenou šipkou. V grafu je tato oblast na $800\mu\text{m}$ osy x jednoznačně nejnižší oblastí profilu povrchu na základní délce. Absolutně nejhlubší místa potom můžeme vidět na okrajích zkoumané oblasti označené modrou barvou a také dvě maxima, nacházející se na začátku a konci pole.

Vzorek A3 reprezentuje inicializační část lomu vzniklou na zadním díle dílu A. Při snímání tohoto vzorku nastal zvláštní jev, kdy se většina plochy jeví jako relativně rovný povrch. V jednom místě zkoumané oblasti však došlo k odtržení materiálu v průběhu lámání, což zapříčinilo roztáhnutí celé stupnice výšky jednotlivých bodů. Tento jev může být zapříčiněn velmi velikou dočasně působící silou, která na díl mohla zapůsobit při extrémně nepodařeném přistání, anebo pravděpodobněji metalurgické nedokonalosti slitiny v dané oblasti. Tímto došlo k rozostření optiky v pohledu na celou zkoumanou plochu, protože automatické zaostření se snažilo přizpůsobit celému profilu, včetně této extrémní hodnoty. Na obr. 37 můžeme vidět detail této oblasti, která zapříčinila výraznou odchylku námi použité metody zkoumání bezkontaktním profilometrem.



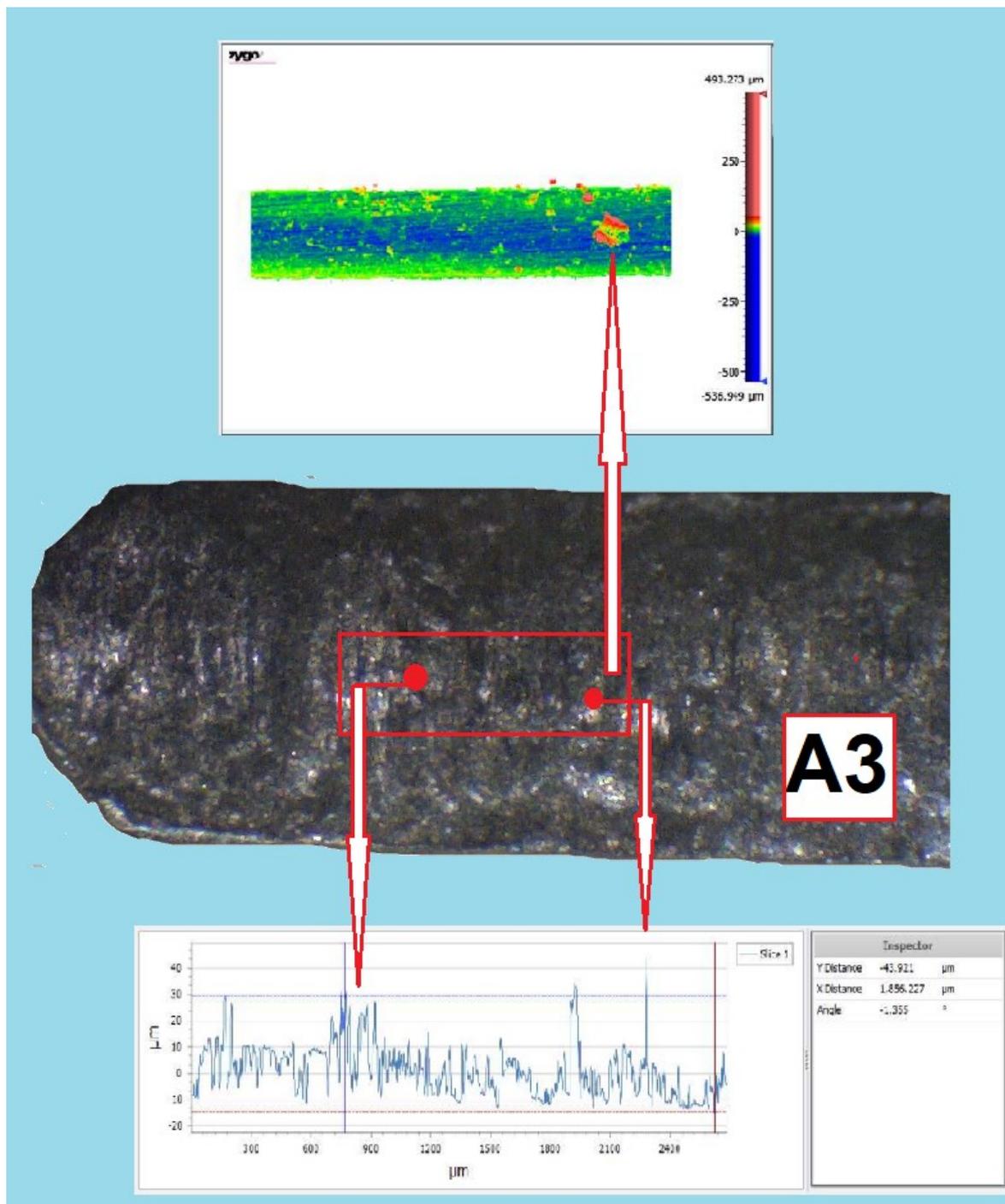
Obrázek 37. Detail příčiny zkreslení výsledků měření vzorku A3. Pravděpodobně odtržený kus materiálu v průběhu lámání zapříčinil nedokonalé zaostření snímací optiky profilometru Zygo.

Toto měření však nelze zcela vyřadit, naměřit znovu. Toto měření je totiž důkazem právě možné metalurgické nedokonalosti nebo jiných jevů, které mohli zapříčinit toto chování na lomu. Zároveň toto dokládá, že optika se skutečně dá zaostřit pouze jednou a toto zaostření nelze v průběhu měření měnit, tudíž potom můžeme dostat zkreslené výsledky. Celý výstup ze softwaru Mx můžeme vidět na obrázku 38.



Obrázek 38. Výstup z měření vzorku A3. Jasně zkreslení výsledků zapříčiněné odtržením materiálu ve zkoumané oblasti a následné rozostření snímací optiky profilometru Zygo.

V případě takové extrémní hodnoty se potom ve výstupním okně softwaru zbylý povrch jeví jako relativně rovná plocha. V pravém dolním rohu výstupního okna můžeme vidět, že obraz kamery optiky byl skutečně velmi tmavý, protože automaticky zaměřovaná hlava byla příliš daleko od zbytku povrchu. V následném zařazení, obrázek 39. zkoumané oblasti ke snímání mikroskopem si můžeme povšimnou relativní rovinnosti celé zkoumané oblasti s vyznačeným bodem, kde se nachází ono místo odtržení materiálu. Na barevné stupnici výšky jednotlivých snímaných bodů je vidět veliké rozpětí všech výšek, které se tato stupnice snaží obsáhnout. V případě měření vzorku A2 bylo toto rozpětí 214 μm , zatímco v případě vzorku A3 je rozpětí 1030 μm , více než jeden milimetr. Výstupní graf z měření A3 proto v závěrečném vyhodnocení nebude započten.

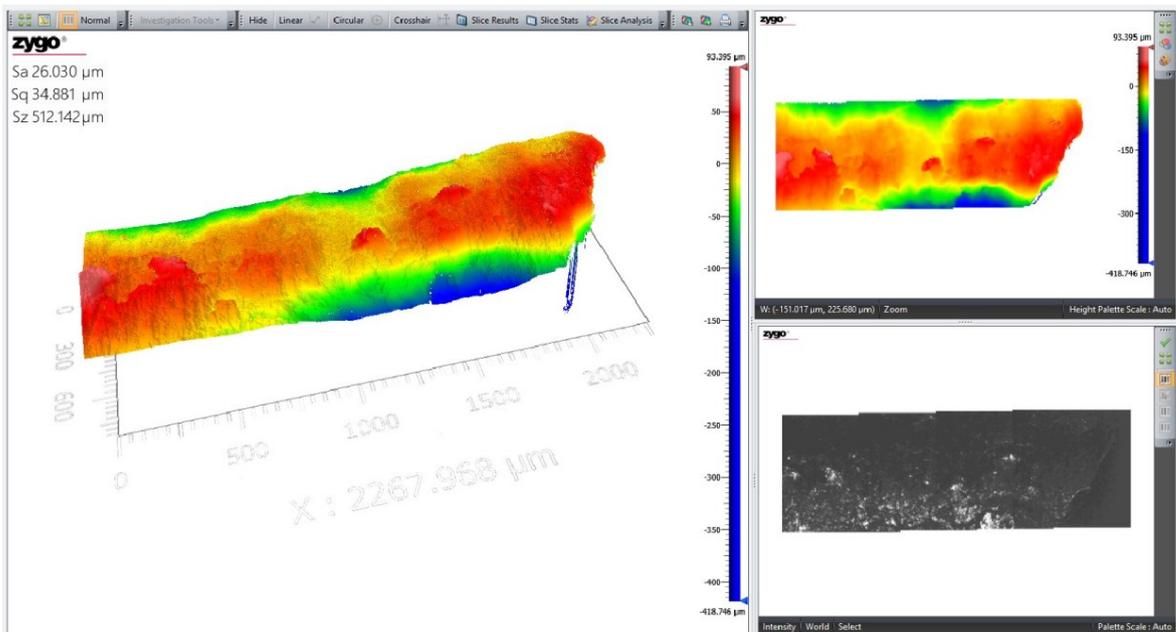


Obrázek 39. Přiřazení oblasti zkoumané profilometrem Zygo ke snímkům vzorku A3 pořízených na mikroskopu. Ve spodní části obrázku je vložena křivka popisující profil povrchu. Minimální a maximální hodnoty jsou zvýrazněné šipkami.

8.4.2 Vzorku dílu D

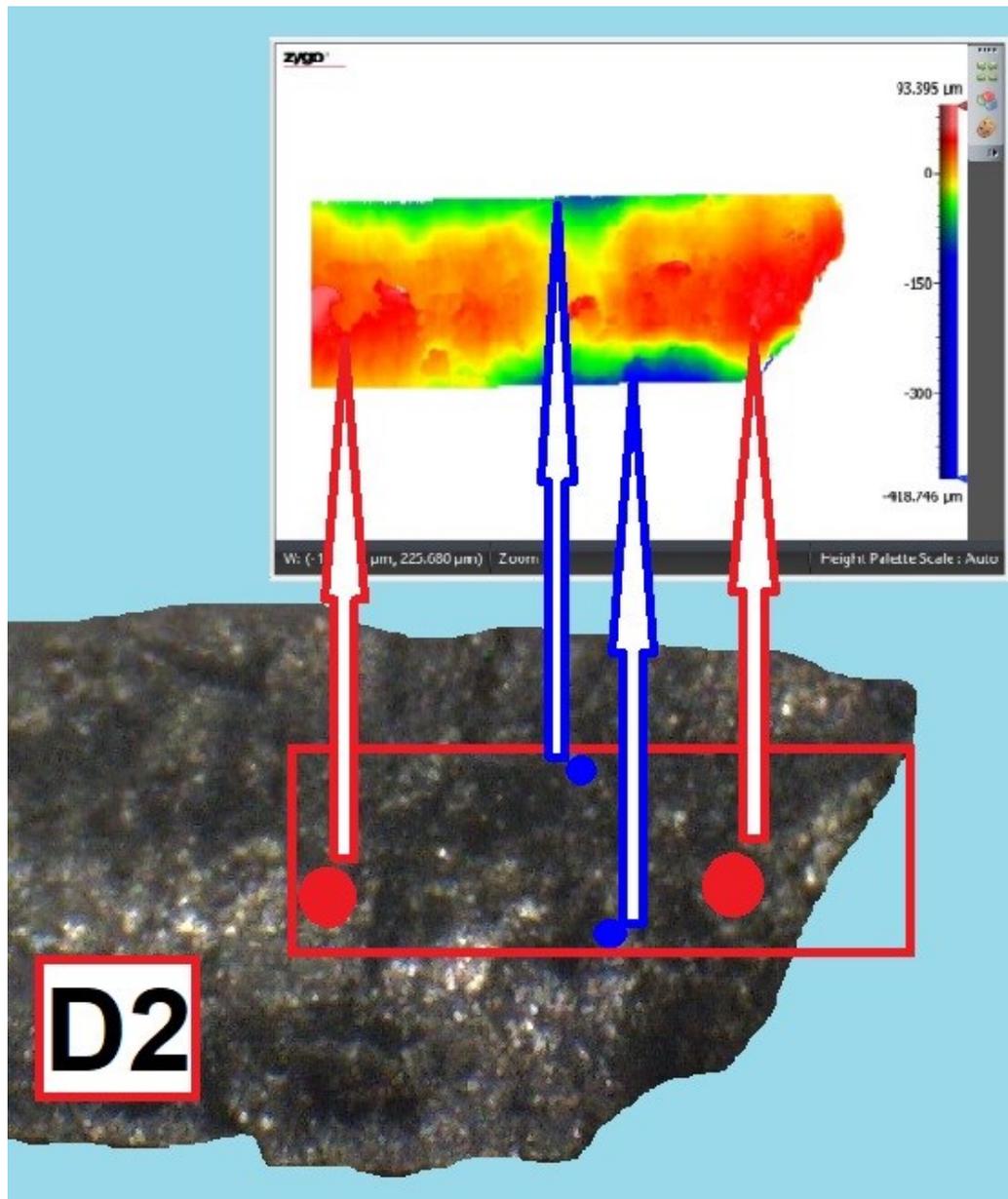
Vzorky vyjmuté z dílu D byly obdobně měřeny jako A2 „přední“ a A3 „zadní“. Počínaje měření vzorků D dílu bylo upraveno nastavení zobrazování výsledků v softwaru Mx tak, aby 3D pohled na měřenou oblast byl také barevně rozlišený podle výšky bodu, stejně jako tomu bylo v případě 2D pohledů. Tato úprava poskytne lepší podklad pro další vyhodnocování.

Vzorek D2 je z inicializační části lomu dílu vyjmutý ze přední části dílu, kdy už můžeme opět pozorovat typický průběh propagace únavového lomu, tj. kolmo k předpokládanému směru působícího zatížení vidíme liniové lomy dohromady s větší linií lomu uprostřed dílu jdoucí po celé jeho šíři, která značí výraznější zatížení oproti průměru, tudíž i výraznější deformaci dílu a hrubší lom. Celé okno výstupu ze softwaru Mx včetně provedených změn zobrazení můžeme vidět na obrázku 40.



Obrázek 40. Výstup z profilometru Zygo pro díl D2. Od dílu D2 došlo k úpravě zobrazení, kdy i pro 3D pohled bylo nastaveno barevné rozlišení podávající jasnější přehled o výšce profilu povrchu.

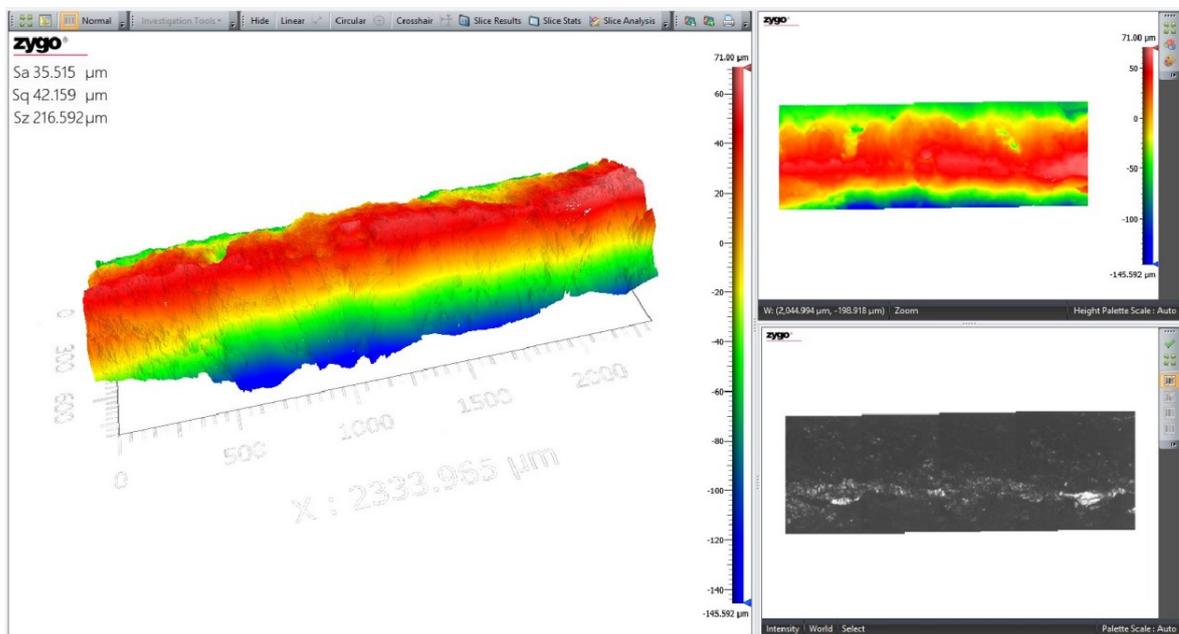
I v případě měření vzorku D2 je vidět oblast označená tmavě modrou barvou, kdy na okrajích měřené plochy jsou oblasti výrazně nižší. Na výstupu z profilometru, v pravém dolním okně lze vidět odlesk této prohlubně, která mohla být opět zapříčiněna vnějším mechanickým poškozením v průběhu používání dílu. Tato oblast je znázorněna i na přiřazení snímků profilometru na obrázku 33.



Obrázek 41. Přiřazení oblasti zkoumané profilometrem Zygo ke snímkům vzorku D2 pořízených na mikroskopu. Počínaje měřením vzorku D2 došlo k úpravě výstupu, kdy graf popisující křivku povrchu nebyl generován a jako hlavní ukazatel drsnosti povrchu zde slouží barevně označené zobrazení ve 2D a 3D rozměrech.

I v případě vzorku D2 je barevná škála od maximální po minimální hodnotu více než 1 mm dlouhá. Toto vzniklo právě oblastí významně nižší než zbytek měřeného profilu. Zaostření optiky snímáče zde proběhlo ideálně, tudíž podstata zkoumané oblasti je správně měřená a tato „hluboká“ oblast nezkrsluje výsledný obraz ani hodnoty.

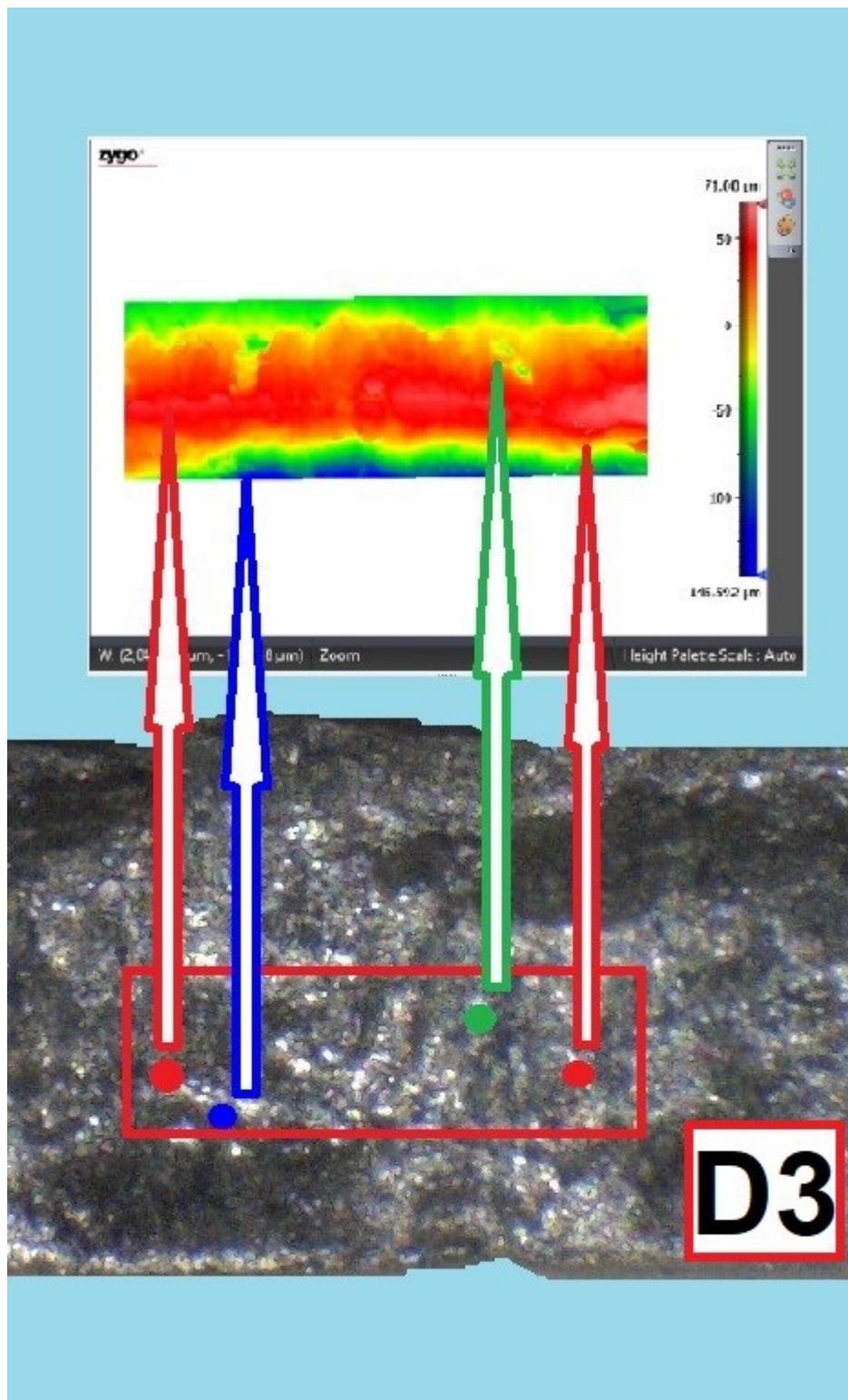
Vzorek D3 pochází z inicializační části trhliny ze zadní strany zkoumaného dílu D, ovšem ne ze samotného počátku trhliny, ale je o přibližně 1,5 mm posunutý ve směru působení zatěžující síly. Toto bylo použito z důvodu popsání inicializační části i dále na dílu, stejně jako v měření A3, které ovšem tuto plochu nepopisuje dle představ, viz. výsledky měření A3. Při měření D3 jsme získali náhled na tuto oblast, kde je opět jasně patrná postupná propagace únavového lomu. V tomto měření byla zkoumaná oblast zaměřena na prostřední nejvyšší linii táhnoucí se po celé inicializační části lomu. Výsledný průřez této oblasti je tak ve tvaru obráceného U, při krajích nejnižší body a uprostřed maxima. Náhled výstupu profilometru je na obrázku 42.



Obrázek 42. Výstup ze softwaru Mx po scanování povrchu vzorku D3 profilometrem

Zygo.

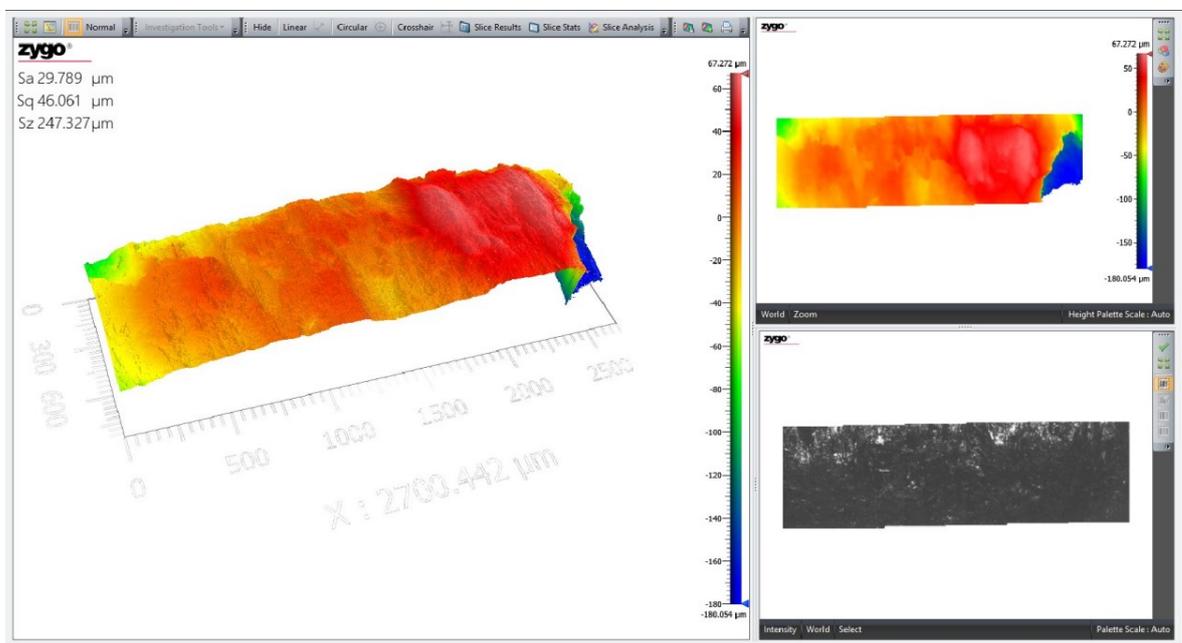
V přiřazení výstupu profilometru k snímkům pořízených s využitím mikroskopu (obrázek 43.) je zelenou šipkou označeno místo, kde pravděpodobně v této oblasti opět docházelo k odtrhávání materiálu, ovšem ne tak výraznému, aby došlo opět k hrubém zkreslení měření, jako v případě vzorku A3. Vzhledem k tomu, že se jedná o stejnou oblast vzniku trhliny a stejnou pozici na trhlině vybranou pro snímání toto poukazuje na opakování totožného jevu. Toto odtrhávání materiálu je zde patrné jako oblast nižší výšky měřených bodů obehnaná mnohem vyšším profilem, takovéto důlky potom můžou vznikat právě vytržením kusu materiálu z této oblasti. Zbytek zkoumané oblasti jeví opět příznaky liniových mikrotrhlin tak jak se postupně šířil celý lom.



Obrázek 43. Přiřazení oblasti zkoumané profilometrem Zygo ke snímkům vzorku D3 pořízených na mikroskopu. Zelenou šipkou zvýrazněno místo pravděpodobného odtržení materiálu.

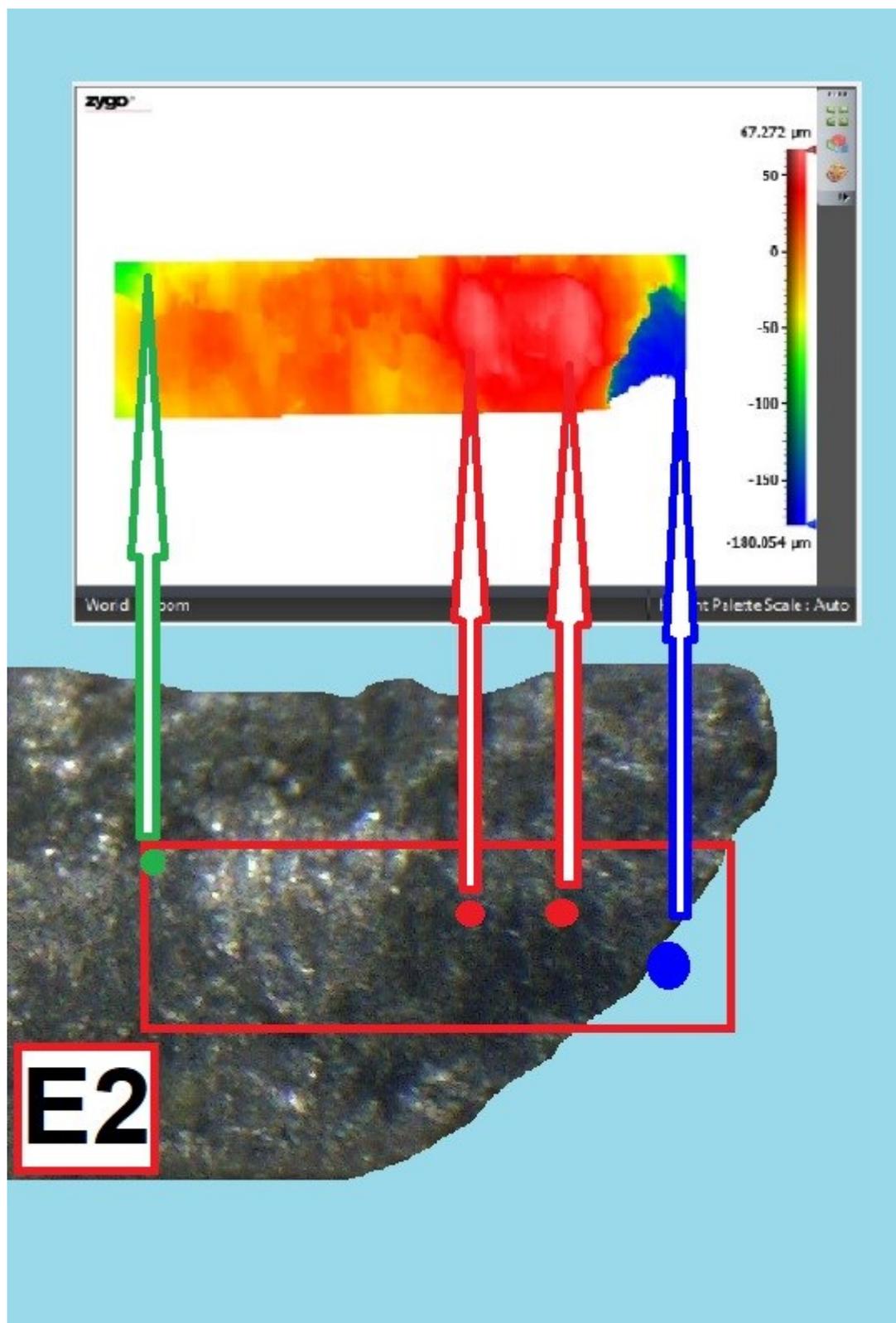
8.4.3 Vzorky dílu E

Měřené vzorky dílu byly totožně rozdělené na E2 „přední“ a E4 „zadní“. Zde došlo k využití vzorku E4 jako vzorku zadní části, protože na vzorku E3 nebyla vytvořena trhlina. Vzhled tohoto dílu a viditelná neporušenost dílu E je vidět na obrázku 27, kde je fotka dílu E použita pro identifikaci rozložení jednotlivých vzorků. Změna grafického zobrazení 3D pohledu ve výstupu softwaru Mx, provedena počátkem měření vzorků dílu D byla zachována i pro vzorky dílu E. V případě dílu E2 v místech inicializační části únavového lomu můžeme totožně jako u předchozích dílů A2 a D2 pozorovat malá příčné linie lomů, které jsou jasným indikátorem postupného šíření únavového lomu. Tyto příčné lomy jsou nejlépe vidět na 3D obrazu z profilometru Zygo na obrázku 44., zpracovaného pomocí softwaru Mx.



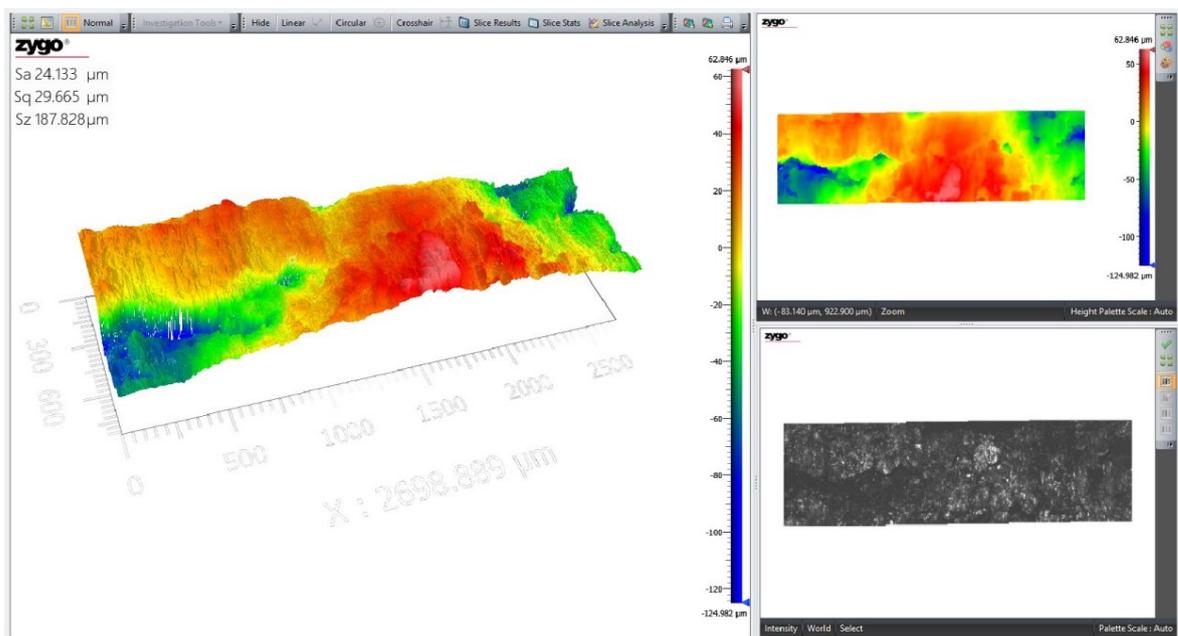
Obrázek 44. Výstup z profilometru Zygo pro díl E2.

Při pohledu na 2D náhled na čelo lomu je v pravém dolním rohu vidět významný pokles měřených bodů. Toto je dáno tím, že měřená oblast se nachází na samotném okraji dílu, proto tuto oblast nebudeme uvažovat pro další vyhodnocení. Zajímavé je v tomto případě výskyt maxim výšky profilu blízko u okraje dílu. To mohlo být dáno výraznou zatěžující silou, která vedla k výraznému poškození a iniciaci celé trhliny, která později rostla jako únavový lom, díky tomu je ostatní plocha (oranžová) relativně rovná s výskytem pouze menších příčných linií rostoucí únavové trhliny. Při přiřazení snímků profilometru ke snímkům pořízeným na mikroskopu (obrázek 45.) jsou odpovídající zóny opět přiřazeny barevnými šipkami.



Obrázek 45. Přiřazení oblasti zkoumané profilometrem Zygo ke snímkům vzorku E2 pořízených na mikroskopu. Za povšimnutí stojí dva vrcholky v těsné blízkosti okraje vzorku, který je označen modrou barvou.

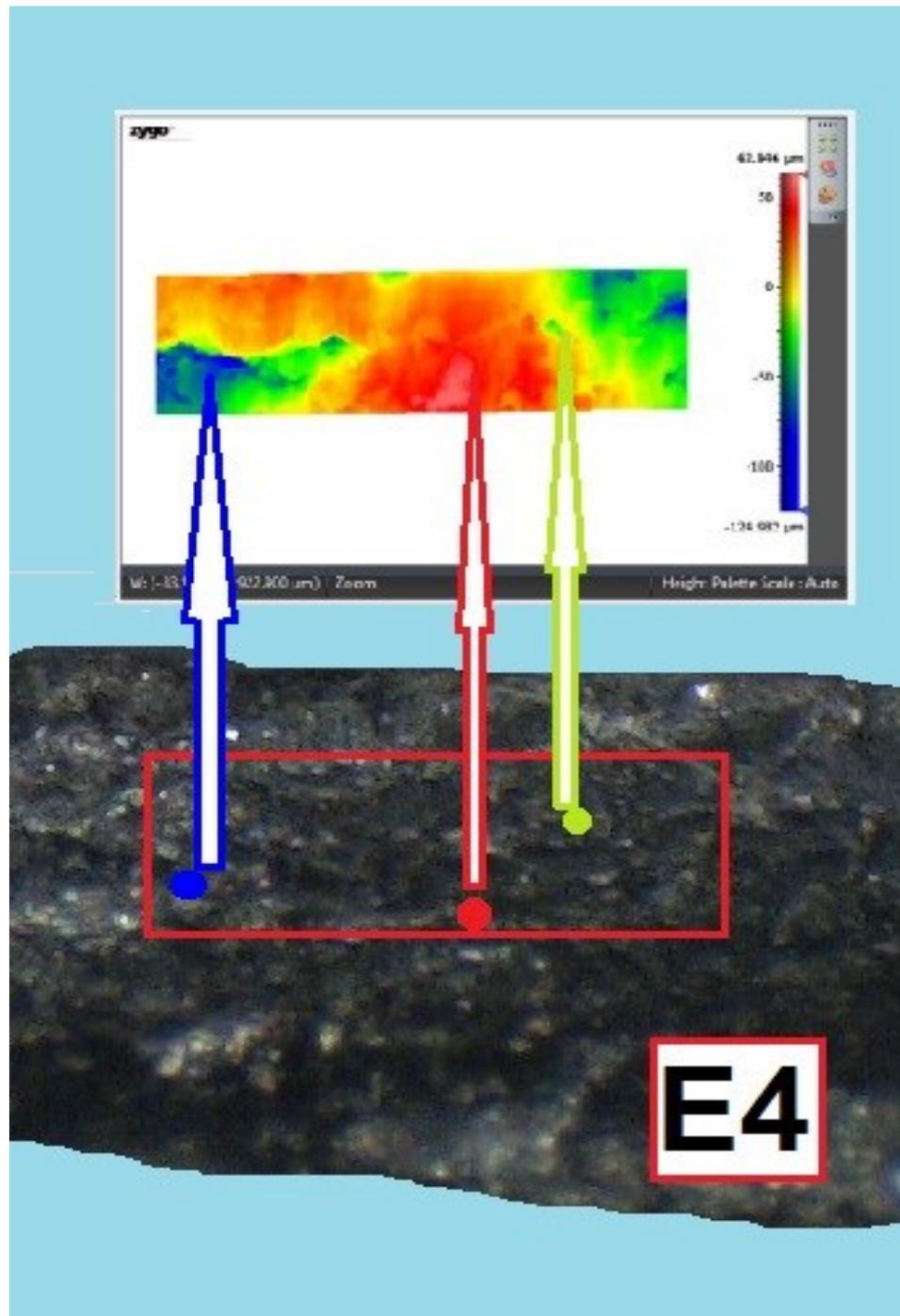
Vzorek E4 pochází ze stejného umístění, jako předchozí vzorky x3, přibližně 1,5mm od počátku lomu, v inicializační části únavového lomu na „zadní“ části dílu, ovšem z opačné strany vůči podélné ose. Příčinou této změny (E3-E4) použitého vzorku byla velmi raná fáze propagace únavového lomu na vzorku E3, kdy materiál byl pouze drobně deformován v oblasti ohybu. Ovšem ve výsledném vyhodnocení v softwaru Mx byl finální výstup otočen tak, aby byl orientován stejně jako zbytek vzorků x3 pro možnost jeho dalšího porovnávání bez nutnosti neustálého uvažování a obracení. Takto již otočený výstup softwaru Mx můžeme vidět na obrázku 46.



Obrázek 46. Výstup ze softwaru Mx po scanování povrchu vzorku E4 profilometrem Zygo.

Obraz je již otočený pro zachování orientace vzorku na snímku pro další vyhodnocení.

Stejně jako u ostatních dílů vyjmutých ze „zadní“ části dílu, i vzorek E4 jeví známky možného odtrhávání materiálu vlivem metalurgických nedokonalostí nebo vlivem extrémní zatěžující síly v kombinaci k příčnými liniemi po celé délce sledovaného profilu, což je typickým jevem při šíření únavového lomu. Na obrázku 47. je oblast zkoumaná profilometrem Zygo přiřazena ke snímkům pořízených na mikroskopu. Na tomto přiřazení je zelenou šipkou vyznačeno opět místo podezřelé na odtrhávání materiálu, červenou šipkou poté nejvyšší oblast celého profilu. V oblasti označené modrou čarou je vyznačena nejnižší oblast, kde vzniká hrana (žlutý obvod modré oblasti) oproti okolnímu materiálu. Je možné že celá tato modrá oblast byla odtržena stejnými vlivy jako menší zvýrazněně prohlubně.



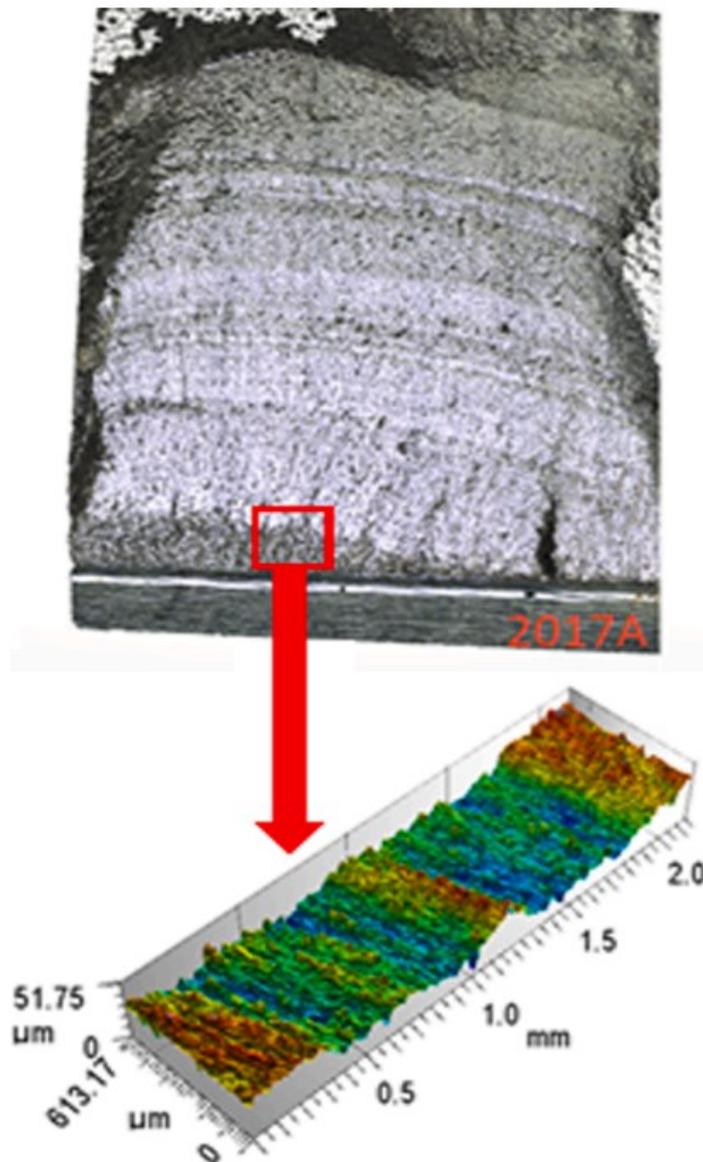
Obrázek 47. Přiřazení oblasti zkoumané profilometrem Zygo ke snímkům vzorku E4 pořízených na mikroskopu.

8.5 Vyhodnocení směru namáhání s využitím 3D povrchové topografie

Všechny zkoumané vzorky vykazují podobné deformace. V této části bude provedeno porovnání námi pořízených 3D povrchové topografie s výsledky a závěry odborných článků zkoumajících chování hliníkových slitin a vyhodnocování jejich lomových charakteristik za pomoci 3D povrchové topografie. Optickým srovnáním orientace prasklin a celkového smyslu deformace našich a odborných „referenčních“ snímků budeme určovat nejpravděpodobnější směry namáhání. Pro srovnávání byl určený článek „Fractal dimension for bending–torsion fatigue fracture characterisation. Measurement“ publikovaný v roce 2021. V tomto článku prováděl tým vedený Wojciechem Mackem povrchovou topografií na hliníkových vzorcích. Pro zkoumání vyřezali zkušební tělesa pro tahovou zkoušku, na které poté aplikovali různě veliké namáhající síly při různých frekvencích namáhání. Vzhledem k hodnocení tohoto zdroje budou výsledky jejich práce použity pro srovnání a hodnocení našich výsledků, převážně porovnávání snímků z povrchových profilometrů. Cílem tohoto srovnání je snaha určit a co nejlépe popsat charakteristiku namáhání námi zkoumaných vzorků.

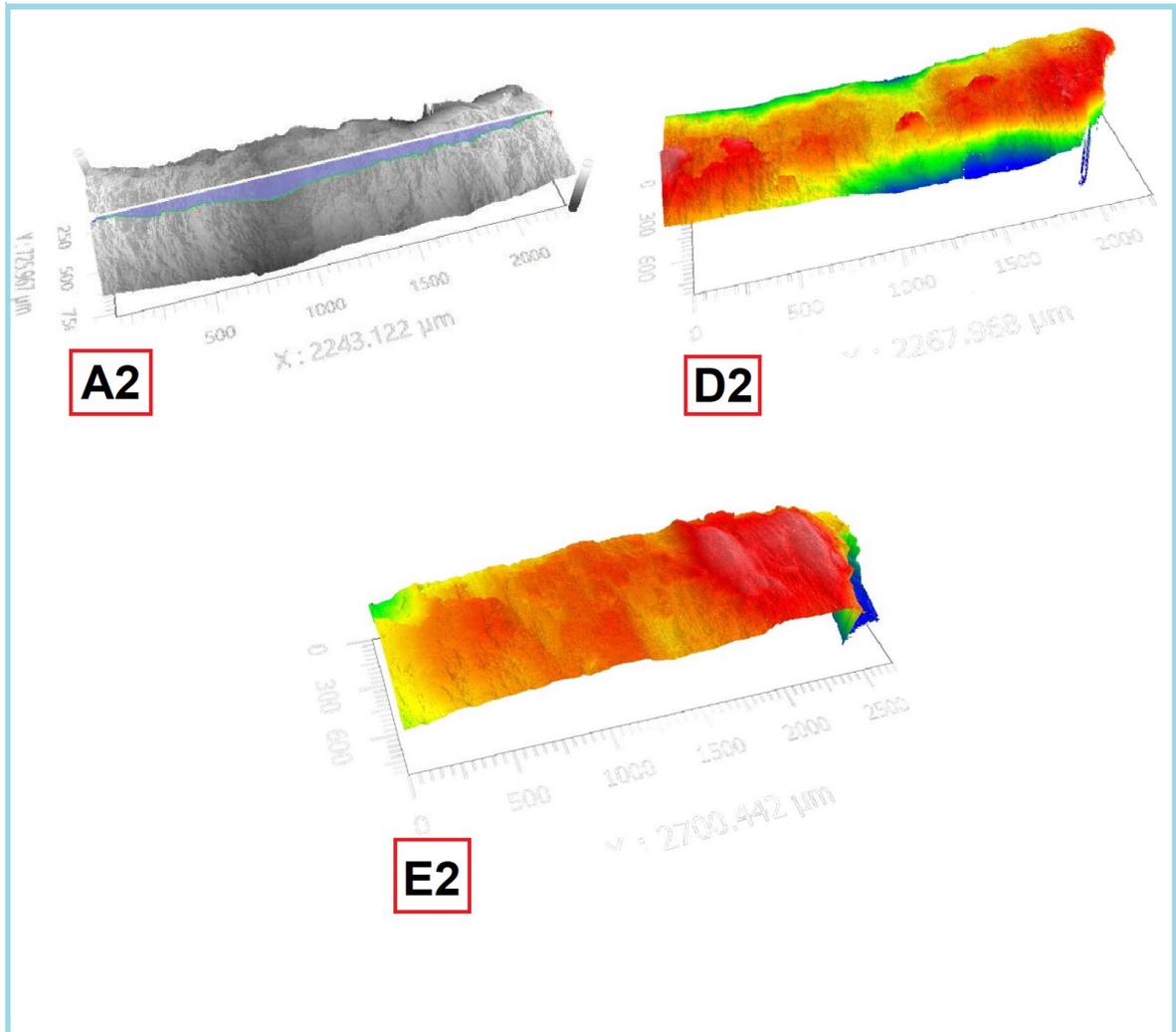
8.5.1 Porovnání s referenčním vzorkem

V této části budeme vycházet z článku „Fractal dimension for bending-torsion fatigue fracture characterisation“ publikovaným v roce 2021. Autorem díla je zde opět Wojciech Macek a zaměření článku je využití povrchového 3D profiloměru pro zkoumání vzorků, na kterých byly v laboratorních podmínkách vytvořeny únavové lomy zatěžováním zkušebního tělesa v ohybu. Tyto referenční vzorky jsou z hliníkové slitiny 2017-T4, která je vlastnostmi podobná námi zkoumaným vzorkům. Na obrázku 48. můžeme vidět snímek, kdy totožně jako v předchozí kapitole této práce je přiřazen 3D scan profilu ke snímkům mikroskopu, konkrétně v místech inicializační fáze trhliny. Rozměry referenční zkoumané plochy jsou totožné, přibližně 600x2000 μm , čímž máme totožně velké vzorky obdobného materiálu zkoumané stejnou metodou s pravděpodobně stejným zatížením. Toto vše dává ideální podklady pro porovnání námi zkoumaných vzorků se vzorky referenčními.



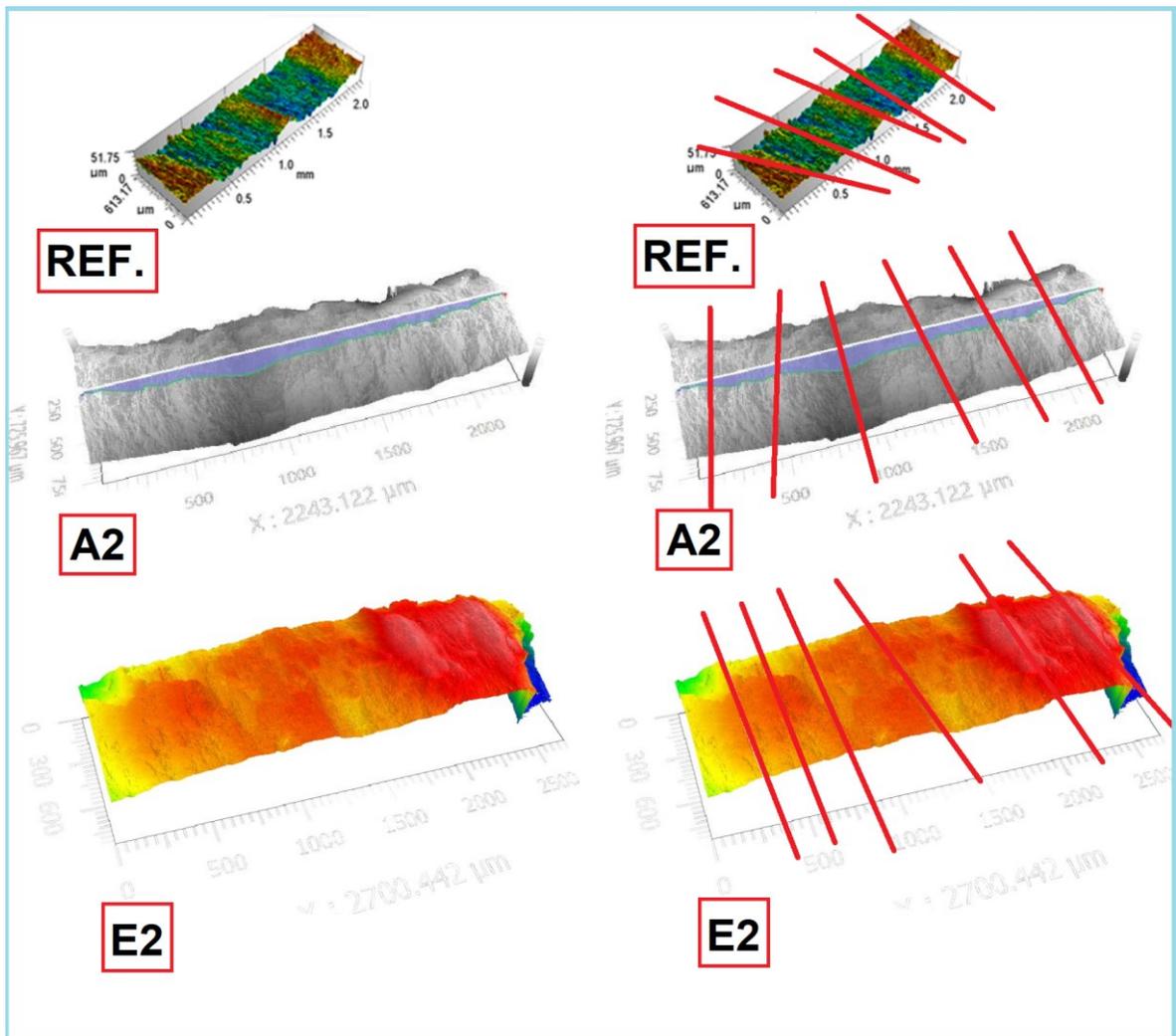
Obrázek 48. Přřazení snímku mikroskopu k snímku 3D profilometru. Rozměry zkoumané plochy: 600x2000 μm , materiál vzorku je hliníková slitina 2017-T4[30]

Naším vstupem do tohoto srovnání budou 3D snímky generované v softwaru Mx, který ovládá profilometr Zygo dostupný na FT UTB. Celé okno obsahující všechny výstupy nalezneme v předchozí kapitole jednotlivých námi zkoumaných vzorků. Barevné rozlišení 3D pohledů v případě jak našeho výstupu tak referenčního snímku na obrázku 48. bude celé srovnání velmi zjednodušovat. Pro srovnání těchto inicializačních fází únavových lomů vzniklých ohybem budou použity vzorky A2, D2 a E2, které vykazují podobnosti s referenčním obrazem. Všechny tyto 3D pohledy vedle sebe vidíme na obrázku 49.



Obrázek 49. 3D pohledy na námi zkoumané lomy pro srovnání s referenčním pohledem

Stejně jak bylo naznačeno na obrázku pořízeném na mikroskopu, i všechny vzorky „přední“ části dílu- A2, D2 i E2 vykazují na profilu příčné linie. Vzorek E2 například orientací dvou nejvyšších oblastí, které svojí orientací také tvoří tuto příčnou linii, ale i na zbytku tohoto povrchu je tento jev patrný. V případě vzorku A2 už tyto charakteristiky nejsou tak patrné, pravděpodobně vlivem počátečního nevyužití barevného rozlišení výšky profilu, ovšem i tady lze tento jev spatřit. V případě vzorku D2 už tento jev na první pohled vidět není, ale například orientace nejnižší oblasti uprostřed snímaného profilu také může naznačovat tento jev. Na obrázku 50. vidíme přímé grafické srovnání referenčního vzorku zahraniční studie s námi pořízeným 3D scany vzorku E2 a A2, kde je tento jev příčných linií na lomu zvýrazněn.



Obrázek 50. Nalezení příčných linií tvořených únavovými lomy. Tyto linie jsou zvýrazněné červenou čarou na kopii obrazů vpravo. Vzorek REF. je referenční hodnota pro srovnání převzatá ze zahraničního článku. [30]

Na tomto srovnání a zvýraznění příčných linií shodných s referenčním vzorkem, který vykazuje totožný jev můžeme založit tvrzení, že vzorky A2 a E2 byly zatěžovány silou působící ve stejném smyslu nebo kombinací zatěžujících sil, kdy jedna složka zatížení byla ohybová. Obecně větší drsnost povrchu lze připsat možným větším silám, ke kterým docházelo vlivem tvrdších přistání, viz rozbor vzorku E2, a také ne zcela shodným materiálem. Můžeme však již s jistotou tvrdit, že vzorky „přední“ části dílu jsou deformovány únavovými lomy, což je cílem této práce.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo určení příčiny poškození leteckého dílu, který je součástí podvozku sportovního letounu. Prvním úkolem bylo odhalit jevy, které mohou podobné poškození způsobovat. Na základě dat z provozu bylo jako pravděpodobná příčina označeno extrémní kmitání podvozku v kombinaci s tvrdším přistáním. Vzhledem k určení kmitání, cyklického působícího namáhání, bylo pro další zkoumání samotných lomů předpokládáno, že se jedná o únavové lomy. Tyto lomy byly podrobeny kontrole za využití mikroskopu pro přiblížení vzhledu a hledání jevů spojených se šířením únavových lomů. Dále bylo využito bezkontaktního profilometru, který dokáže zpracovat topografický pohled na zkoumaný lom. Tyto 3D topografické pohledy na daný lom byly poté porovnány se závěry odborných studií, které stejnou metodou zkoumaly podobný materiál.

Na snímcích mikroskopických i ze 3D profilometru byly prokázány jevy charakteristické pro šíření únavového lomu, jejichž pravděpodobnou příčinou je kmitání přední podvozkové nohy. Z online bulletinu vydané výrobcem letounu je patrné, že výrobce letounu si je této problematiky vědom a vydal doporučení pro opatrné provádění přistávacího manévru.[33]

Navíc bylo při sériové výrobě tohoto typu změněn systém tlumení kmitů přední podvozkové nohy z pasivních polymerních kousků na olejový tlumič, což naznačuje snahu výrobce minimalizovat kmitání. Z námi provedených měření a následných výsledků je však patrné, že kmitání povozku stále nebylo zcela odstraněno a předmětný díl není dimenzován na takové zatížení. Případné řešení této situace by ze strany výrobce vyžadovalo minimálně jeden z následujících kroků – změnu servisních postupů a frekvenci prohlídek, změnu konstrukce nebo materiálu zkoumaného dílu anebo konstrukční úpravy celého letounu pro snížení výskytu tohoto kmitání.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] RAHMANI, Mohsen a Kamran BEHDINAN, 2019. On the effectiveness of shimmy dampers in stabilizing nose landing gears. *Aerospace Science and Technology*. Elsevier. ISSN 1270-9638. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.05.040>
- [2] ABLOG, Daniel et al., 2014. Optimization of Landing Gear Fairings: Final Report. Washington. University of Washington.
- [3] PILOT'S OPERATING HANDBOOK AND EASA APPROVED AIRPLANE FLIGHT MANUAL for the Cirrus SR22: Airplanes Registered in Europe, 2013. Minnesota.
- [4] FINGER, Felix, Carsten BRAUN a Cees BIL, 2018. Case Studies in Initial Sizing for Hybrid-Electric General Aviation Aircraft. Ohio. RMIT University.
- [5] PIPPAN, R. a A. HOHENWARTER, 2017. Fatigue crack closure: a review of the physical phenomena [online]. 40(4), 471-495 [cit. 2022-05-10]. ISSN 8756758X. Dostupné z: doi:10.1111/ffe.12578
- [6] SANGID, Michael D., 2013. The physics of fatigue crack initiation. *International Journal of Fatigue* [online]. Elsevier, 57, 58-72 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.10.009>
- [7] FANG, Zhenlan et al., 2015. Defect-Engineered Metal-Organic Frameworks. *Angewandte Chemie International Edition*. 54(25), 7234-7254. ISSN 14337851. Dostupné z: doi:10.1002/anie.201411540
- [8] BATHIAS, Claude a André PINEAU, 2010. *Fatigue of Materials and Structures: Fundamentals*. New Jersey: Wiley. ISBN 978-1-84821-051-6.
- [9] SARAÇYAKUPOĞLU, Tamer. Fatigue Studies in Aviation in Light of the 1988 Aloha Airlines Incident. GELIŞİM UNIVERSITY. Diğer Atıf Dizinlerdeki Yayınlar [online]. [cit. 2022-05-10]. <https://hdl.handle.net/11363/2452>.
- [10] RICHARD, Hans a Manuela SANDER, 2012. *Fatigue Crack Growth*. Volume 227. Švýcarsko: Springer Nature. *Solid Mechanics and Its Applications*. ISBN 978-3-319-32532-3.
- [11] YASBOLAGHI, R. a A.R. KHOEI, 2020. Micro-structural aspects of fatigue crack propagation in atomistic-scale via the molecular dynamics analysis. *Engineering Fracture Mechanics*. Elsevier, 226, 1-11. ISSN 0013-7944. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106848>

- [12] LITTLE, Robert E., 2019. Fatigue Consideration in Machine Design – Essentials of Endurance Analyses, DEStech Publications, ISBN 978-1-60595-605-3
- [13] EZRIN, Myer, 2013. Plastics Failure Guide: Cause and Prevention. 2nd Edition. Mnichov: Hanser Publishers. ISBN 978-1-56990-449-7.
- [14] CAMPBELL, F.C., 2012. FATIGUE AND FRACTURE: Understanding the Basics. Ohio: ASM international. ISBN 978-1-61503-976-0.
- [15] EL KHOUKHI, Driss et al., 2019. Experimental investigation of the size effect in high cycle fatigue: Role of the defect population in cast aluminium alloys. International Journal of Fatigue [online]. 129 [cit. 2022-05-10]. ISSN 01421123. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijfatigue.2019.105222
- [16] U. S. Department of Transportation, Flight Standards Service. 2012, Aviation Maintenance Technician Handbook – Powerplant, Volume 1, Washington, FAA-H-8083-32
- [17] KROES, Michael J., 2013. Aircraft Maintenance and Repair. Seventh Edition. USA: e McGraw-Hill Education. ISBN 978-0-07-180151-5.
- [18] U. S. Department of Transportation, Flight Standards Service. 2012, Aviation Maintenance Technician Handbook – Airframe, Volume 2, Washington, FAA-H-8083-31
- [19] MA, Wenyu et al., 2015. Influence of solution heat treatment on mechanical response and fracture behaviour of aluminium alloy sheets: An experimental study [online]. 88, 1119-1126 [cit. 2022-05-10]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2015.09.044
- [20] KUTZ, Myer, 2015. Mechanical Engineers' Handbook: Materials and Engineering Mechanics. Fourth Edition. New Jersey: Wiley. ISBN N 978-1-118-90748-1.
- [21] MACEK, Wojciech et al., 2021. Strain sequence effect on fatigue life and fracture surface topography of 7075-T651 aluminium alloy. Mechanics of Materials [online]. 160 [cit. 2022-05-10]. ISSN 01676636. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechmat.2021.103972
- [22] WHITEHOUSE, D. J. Handbook of surface and nanometrology. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2011. ISBN 978-1-4200-8201-2
- [23] ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 1999

- [24] ČSN EN ISO 25178-601. Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 601: Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů. Praha: Český normalizační institut, 2011
- [25] ChemPoint [online]. c 2014 [cit. 2014-02-03]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/konfokalni-laserova-rastrovaci-mikroskopie-clsm>
- [26] WANG, Yunzhi et al., 2017. Review of surface profile measurement techniques based on optical interferometry. Optics and Lasers in Engineering [online]. 93, 164-170 [cit. 2022-05-10]. ISSN 01438166. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlaseng.2017.02.004
- [27] KRUPP, Ulrich, 2007. Fatigue Crack Propagation in Metals and Alloys: Microstructural Aspects and Modelling Concepts. Germany: Wiley. ISBN 978-3-527-31537-6.
- [28] GOLDSMITH, N.T., R.J.H. WANHILL a L. MOLENT, 2019. Quantitative fractography of fatigue and an illustrative case study. Engineering Failure Analysis [online]. 96, 426-435 [cit. 2022-05-10]. ISSN 13506307. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfailanal.2018.10.013
- [29] GONZÁLEZ-VELÁZQUEZ, Jorge, 2018. Structural Integrity: Fractography and Failure Analysis. Volume 3. Mexico: Springer. ISBN 978-3-319-76650-8.
- [30] MACEK, Wojciech et al., 2021. Fractal dimension for bending–torsion fatigue fracture characterisation. Measurement [online]. 184 [cit. 2022-05-10]. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2021.109910
- [31] SR22/SR22T Illustrated Parts Catalog 13774-001, Rev. C3, Cirrus aircraft, 2018
- [32] HATIRAS, Spiridon, 2021. Landing Clip. In: Vimeo [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://vimeo.com/644203348>
- [33], Service Advisory SA19-02: Nose Landing Gear Shimmy Notification and Reduction, Cirrus aircraft, 2020
- [34] BHAUMIK, S.K., M. SUJATA a M.A. VENKATASWAMY, 2008. Fatigue failure of aircraft components. Engineering Failure Analysis [online]. 15(6), 675-694 [cit. 2022-05-10]. ISSN 13506307. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfailanal.2007.10.001
- [35] FELDBUSCH, A., H. SADEGH-AZAR a P. AGNE, 2017. Vibration analysis using mobile devices (smartphones or tablets). Procedia Engineering [online]. 199, 2790-2795 [cit. 2022-05-11]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2017.09.543

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|----------------|--------------------------------------------------------------|
| 3D | Třírozměrný prostor |
| N_i | počet cyklů k inicializaci trhliny |
| N_p | počet cyklů k šíření trhliny |
| N_t | počet cyklů k selhání dílu |
| N_F | počet cyklů vedoucí k únavě materiálu |
| $\Delta\delta$ | rozdíl napětí |
| ε | relativní prodloužení |
| σ_y | tahová složka tenzoru napětí |
| τ_{xy} | smyková složka tenzoru napětí |
| τ_{yz} | smyková složka tenzoru napětí |
| a_p | maximální povolená délka trhliny |
| H | životnost dílu |
| a_0 | interval, kdy nelze trhlínu odhalit |
| t_1 | počátek inspekčních cyklů |
| t_2 | konec inspekčních cyklů |
| γ | úhel kuželovitosti hrotu |
| r_{tip} | rádius špičky hrotu |
| LSCM | laserový konfokální mikroskop |
| MEMS | mikroelektromechanický akcelerometr |
| g | gravitační zrychlení |
| Sa | Aritmetický průměr posuzovaného povrchu |
| Sq | Kvadratický průměr posuzovaného topografického povrchu |
| Sz | Maximální výška topografického povrchu na definované oblasti |
| 2D | Dvourozměrný prostor |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 1. Ilustrace možností uspořádání letadlového podvozku. a) Podvozek s předovým kolem, b) podvozek s ostruhovým kolem, c) tandemový podvozek. [2]..... | 13 |
| Obrázek 2. Aerodynamický kryt kola na letounu Cessna 150 [2] | 13 |
| Obrázek 3. Aerodynamické srovnání profilu pneumatiky a krytu kola přistávacího podvozku [2]..... | 14 |
| Obrázek 4. Boeing 737 Společnosti Aloha Airlines po nouzovém přistání 28. dubna 1988. Rozsah poškození způsobený únavou materiálu spojovacích nýtů je evidentní [8]..... | 18 |
| Obrázek 5. Wöhlerova křivka ukazující počet cyklů potřebných pro iniciaci trhliny, šíření trhliny a celková únavová životnost jako funkce aplikované amplitudy napětí. [6] | 19 |
| Obrázek 6. Graf znázorňující procento životnosti dílu potřebné k vytvoření iniciační fáze trhliny jako funkci napětí ($\Delta\delta$) a celkový počet cyklů potřebných k selhání (N_F). [8]..... | 20 |
| Obrázek 7. Vizualizace šíření lomu v I. a II. stádiu, zleva povrch vzorku a patrná velká zrna v oblasti povrchu. [8]..... | 23 |
| Obrázek 8. Znázornění Wöhlerova diagramu podle nominálního napětí [8] | 24 |
| Obrázek 9. Zatěžovací módy tělesa s trhlinou, a - tahový, b - smykový, c – stříhový [12] | 25 |
| Obrázek 10. Diagram provedení periodických kontrol vzhledem k šíření únavové trhliny, a_i - iniciační trhlina, a_0 – délka po kterou nelze trhlina detekovat, a_p – maximální povolená délka trhliny [14]..... | 26 |
| Obrázek 11. Znázornění minimálních vlivů rozdílu v mikrostruktuře a tepelného zpracování jednotlivých slitin třídy 2xxx a 7xxx na rychlost šíření únavového lomu. [14]..... | 31 |
| Obrázek 12. Různé umístění referenční roviny pro získání profilu povrchu. a) Rovina normálová k povrchu, b) Rovina vložena pod úhlem, c) rovina rovnoběžná s povrchem. [22] | 32 |
| Obrázek 13. Obecný profil povrchu. [23]..... | 33 |
| Obrázek 14. Tvar povrchu [22]..... | 34 |
| Obrázek 15 . Vlnitost povrchu. [22] | 34 |
| Obrázek 16. Drsnost povrchu. [22]..... | 34 |
| Obrázek 17. Geometrie snímacího hrotu. [23] | 35 |
| Obrázek 18. Odchylna kontaktního metody měření zapříčiněná zaoblením snímacího hrotu. [24]..... | 36 |
| Obrázek 19. Schéma konfokální optiky. [25] | 36 |
| Obrázek 20. Srovnání fraktografického pohledu na lom. Vlevo makroskopické pozorování lomu, vpravo mikroskopické zkoumání špičky trhliny. [29]..... | 39 |
| Obrázek 21. Rozdíly v optické podobě únavových lomů. a) ocel 10HNAP, b) Hliníková slitina 2017-T4 [30] | 39 |
| Obrázek 22. Výňatek z katalogu součástek předové podvozkové nohy letounu Cirrus SR22, zvýrazněn zkoumaný díl č. 313 PANT BRACKET [31]..... | 42 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 23. Sestava předového podvozku letounu Cirrus SR22 se zvýrazněným dílem č.313 PANT BRACKET. [31]..... | 43 |
| Obrázek 24. Ukázka z videa chování předového podvozku při přistání s jasně patrnou výchylkou vlečeného kola. 1 – Moment těsně před dotykem, klidový stav, 2 – moment doteku kola s povrchem, okamžitá maximální výchylka vlečeného kola, 3 – Kmit na opačnou stranu do maximální výchylky, 4 – Výsledné ustálení podvozku [32]..... | 45 |
| Obrázek 25. Výňatek z anglického originálu bulletinu SA19-02 popisující doporučené postupy pro minimalizování výskytu vibrování (shimmy) předového podvozku (NLG). [33] | 46 |
| Obrázek 26. Detail zkoumaného dílu. Na fotografii jsou jasně patrné lomy na částech soustředujících napětí – rádiusy. | 47 |
| Obrázek 27. Detail dílu E po rozřezání včetně kompletního pracovního označení všech vzorků | 48 |
| Obrázek 28. Náhled celých lomových linií dílu A. Celé linie vznikly ručním seskládáním jednotlivých snímků z mikroskopu vedle sebe. | 49 |
| Obrázek 29. Odhalení únavových trhlin. Nahoře originální pohled. Dole kopie se zvýrazněnými místy trhlin (červená čára). Tento „žebřík“ zvýrazňuje pozvolnou propagaci lomu. | 50 |
| Obrázek 30. Porovnání vzhledu lomu pro určení, zda jde o únavový lom. a) Námí zkoumaný díl B2 obsahující obě fáze únavového lomu, b) Porovnávaný obrázek z výzkumu únavových lomů v Indii, 2007 [34] | 51 |
| Obrázek 31. Pracovní stanice profiloměru Zygo NewView 9000 v laboratořích UTB | 53 |
| Obrázek 32. Náhled softwaru Mx ovládající profiloměr Zygo včetně námi použitých hodnot pro dané měření. | 54 |
| Obrázek 33. Příklad volby vzorků pro měření na bezkontaktním profilometru Zygo. Zvýrazněné díly reprezentují „přední“ a „zadní“ typ vzorku podle jejich umístění na díle. Na díle je naznačena tato orientace šipkou směrem dopředu..... | 55 |
| Obrázek 34. Náhled uložení vzorku pod snímací optiku bezkontaktního profilometru Zygo. | 55 |
| Obrázek 35. Výstup ze softwaru Mx po scanování povrchu vzorku A2 profilometrem Zygo. | 56 |
| Obrázek 36. Přiřazení oblasti zkoumané profilometrem Zygo ke snímkům vzorku A2 pořízených na mikroskopu. Ve spodní části obrázku je vložena křivka popisující profil povrchu. Minimální a maximální hodnoty jsou zvýrazněné šipkami. | 57 |
| Obrázek 37. Detail příčiny zkreslení výsledků měření vzorku A3. Pravděpodobně odtržený kus materiálu v průběhu lámání zapříčinil nedokonalé zaostření snímací optiky profilometru Zygo. | 58 |
| Obrázek 38. Výstup z měření vzorku A3. Jasné zkreslení výsledků zapříčiněné odtržením materiálu ve zkoumané oblasti a následné rozostření snímací optiky profilometru Zygo. . | 59 |
| Obrázek 39. Přiřazení oblasti zkoumané profilometrem Zygo ke snímkům vzorku A3 pořízených na mikroskopu. Ve spodní části obrázku je vložena křivka popisující profil povrchu. Minimální a maximální hodnoty jsou zvýrazněné šipkami. | 60 |

- Obrázek 40. Výstup z profilometru Zygo pro díl D2. Od dílu D2 došlo k úpravě zobrazení, kdy i pro 3D pohled bylo nastaveno barevné rozlišení podávající jasnější přehled o výšce profilu povrchu. 61
- Obrázek 41. Přiřazení oblasti zkoumané profilometrem Zygo ke snímkům vzorku D2 pořízených na mikroskopu. Počínaje měřením vzorku D2 došlo k úpravě výstupu, kdy graf popisující křivku povrchu nebyl generován a jako hlavní ukazatel drsnosti povrchu zde slouží barevně označené zobrazení ve 2D a 3D rozměrech..... 62
- Obrázek 42. Výstup ze softwaru Mx po scanování povrchu vzorku D3 profilometrem Zygo. 63
- Obrázek 43. Přiřazení oblasti zkoumané profilometrem Zygo ke snímkům vzorku D3 pořízených na mikroskopu. Zelenou šipkou zvýrazněno místo pravděpodobného odtržení materiálu. 64
- Obrázek 44. Výstup z profilometru Zygo pro díl E2. 65
- Obrázek 45. Přiřazení oblasti zkoumané profilometrem Zygo ke snímkům vzorku E2 pořízených na mikroskopu. Za povšimnutí stojí dva vrcholky v těsné blízkosti okraje vzorku, který je označen modrou barvou..... 66
- Obrázek 46. Výstup ze softwaru Mx po scanování povrchu vzorku E4 profilometrem Zygo. Obraz je již otočený pro zachování orientace vzorku na snímku pro další vyhodnocení.... 67
- Obrázek 47. Přiřazení oblasti zkoumané profilometrem Zygo ke snímkům vzorku E4 pořízených na mikroskopu..... 68
- Obrázek 48. Přiřazení snímku mikroskopu k snímku 3D profilometru. Rozměry zkoumané plochy: 600x2000 μm , materiál vzorku je hliníková slitina 2017-T4[30]..... 70
- Obrázek 49. 3D pohledy na námi zkoumané lomy pro srovnání s referenčním pohledem. 71
- Obrázek 50. Nalezení příčných linií tvořených únavovými lomy. Tyto linie jsou zvýrazněné červenou čarou na kopii obrazů vpravo. Vzorek REF. je referenční hodnota pro srovnání převzatá ze zahraničního článku. [30] 72

SEZNAM TABULEK

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 1. Přehled základních parametrů letounu Cirrus SR22. [3]..... | 15 |
| Tabulka 2. Životní cyklus dílu vyjádřený v letových hodinách letounu | 48 |
| Tabulka 3. Hodnoty nastavení profilometru Zygo NewView 9000 | 53 |