

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 385

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Karel Slámečka

**Kvantitativní fraktografie
biaxiálních únavových lomů**

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav fyzikálního inženýrství

Ing. Karel Slámečka

Kvantitativní fraktografie biaxiálních únavových lomů

Quantitative fractography of biaxial fatigue fracture surfaces

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Studijní obor: Fyzikální a materiálové inženýrství
Školitel: prof. RNDr. Jaroslav Pokluda, CSc.
Oponenti: doc. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
doc. Ing. Hynek Lauschmann, CSc.
RNDr. Karel Obrtlík, CSc.

Datum obhajoby: 30. 6. 2006

Klíčová slova:

Biaxiální únava materiálů, Kvantitativní fraktografie

Keywords:

Biaxial fatigue, Quantitative fractography

Dizertační práce je uložena na oddělení vědy a výzkumu FSI VUT v Brně,
Technická 2, 616 69 Brno.

© Karel Slámečka 2006

ISBN 80-214-3227-6

ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD	5
2 VÍCEOSÁ ÚNAVA MATERIÁLŮ	6
3 3D REKONSTRUKCE LOMOVÝCH POVRCHŮ	7
3.1 Stereofotogrammetrie	7
3.2 Optické rastrovací zařízení <i>MicroProf 100</i>	7
4 KVANTITATIVNÍ FRAKTOGRAFIE	8
4.1 Výškové parametry	8
4.2 Délkové parametry	9
4.3 Spektrální parametry	9
4.4 Fraktální parametry	10
4.5 Smíšené parametry	11
4.6 Souvislost parametrů drsnosti s parametry lomového procesu . .	11
5 METODIKA MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT	11
5.1 Zkušební tělesa a způsob jejich zatěžování	11
5.2 Realizovaná stereofotogrammetrická měření	12
6 VÝSLEDKY FRAKTOGRAFICKÉ ANALÝZY	13
6.1 Makromorfologická studie	13
6.2 Analýza prostorového vývoje lomového reliéfu	14
6.3 Studie povrchového reliéfu příslušejícího rané fázi šíření trhliny .	17
6.4 Komplementární analýza	20
6.5 Studie lomových fazet vzniklých při zatěžování prostým krutem	21
6.6 Srovnání stereofotogrammetrie a optické měřicí metody	22
7 ZÁVĚR	23
Literatura	25
Vlastní práce autora	26
Autorovo Curriculum Vitae	28
Abstract	29

1 ÚVOD

Únava materiálů představuje nejběžnější příčinu porušení široké škály strojních komponent i rozsáhlých inženýrských struktur a je systematicky zkoumána po teoretické i experimentální stránce již více než jedno století. V posledních dvou desetiletích se dostává intenzivní pozornosti zejména tzv. víceosé únavě, tedy únavovým lomům nastávajícím při zatěžování těles v podmínkách víceosé napjatosti. S přihlédnutím k technickému významu rotačních strojních součástí je důležitou subdisciplínou biaxiální únava při namáhání kombinací ohybu a krutu, případně jednoosého tahu a krutu.

Experimentální studie únavového chování obvykle spočívají v definovaném zatěžování zkušebních těles do okamžiku jejich porušení. Důležitou charakteristikou sloužící jako podklad konstruktérských návrhů je závislost celkové únavové životnosti na způsobu a rozsahu aplikovaného namáhání. Efektivní optimalizace materiálových vlastností na teoretické úrovni je ovšem v první řadě podmíněna detailním chápáním fyzikální podstaty lomového procesu. Významným zdrojem informací o tomto procesu je vlastní lomová plocha, na kterou lze pohlížet jako na podrobný záznam vzniklý v důsledku interakce šířící se trhliny, materiálu a vnějšího prostředí.

Kvantitativní fraktografie je disciplína, která se zabývá analýzou lomových povrchů. Současný rozsah vědomostí umožňuje v některých jednodušších případech poměrně spolehlivě odhadnout působící zátěžné spektrum, jakož i provést přibližnou rekonstrukci časového průběhu únavového procesu. Přes tyto dílčí úspěchy je však řada problémů stále nevyřešena. Vysoká variabilita a značná složitost povrchové topografie lomů vedly k vývoji řady popisných koncepcí, které se liší rozsahem i povahou kvantifikujících parametrů. Kritickým problémem zůstává zásadní nedostatek experimentálních dat. Publikované studie jsou navíc obvykle omezeny na jednoosou únavu a analýza lomového reliéfu povrchů vzniklých při víceosém únavovém zatěžování není běžná.

Předložená práce vznikla za účelem detailní kvantitativně-fraktografické analýzy topografie lomových povrchů vzniklých při experimentálním únavovém zatěžování zkušebních těles symetrickým ohybem, symetrickým krutem a jejich soufázovou synchronní kombinací na rozhraní mezi nízkocyklovým a vysokocyklovým režimem. Tělesa byla vyrobena z vysocepevné nízkolegované oceli ČSN 41 5340. Tematicky práce zapadá do rámce výzkumu biaxiální únavy, která je na Ústavu fyzikálního inženýrství (ÚFI) FSI VUT v Brně předmětem zájmu od roku 2000. V nedávné době byla na ÚFI započata obdobná měření povrchů zkušebních těles porušených ve vysokocyklové oblasti a rovněž na tělesech opatřených nitridační vrstvou.

Cílem práce je zejména posoudit vztah mezi způsobem experimentálního zatěžování a výsledným lomovým reliéfem. Vzhledem k absenci účinné, úsporné a jednotné metodiky kvantitativního popisu komplexních povrchů lomů, jaké jsou běžné například právě při biaxiální únavě, je jedním z cílů také zhodnotit popisný potenciál vybraných topografických parametrů. V práci je rovněž provedeno základní srovnání dvou měřících metod.

2 VÍCEOSÁ ÚNAVA MATERIÁLŮ

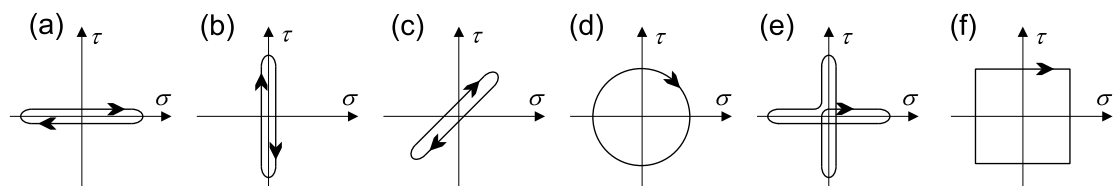
Pod pojmem víceosá únava materiálů rozumíme etapový kumulativní degrační proces vzniku a šíření trhlin v důsledku zatěžování cyklického charakteru při namáhání těles v podmínkách víceosé napjatosti [1]. Přestože v celosvětovém měřítku je tato problematika systematicky řešena již více než 20 let, v České republice a na Slovensku byl výzkum donedávna zaměřen převážně na únavu jednoosou, která je po experimentální i teoretické stránce méně náročná [2]. Pravděpodobně první rešeršní práce zde byla publikována teprve v roce 1999 ve formě výzkumné zprávy [3]. Při experimentálním výzkumu je nejčastěji aplikováno zatěžování s časově sinusovým průběhem zátěžných sil. V obecném případě pro všechny nenulové složky tenzoru napětí platí vztah

$$\sigma_{ij}(t) = \sigma_{ijm} + \sigma_{ija} \sin(\omega_{ij}t - \varphi_{ij}), \quad i, j = x, y, z, \quad (1)$$

kde σ_{ijm} je střední napětí, σ_{ija} je amplituda napětí, ω_{ij} je úhlová rychlost a φ_{ij} je počáteční fáze příslušné složky.

V technické praxi se vyskytuje řada komponent provozně namáhaných kombinací ohybu a krutu, popřípadě jednoosého tahu a krutu. Jedná se především o rotační strojní součásti jako jsou hřídele, ozubená kola, ojnice apod. V mnoha případech působí obě zatížení se stejnou úhlovou rychlostí, tj. komponenta je zatěžována synchronně.

Běžná experimentální zařízení umožňují zatěžování v soufázovém i nesoufázovém režimu s řízenou amplitudou napětí nebo s řízenou amplitudou plastické, případně celkové deformace. Experimenty jsou obvykle prováděny na válcových zkušebních tělesech, vzhledem k napěťovým gradientům v průřezu jsou však často užívány také tenkostěnné trubky. Nejběžnější zatěžovací režimy jsou znázorněny na obr. 1 ve formě zatěžovacích trajektorií. V elementárních případech zatěžování prostým ohybem, prostým krutem a v případě zatížení soufázového (obr. 1a-c) jsou směry hlavních napětí časově neměnné a poměr ohybového a krutového napětí je konstantní podél celé zatěžovací trajektorie ($\sigma/\tau = \text{konst.}$). Při nesoufázovém zatěžování je konstantní pouze poměr amplitud obou napětí ($\sigma_a/\tau_a = \text{konst.}$) a směry hlavních napětí v čase rotují, nebo se s časem mění skokově (obr. 1d-f).



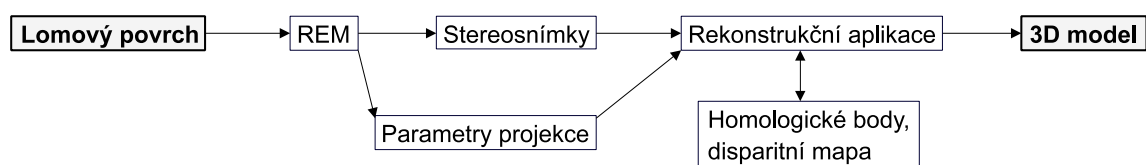
Obrázek 1: Typické zatěžovací trajektorie při experimentálním výzkumu synchronní kombinace ohybu a krutu: (a) prostý ohyb, (b) prostý krut, (c) soufázové zatěžování ($\varphi_\sigma = \varphi_\tau$), (d) nesoufázová kombinace ($|\varphi_\sigma - \varphi_\tau| = 90^\circ$), (e) střídavé zatěžování, (f) zatěžování typu čtverec.

3 3D REKONSTRUKCE LOMOVÝCH POVRCHŮ

3.1 Stereofotogrammetrie

Stereofotogrammetrie je metoda založená na stereoskopických výpočtech výškových souřadnic bodů studovaného povrchu nalezených výchozím dvoudimenzionálním vzorkováním dvojice jeho obrazů [4]. Vstupní informací prostorové rekonstrukce jsou dva snímky zkoumané oblasti pořízené ze dvou různých známých pozic, tzv. stereopár, a geometrické parametry projekce použité při jejich snímání. Záznam stereosnímků je většinou proveden pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu při různém náklonu eucenricky upnutých vzorků.

Numerické zpracování stereosnímků sestává ze dvou fází. V první z nich dochází k lokalizaci tzv. homologických bodů, tj. bodů reprezentujících v obou stereosnímčích tentýž reálný povrchový element, ve druhé fázi jsou pak pomocí stereologických relací vypočteny jejich relativní výškové souřadnice. Postup celé procedury je schematicky zachycen na obr. 2.

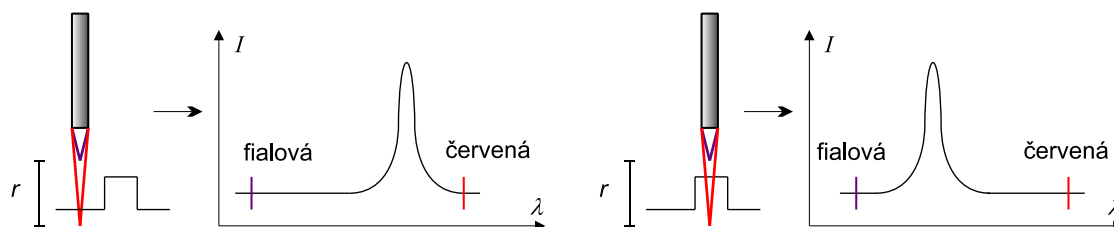


Obrázek 2: Postup při stereofotogrammetrické rekonstrukci lomového povrchu.

3.2 Optické rastrovací zařízení *MicroProf 100*

Barevnou vadou čoček a optických soustav rozumíme závislost jejich ohniskové vzdálenosti na vlnové délce světla. Při průchodu bílého světla přes soustavu, která nemá barevnou vadu korigovanou, dochází k jeho rozkladu na jednotlivé vlnové délky. Po dopadu takto vzniklého svazku na zkoumaný povrch jsou optimálně odrazeny pouze zaostřené paprsky konkrétních vlnových délek, obr. 3.

Na uvedeném principu je založeno zařízení *MicroProf 100* německého výrobce Fries Research & Technology GmbH, které představuje komplexní řešení s možností práce ve 2D i v 3D režimu (optický profilometr, optické rastrovací zařízení). Povrchová topografie je určena na základě vyhodnocení spektra odraženého světelného signálu a srovnání zjištěného spektrálního maxima s interní kalibrační tabulkou. Světelným zdrojem je halogenová výbojka.



Obrázek 3: Princip měření povrchového reliéfu založený na využití barevné vady osvětlovací optické soustavy. Schematicky je zakreslena osvětlovací soustava, měřený povrch a registrované spektrum odraženého světla (r ... vertikální měřící rozsah, I ... intenzita, λ ... vlnová délka).

4 KVANTITATIVNÍ FRAKTOGRAFIE

Fraktografie je pojem, který poprvé použil Carl A. Zapffe roku 1944 pro proces popisné analýzy lomových povrchů [5]. Výstupem této analýzy je soubor číselných charakteristik vztažených k přítomným morfologickým znakům (jejich počet, tvar, rozměry, orientace a také distribuce těchto veličin) nebo k topografii povrchu obecně – parametry drsnosti. Podle popisného potenciálu lze v současnosti užívané parametry rozdělit do pěti hlavních kategorií. První dvě kategorie představují výškové a délkové parametry, které charakterizují vertikální a horizontální rozložení povrchových bodů. Třetí skupinou jsou spektrální parametry. Míra nepravidelnosti na různých úrovních rozlišení je vyjádřena fraktálními parametry. Poslední kategorii představují smíšené (hybridní) parametry popisující více výše uvedených aspektů současně.

4.1 Výškové parametry

Základním způsobem kvantifikace členitosti povrchového reliéfu je statistická analýza souboru výškových souřadnic jeho bodů, bez ohledu na jejich vzájemnou prostorovou souvislost. Nejvýznamnějšími výškovými parametry jsou charakteristiky související s funkcí hustoty pravděpodobnosti. Jedná se zejména o směrodatnou odchylku R_q (informace o šířce rozdělení), koeficient šikmosti γ_1 (informace o symetrii) a koeficient špičatosti γ_2 (informace o míře strmosti roz-

dělení). Tyto charakteristiky jsou definovány jako

$$R_q = \sqrt{\mu_2}, \quad \gamma_1 = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}}, \quad \gamma_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3, \quad (2)$$

kde

$$\mu_k = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (z_i - \langle z \rangle)^k \quad (3)$$

je centrální moment k -tého řádu, n je rozsah analyzovaného souboru (počet bodů) a $\langle z \rangle$ je průměrná výška.

Druhou skupinu výškových parametrů představují charakteristiky založené na extrémních hodnotách souboru výškových souřadnic. Zde patří zejména největší výška R_p ($R_p = z_{\max} - \langle z \rangle$), největší hloubka R_v ($R_v = \langle z \rangle - z_{\min}$) a vertikální rozsah R_z , představující jejich součet.

4.2 Délkové parametry

Délkové parametry popisují rozložení specifických výškových úrovní povrchu v horizontální rovině x - y . Běžně užívanými délkovými parametry jsou například průměrná rozteč prvků profilu na střední čáře S_m , počet průsečíků profilu se střední čarou na jednotku délky n_0 a počet píků profilu na jednotku délky m_0 . Délkové parametry povrchů jsou obvykle algoritmicky složitější analogií svých profilových protějšků. Použití délkových parametrů je běžné především při kontrole jakosti obráběných a tvářených povrchů a ve fraktografii jsou délkové parametry dosud užívány pouze velmi omezeně.

4.3 Spektrální parametry

Spektrální charakter povrchu je možno dostatečným způsobem popsat pomocí autokorelační funkce, kterou lze chápat jako kvantitativní míru podobnosti „originálního“ povrchu a jeho laterálně posunuté verze. Pro lomovou plochu popsanou $m \times n$ body získanými vzorkováním s konstantním krokem ve směrech souřadných os x , y je autokorelační funkce definována následujícím způsobem:

$$R(p, q) = \frac{1}{(m-p)(n-q)} \sum_{i=0}^{m-p-1} \sum_{j=0}^{n-q-1} (z_{i,j} - \langle z \rangle)(z_{i+p,j+q} - \langle z \rangle), \quad (4)$$

kde p a q jsou posunutí v rastrovacích směrech x a y .

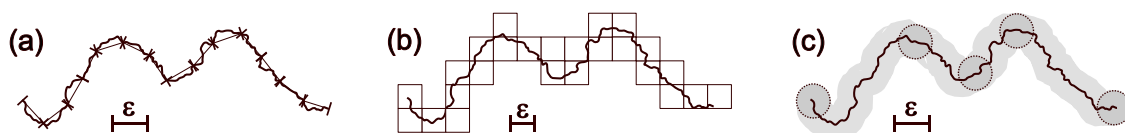
Důležitými charakteristikami jsou rovněž autokorelační délky β_p , β_q , které lze určit jako hodnoty posunutí p , q , pro které autokorelační funkce poklesne na zlomek své počáteční hodnoty (zpravidla $\frac{1}{10}$). Měřítkem anizotropie povrchového reliéfu je poměr $\zeta_o = \frac{\beta_p}{\beta_q}$ vypovídající o tvaru a orientaci strukturních

elementů (např. fazet) v souřadném systému použitým pro vyhodnocení parametrů β_p, β_q . V některých případech je výhodnější použít poměr $\zeta_n = \frac{\beta_f}{\beta_s}$, kde β_f , resp. β_s jsou autokorelační délky ve směru nejrychlejšího, resp. nejpomalejšího poklesu autokorelační funkce. K pochopení spektrálního charakteru povrchu je s výhodou využíváno také vyjádření ve Fourierově prostoru.

4.4 Fraktální parametry

Fraktální geometrie je matematická disciplína zavedená v osmdesátých letech minulého století Mandelbrotem jako nástroj pro popis členitých objektů s komplikovanou a v případě reálných přírodních útvarů často velmi nepravidelnou strukturou [6]. Základní vlastností takovýchto objektů (fraktálů) je soběpodobnost, případně soběpříbuznost, tedy invariance vůči změnám měřítka. Fraktální objekt se díky této invarianci vyznačuje hodnotou Hausdorffovy dimenze D_H překračující jeho topologickou dimenzi d_T . U reálných přírodních útvarů je dokonalou soběpodobnost nutno nahradit soběpodobností statistickou.

Nejběžnější metody výpočtu fraktální dimenze křivky ($d_T = 1$) shrnuje obr. 4. Za předpokladu soběpodobnosti vede aplikace libovolné metody teoreticky k hodnotě D_H , v důsledku digitalizace a zaokrouhlovacích chyb se ovšem hodnoty zjištěné různými metodami obecně poněkud liší.



Obrázek 4: Některé metody výpočtu křivkové (lineární) fraktální dimenze: (a) obvodová metoda, (b) metoda počítání čtverců, (c) Minkowského metoda.

Soběpříbuznost je obecnější formou soběpodobnosti. Pravidelný soběpříbuzný objekt se vyznačuje invariancí vůči afinní transformaci

$$x' \rightarrow \lambda_x x, \quad y' \rightarrow \lambda_y y, \quad z' \rightarrow \lambda_z z, \quad (5)$$

kde pro kontrakční koeficienty platí $\lambda_y \propto \lambda_x^{\nu_y}$ a $\lambda_z \propto \lambda_x^{\nu_z}$. Poměr $H = \frac{\nu_z}{\nu_y}$ bývá označován jako Hurstův exponent ($H \in \langle 0; 1 \rangle$). Pro isotropní povrchy jsou obě souřadnice x, y rovnocenné a je tudíž $H = \nu_z$. Tento vztah platí také pro libovolnou soběpříbuznou rovinnou křivku. U reálných útvarů je namísto pravidelné soběpříbuznosti opět nutno hovořit o soběpříbuznosti statistické. Řada experimentálních prací prokazuje, že lomové povrchy široké škály materiálů se vyznačují právě touto vlastností [7].

4.5 Smíšené parametry

Smíšené parametry jsou obvykle chápány jako kombinace výškových a délkových charakteristik, tedy jako parametry popisující několik aspektů povrchové drsnosti současně. V kvantitativní fraktografii jsou dlouhodobě používány zejména lineární drsnost R_L a plošná drsnost R_S :

$$R_L = \frac{L}{L'}, \quad R_S = \frac{S}{S'}, \quad (6)$$

kde L je aproximativní délka lomového profilu, S je aproximativní plocha lomového povrchu a L' , resp. S' je délka projekce profilu, resp. plocha projekce povrchu do makroskopické roviny lomu.

4.6 Souvislost parametrů drsnosti s parametry lomového procesu

Nejstarší fraktografické studie vychází ze souvislosti mezi roztečí striací a rychlostí šíření trhliny [8]. Výsledky těchto studií lze využít při posuzování příčin havárií a rekonstrukci časového průběhu únavového procesu.

V současnosti je jednou z běžných úloh kvantitativně-fraktografické analýzy snaha o nalezení souvislosti mezi členitostí lomových povrchů a drsnostně indukovanými zavíracími efekty. Podrobný rozbor byl proveden např. v práci [9], kde se jako charakteristika drsnosti používá parametr R_S .

Zajímavou fraktografickou metodou je tzv. texturní fraktografie, která je založena na analýze textury snímků zkoumaného lomového povrchu pořízených při mezoskopickém zvětšení [10].

V práci [11] byl zkoumán vliv rozsahu zatížení a typu vnějšího prostředí na spektrální charakter výsledného lomového reliéfu. Z provedeného rozboru vyplývá, že spektrální charakter je významně rozdílný pro povrchy vzniklé při nízkých a vysokých hodnotách ΔK a K_{\max} (rozkmit součinitele intenzity napětí, maximální hodnota součinitele intenzity napětí).

V práci [12] byla provedena fraktální analýza lomových povrchů a studována souvislost mezi fraktální dimenzí a uplatňujícím se lomovým mikromechanismem.

5 METODIKA MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT

5.1 Zkušební tělesa a způsob jejich zatěžování

Zkušební tělesa byla vyrobena z vysocepevné nízkolegované oceli ČSN 41 5340 ($R_e = 840$ MPa, $R_m = 950$ MPa). Biaxiální únavové zatěžování symetrickým ohybem, symetrickým krutem a jejich soufázovou synchronní kombinací

(SSOK) bylo provedeno pomocí experimentálního zařízení *MZGS-100* při pokojové teplotě sinusovým cyklem při zatěžovací frekvenci 29 Hz. Způsob zatěžování studovaných těles je zřejmý z tab. 1, kde σ_a , resp. τ_a označuje aplikovanou amplitudu napětí v ohybu, resp. krutu, N_f je celková únavová životnost vyjádřená počtem cyklů do lomu a Z je parametr zatížení, který je definován vztahem

$$Z = \frac{\tau_a}{\sigma_a + \tau_a}. \quad (7)$$

Tabulka 1: Způsob zatěžování studovaných zkušebních těles.

Zkušební těleso	σ_a [MPa]	τ_a [MPa]	Z [-]	N_f [cykl]
1	738,17	0	0	102560
2	559,86	203,38	0,27	14880
3	329,37	330,30	0,50	55600
4	135,95	372,82	0,73	100160
5	0	398,73	1	100400

5.2 Realizovaná stereofotogrammetrická měření

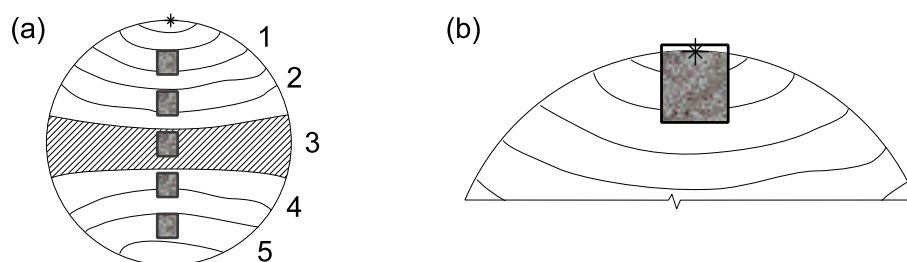
Stereosnímky vybraných oblastí vyšetřovaných lomových povrchů (viz níže) byly pořízeny pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu (*Leica S440*). Trojrozměrná rekonstrukce lomového reliéfu byla provedena využitím komerčního softwarového systému *MeX* firmy Alicona Imaging GmbH. Měření proběhla ve spolupráci s ústavem rakouské akademie věd „Erich Schmid Institute of Materials Science“ v Leobenu. Celkově byly realizovány 4 různé typy měření (dále značeny řeckými písmeny A-D). Informace o jednotlivých měřeních jsou uvedeny v tab. 2, kde n je přibližný počet zjištěných datových bodů.

Tabulka 2: Parametry realizovaných stereofotogrammetrických měření.

Typ měření	Zvětšení	Rozlišení snímků	Rozměr pixelu [μm]	n
A	250 \times	2048 \times 1536 \times 8bpp	0,524	140 000
B	150 \times	3072 \times 2304 \times 8bpp	0,581	300 000
C	500 \times	2048 \times 1536 \times 8bpp	0,262	160 000
D	55 \times	1024 \times 768 \times 8bpp	4,754	20 000

Měření typu A bylo provedeno na jediné lomové ploše každého ze studovaných zkušebních těles v pěti místech různě vzdálených od předpokládaného ohniska primárního porušení (místo iniciace únavové trhliny na povrchu tělesa). Střed všech měřených oblastí ležel na spojnici tohoto ohniska s geometrickým středem tělesa. Oblasti byly označeny číslicemi 1-5, oblast 1 se nacházela

ohnisku porušení nejbliže, obr. 5a. Stereofotogrammetrická rekonstrukce typu B byla rovněž provedena pro všechna zkušební tělesa a představovala měření na obou lomových plochách vzájemně si odpovídajících (komplementárních) oblastí. Studované oblasti vždy zahrnovaly primární ohnisko porušení a část povrchu v jeho těsné blízkosti, obr. 5b. Měření typu C bylo realizováno pro jedinou oblast na obou lomových plochách krutově zatíženého zkušebního tělesa 5 ve vzdálenosti přibližně 1 mm od místa primárního ohniska porušení. Typ D představoval rekonstrukci kompletních povrchů obou lomových ploch zkušebních těles 4 a 5 při nízkém zvětšení ($55\times$). Vzhledem ke značnému rozsahu měření, zůstávají však tato data z větší části stále nezpracována.



Obrázek 5: Schematické zakreslení výběru studovaných oblastí při rekonstrukci (a) typu A, (b) typu B. Znázorněno je ohnisko primárního porušení (symbolicky znakem *), postupové čáry a oblast náhlého dolomení (šrafovaně).

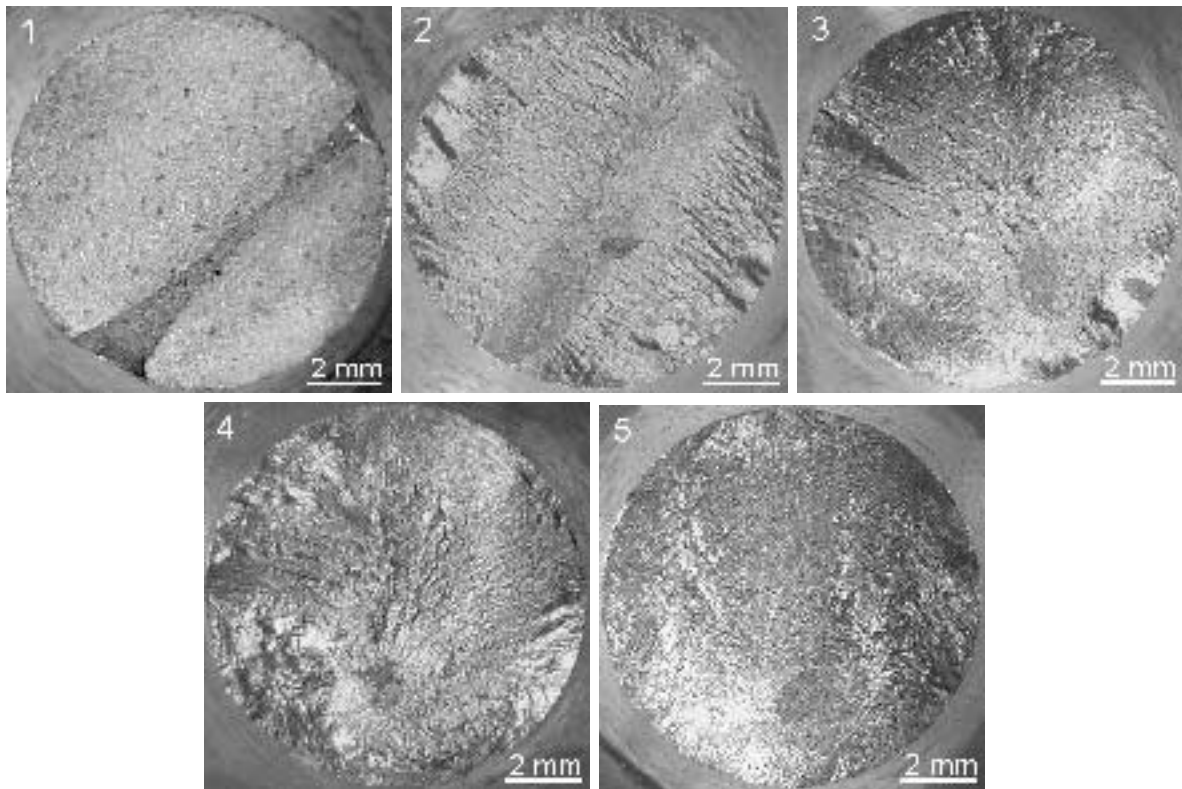
V důsledku neekvidistantního charakteru topografických dat bylo v první řadě nutno provést jejich prostorovou triangulaci. V předložené práci byla zvolena tzv. Delaunayova triangulace (viz obr. 18). Znalost triangulační sítě umožnila provést separaci vybraných lomových profilů, pro jejichž další zpracování byla v programovacím prostředí *Borland Delphi 5* vytvořena aplikace *Profiler*.

6 VÝSLEDKY FRAKTOGRAFICKÉ ANALÝZY

6.1 Makromorfologická studie

Makromorfologická analýza byla provedena pouhým okem a pomocí $5\times$ zvětšující lupy. Snímky lomových povrchů vyšetřovaných zkušebních těles byly pořízeny digitálním fotoaparátem v makro režimu a jsou uvedeny na obr. 6. Číslo zkušebního tělesa je vepsáno v levém horním rohu (viz tab. 1).

Na základě provedeného šetření lze konstatovat, že zvyšující se podíl krutové komponenty na celkovém zatížení tělesa (tj. rostoucí parametr Z) vede k růstu složitosti trajektorie únavové trhliny, v jehož důsledku narůstá také celková makročlenitost výsledného lomového reliéfu. Rozdílný způsob šíření trhliny je evidentní již při srovnání topografie povrchů zkušebních těles 1 a 2, markantní



Obrázek 6: Makrosnímky lomových povrchů vyšetřovaných zkušebních těles.

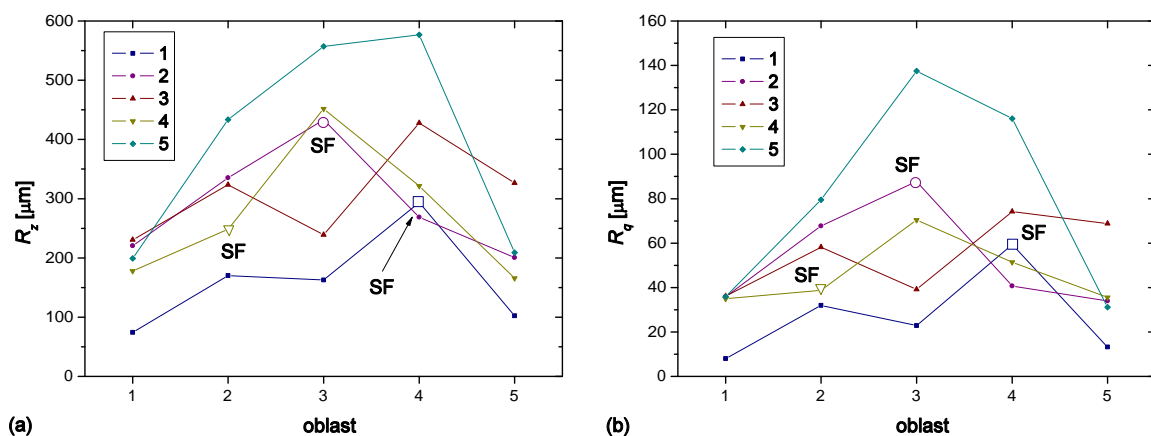
změna makromorfologického charakteru je ovšem spojena teprve s úrovní parametru zatížení $Z \sim 0,5$. V případě zkušebních těles 1 a 2 ($Z < 0,5$) dochází k intenzivnímu růstu trhliny do vnitřku tělesa a následně k lomu za vzniku povrchu s oblastmi příslušejícími stabilnímu a nestabilnímu šíření trhliny, které svým rozložením a tvarem přibližně odpovídají schématům pro prostý ohyb uváděným v literatuře, např. [13]. U zkušebních těles 3-5 ($Z \geq 0,5$) se trhlina přednostně šíří podél obvodu tělesa, růst do jeho vnitřku je s klesajícím podílem ohybového zatížení značně zpomalen a lomové povrchy jsou makromorfologicky velmi blízké schématům uváděným pro zatížení prostým krutem. Rostoucí úroveň krutové složky zatížení má v tomto případě za následek také zvýšení otěru obou lomových povrchů. Míra poškození se jeví být úměrná délce trvání kontaktu – nejvíce poškozené jsou oblasti blízké povrchu zkušebního tělesa, části lomové plochy ve středu tělesa naopak zůstávají víceméně nepoškozeny.

6.2 Analýza prostorového vývoje lomového reliéfu

K posouzení prostorového vývoje lomového reliéfu studovaných zkušebních těles v závislosti na způsobu jejich únavového namáhání byl proveden rozbor topografických dat zaznamenaných stereofotogrammetrickým šetřením typu A (viz tab. 2 a obr. 5a). Úroveň členitosti povrchu byla posuzována na zá-

kladě vyhodnocení parametrů R_z , R_q , γ_1 , γ_2 , R_S a fraktální dimenze D_S , která byla určena prostorovou variantou obvodové metody (srv. obr. 4a). Závislost sledovaných parametrů na poloze vyšetřované oblasti je patrná z obr. 7-9. Prázdnými symboly a písmeny SF jsou v těchto obrázcích vyznačeny hodnoty parametrů příslušející oblastem náhlého dolomení.

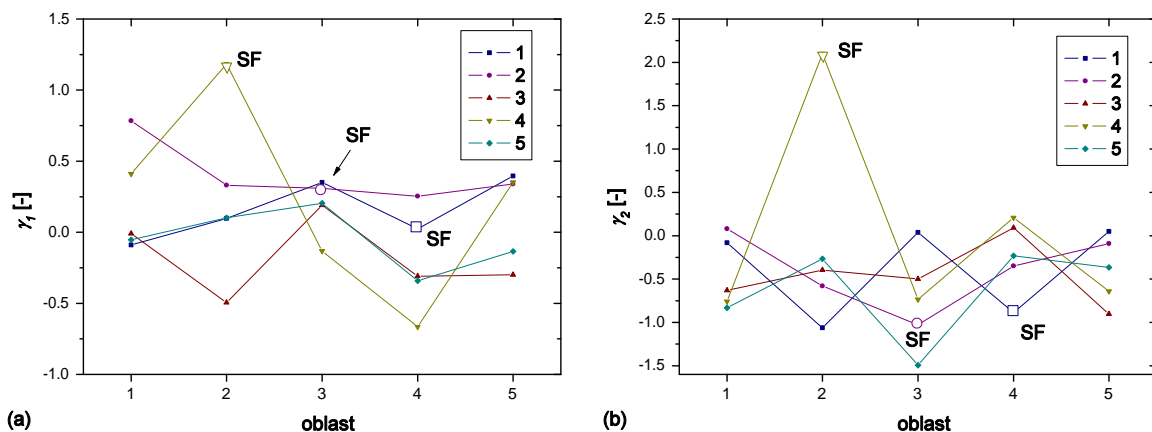
Obr. 7 znázorňuje prostorový vývoj vertikální členitosti kvantifikované výškovými parametry R_z a R_q . Vyloučíme-li při rozboru výsledných grafů hodnoty zjištěné v oblastech náhlého dolomení, lze konstatovat, že vertikální členitost je nejnižší v místech blízkých povrchu zkušebních těles a směrem do jejich středu narůstá. Výsledky také potvrzují celkový nárůst členitosti lomového reliéfu s rostoucím parametrem zatížení Z pozorovaný již při makroskopickém rozboru. Minimální vertikální rozsah i směrodatná odchylka jsou zjištěny u ohybově zatíženého zkušebního tělesa 1, maximální (více než dvojnásobné) hodnoty přísluší krutově zatíženému tělesu 5. Oba parametry poměrně citlivě reagují na změnu povrchové topografie a z hlediska výpovědní hodnoty je tedy možno obě charakteristiky považovat za parametry fraktograficky významné.



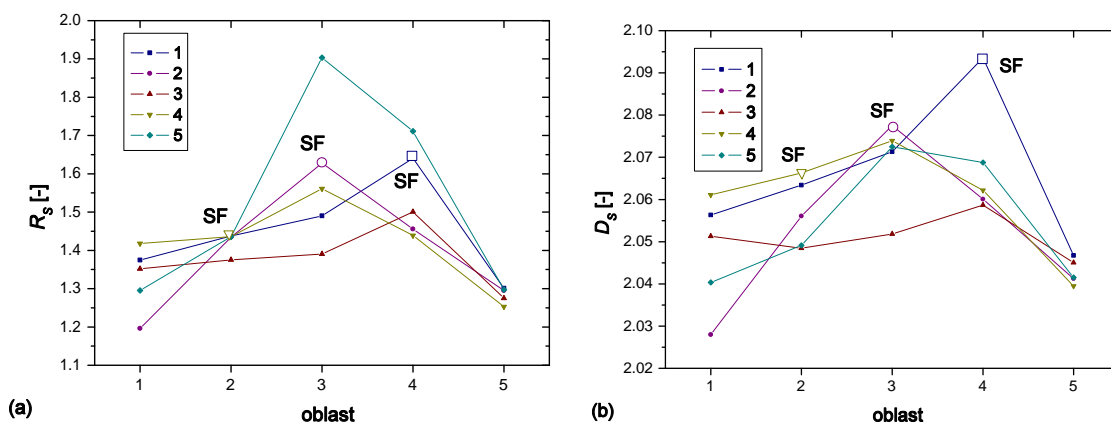
Obrázek 7: Prostorový vývoj parametrů (a) R_z , (b) R_q .

Ze srovnání makromorfologických snímků lomových povrchů s výsledky dosaženými pro koeficienty šikmosti a špičatosti (obr. 8) je zřejmé, že žádný z parametrů γ_1 , γ_2 nereflkuje dostatečně citlivě změny povrchového reliéfu a ani nevykazuje žádný systematicky pozorovatelný trend.

Na obr. 9 je zachycen prostorový vývoj plošné drsnosti R_S a plošné fraktální dimenze D_S . Obdobně jako u parametrů R_z a R_q rostou téměř ve všech případech hodnoty obou těchto charakteristik od okraje zkušebních těles směrem do jejich středu. Přestože nejvyšší plošná drsnost je opět zjištěna u zkušebního tělesa 5 (pro oblast 3 až $R_S \approx 1,9$), nelze konstatovat jednoznačnou souvislost mezi hodnotami R_S a parametrem zatížení Z . V případě fraktální dimenze D_S je nutno upozornit na velmi malý rozsah výsledných hodnot ($D_S \sim 2,03-2,10$),



Obrázek 8: Prostorový vývoj parametrů (a) γ_1 , (b) γ_2 .



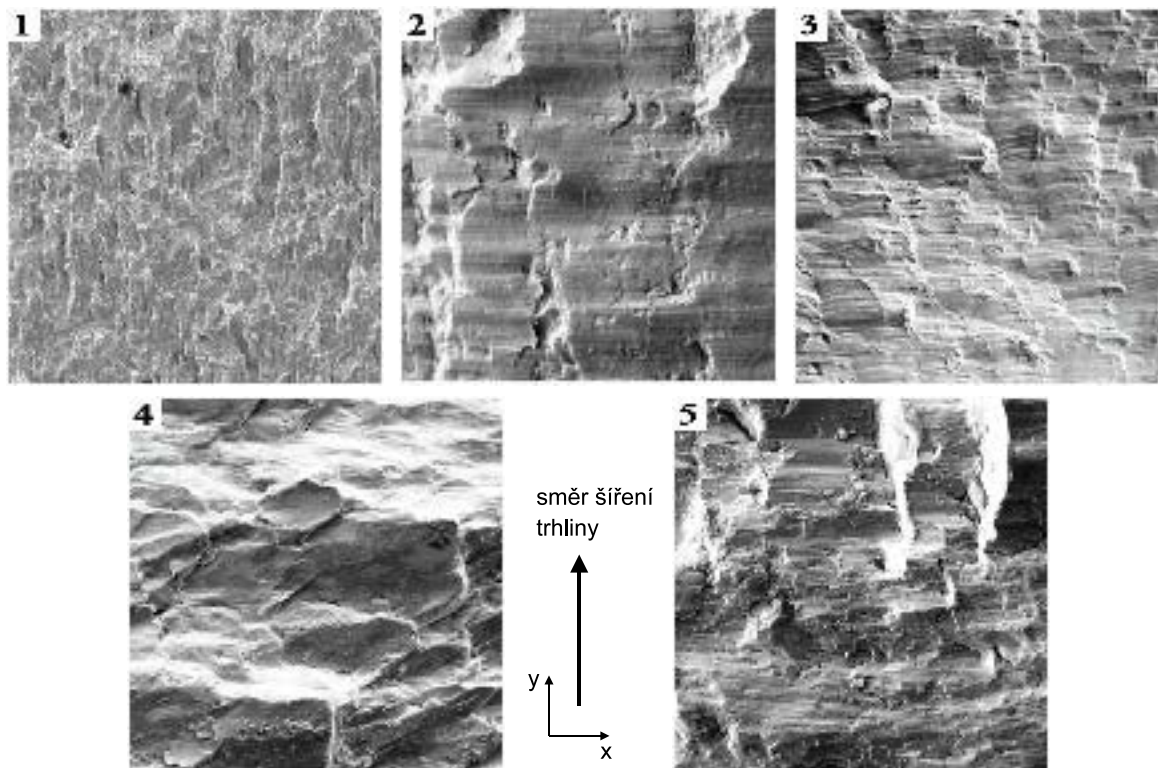
Obrázek 9: Prostorový vývoj parametrů (a) R_S , (b) D_S .

který činí použití této charakteristiky jako fraktograficky významného parametru diskutabilním.

Zajímavými se jeví výsledné hodnoty parametrů R_z , R_q , R_S a D_S zjištěné pro lomový povrch zkušebního tělesa 1. Na základě srovnání výsledné plošné drsnosti R_S s úrovní parametrů R_z a R_q lze soudit, že třebaže se povrch tělesa 1 jeví makroskopicky téměř hladký (velmi nízké hodnoty R_z a R_q), je členitost lomového reliéfu na mikroúrovni ve skutečnosti poměrně vysoká (vysoké hodnoty R_S). V oblastech blízkých okrajům tělesa, kde je příspěvek makročlenitosti k hodnotám R_S nižší, je úroveň plošné drsnosti srovnatelná (oblast 5), a dokonce i o něco vyšší (oblast 1) než v případě lomového povrchu tělesa 5 (zde je nutno vzít v úvahu možné poškození těchto okrajových oblastí otěrem). Za poměrně vysoké hodnoty R_S lomového reliéfu zkušebního tělesa 1 ($R_S \in (1,3; 1,5)$) je zřejmě zodpovědný mechanismus šíření únavové trhliny vedoucí na lokální úrovni ke vzniku členitých striačním polí. Tuto úvahu potvrzuje také relativně vysoká fraktalita povrchu.

6.3 Studie povrchového reliéfu příslušejícího rané fázi šíření trhliny

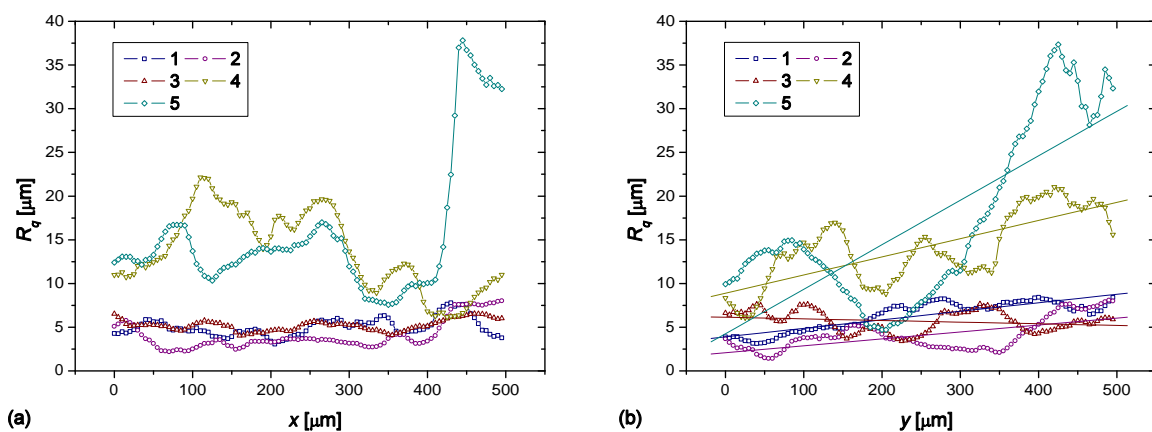
Pro každé zkušební těleso byl vybrán čtvercový úsek o velikosti $0,25 \text{ mm}^2$, jehož střed se nacházel přibližně ve vzdálenosti $0,8 \text{ mm}$ od primárního ohniska porušení, obr. 10. Pro každou vyšetřovanou oblast byly separovány dvě série lomových profilů (2×100 profilů): první ve směru šíření trhliny (y -směr v obr. 10), druhá ve směru na šíření kolmém (x -směr v obr. 10).



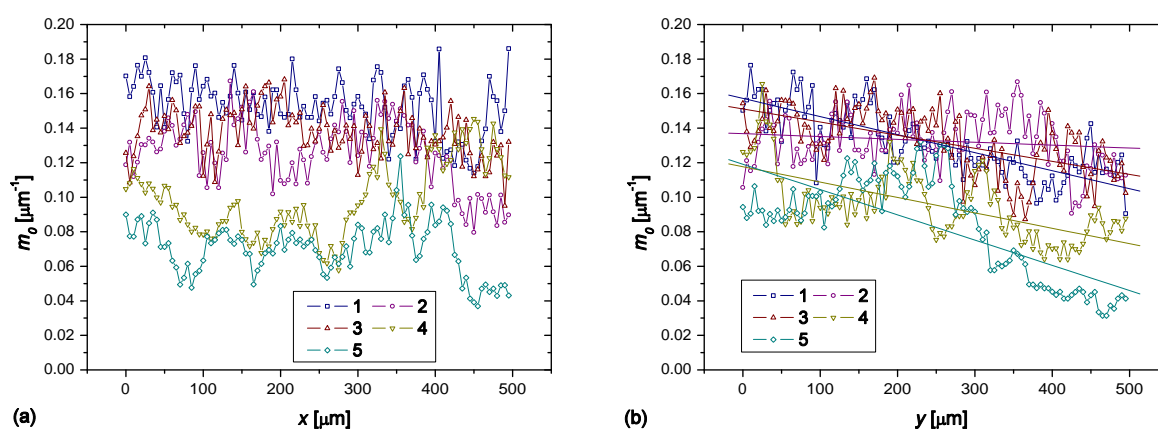
Obrázek 10: Studované oblasti.

Celkově nejvyšší hodnoty R_q jsou pozorovány u zkušebních těles 4 a 5 (obr. 11), u kterých také dochází ke zřetelnému růstu členitosti čela šířící se únavové trhliny (obr. 11b). U zkušebních těles 1-3 dosahuje směrodatná odchylka relativně nízkých hodnot ($R_q \sim 5 \mu\text{m}$) a s výjimkou tělesa 3 dochází s narůstající délkou trhliny k jejich mírnému růstu. Kvalitativně stejné chování vykazuje také vertikální rozsah R_z .

Na obr. 12 jsou prezentovány výsledné hodnoty parametru m_0 . U obou sérií vyšetřovaných profilů klesá m_0 s rostoucím parametrem zatížení Z . Výrazně nízkými hodnotami m_0 se vyznačují zejména zkušební tělesa 4 a 5 (převažující krut), v případě těles 1-3 nabývá parametr m_0 přibližně stejné úrovně. Pro všechna zkušební tělesa klesá m_0 také s rostoucí délkou trhliny (obr. 12b). Z dosažených výsledků vyplývá, že parametr m_0 identifikuje rozdílný způsob zatížení a odráží též prostorový vývoj lomového reliéfu, a lze jej tudíž doporučit jako popisně významnou charakteristiku.



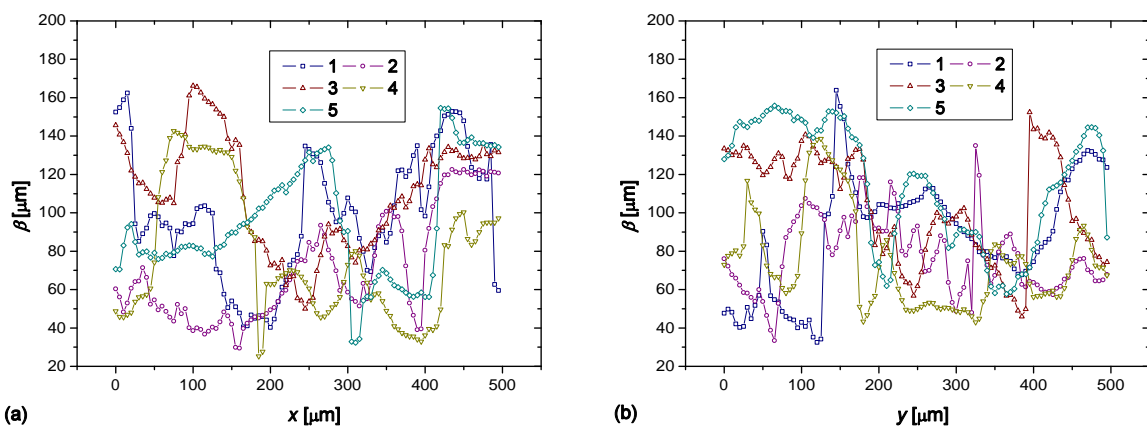
Obrázek 11: Parametr R_q profilů ve směru (a) y , (b) x (dle obr. 10).



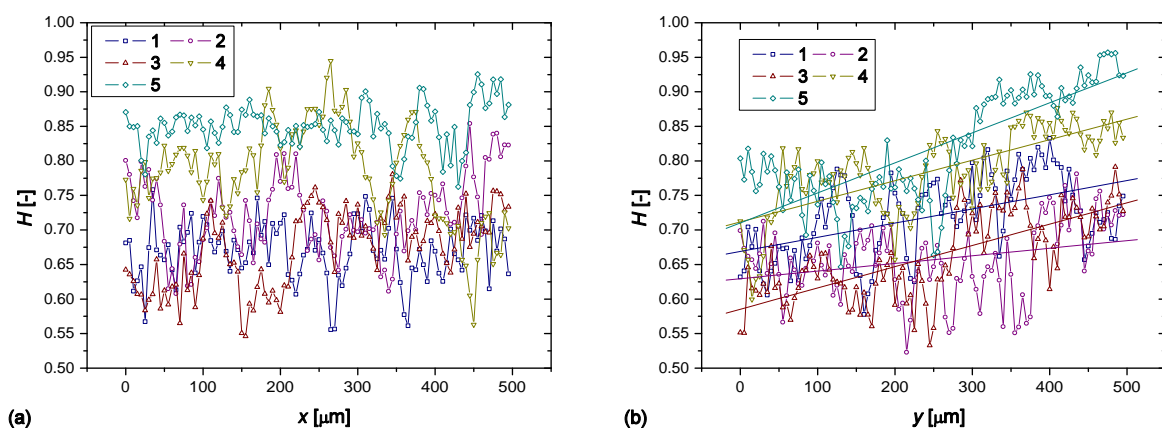
Obrázek 12: Parametr m_0 profilů ve směru (a) y a (b) x (dle obr. 10).

Na obr. 13 jsou uvedeny výsledky šetření pro autokorelační délku β . Je zřejmé, že podobně jako v případě parametrů γ_1 a γ_2 , není ani zde možno nalézt vztah této charakteristiky k parametru zatížení Z . U většiny zkušebních těles však lze vytušit pokles hodnot β s narůstající délkou trhliny. Na druhé straně některé poslední výsledky týkající se výzkumu výkonové spektrální hustoty naznačují, že tato charakteristika je na způsob zatížení citlivá [XI].

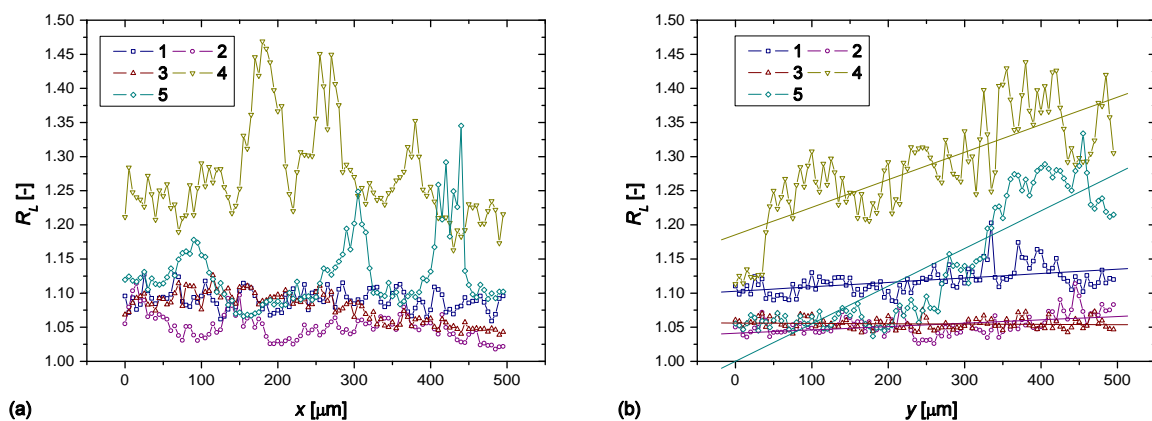
Výsledné hodnoty Hurstova exponentu H jsou uvedeny na obr. 14. Hodnoty H leží ve všech případech v intervalu $(0, 5; 1)$ a svědčí tak nejen o soběpříbuznosti studovaných lomových povrchů, ale také o perzistenci (paměťovém efektu) únavového procesu. Nejvyšší Hurstův exponent je zjištěn u profilů zkušebních těles 4 a 5, v důsledku čehož lze konstatovat, že povrchový reliéf je u těchto těles do značné míry ovlivněn předešlými lomovými událostmi. Pro všechna zkušební tělesa je patrný také nárůst hodnot H s rostoucí délkou trhliny. Zjištěné výsledky vedou k závěru, že Hurstův exponent je k „tvořícímu“ únavovému procesu do značné míry citlivý a lze jej považovat za vhodnou fraktografickou charakteristiku.



Obrázek 13: Parametr β profilů ve směru (a) y a (b) x (dle obr. 10).



Obrázek 14: Parametr H profilů ve směru (a) y a (b) x (dle obr. 10).



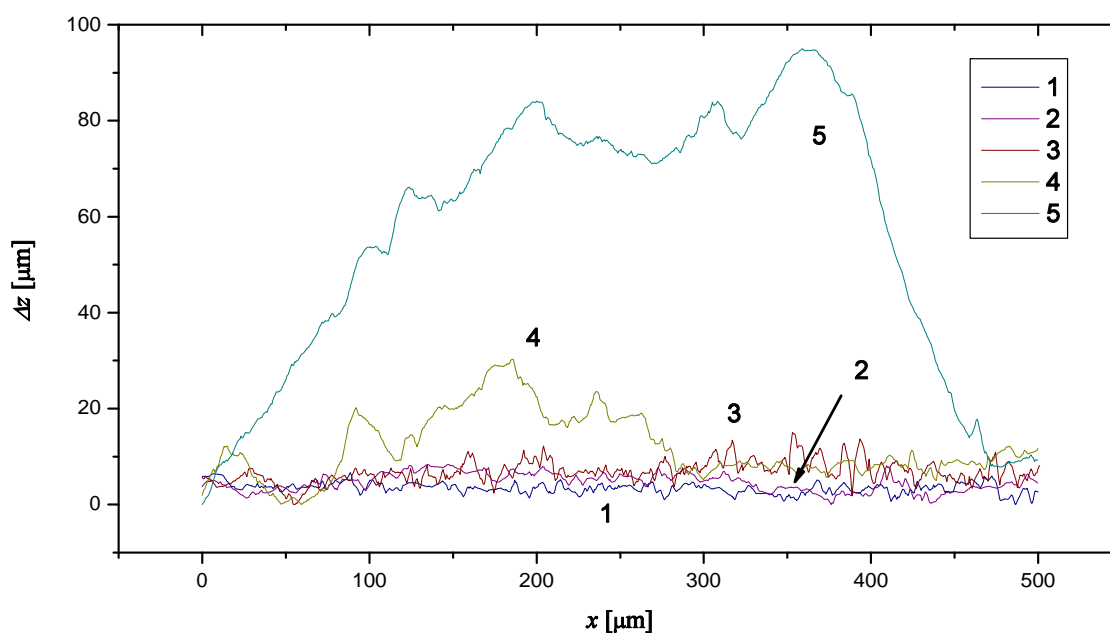
Obrázek 15: Parametr R_L profilů ve směru (a) y a (b) x (dle obr. 10).

V případě lineární drsnosti R_L se nejvyššími hodnotami vyznačují lomové profily zkušebních těles 4 a 5, obr. 15. U profilů kolmých na směr šíření trhliny (obr. 15b) jsou relativně vyšší hodnoty zjištěny rovněž v případě zkušebního tělesa 1. V tomto směru také pro všechna zkušební tělesa hodnoty R_L narůstají, nejvýrazněji v případě těles 4 a 5.

6.4 Komplementární analýza

Účelem provedené studie bylo zhodnotit, do jaké míry se při různých způsobech zatěžování na tvorbě lomového reliéfu podílel vzájemný otěr obou povrchů. Za pomoci stereoskopických prostorových brýlí byly na všech površích nalezeny komplementární lomové profily v předpokládaném směru šíření trhliny. Délka těchto profilů byla $500\ \mu\text{m}$, jejich počátek byl zvolen v těsné blízkosti primárního ohniska porušení. Po výpočtu Delaunayovy triangulační sítě byla provedena separace příslušných dat a jejich úprava do formátu vyžadovaném aplikací *Profiler*. Komplementární profily byly dále orientovány do polohy přibližně odpovídající konfiguraci obou lomových povrchů v okamžiku únavového experimentu a byla výpočtena jejich vzájemná diference Δz , obr. 16.

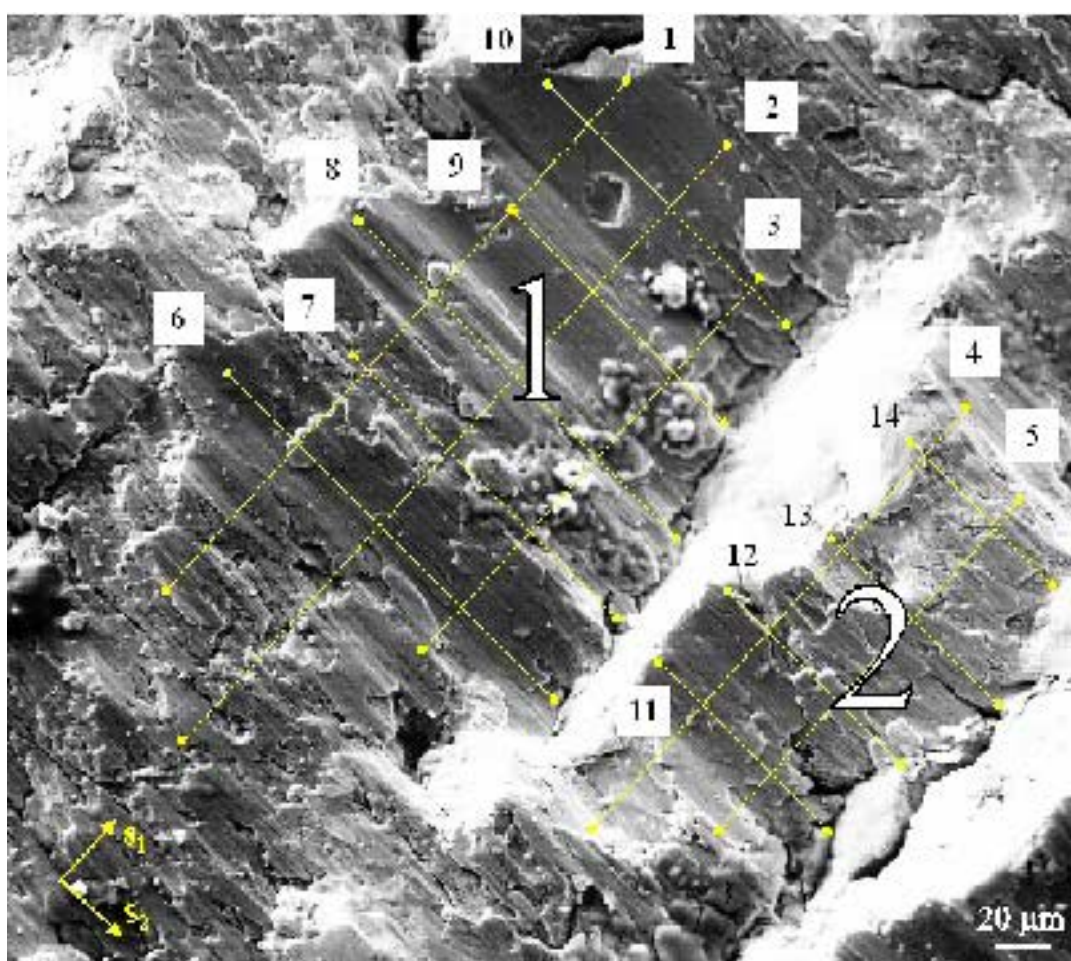
Je patrné, že diference Δz mezi komplementárními profily narůstá se zvyšujícím se podílem krutové složky zatížení. Jako kritická se opět jeví hodnota $Z \sim 0,5$: zatímco v případě zkušebních těles 1-3 se Δz pohybuje v rozmezí $0-15\ \mu\text{m}$, u zkušebního tělesa 4 a zejména u tělesa 5 se jedná o hodnoty podstatně vyšší. Podobných výsledků bylo dosaženo i v dříve provedené práci [V]. Nárůst Δz s rostoucím parametrem Z je možno přisuzovat rostoucí složitosti trajektorie šířící se únavové trhliny a především nárůstu otěru lomových ploch, v jehož důsledku nastává abraze miroskopických částic povrchu, zejména v místech mikrovýstupků a fazet se vzájemně velkými úhly náklonu. Tento výsledek je také v souladu s provedeným makroskopickým šetřením (stať 6.1).



Obrázek 16: Diference Δz mezi komplementárními profily vedenými ve směru předpokládaného šíření trhliny.

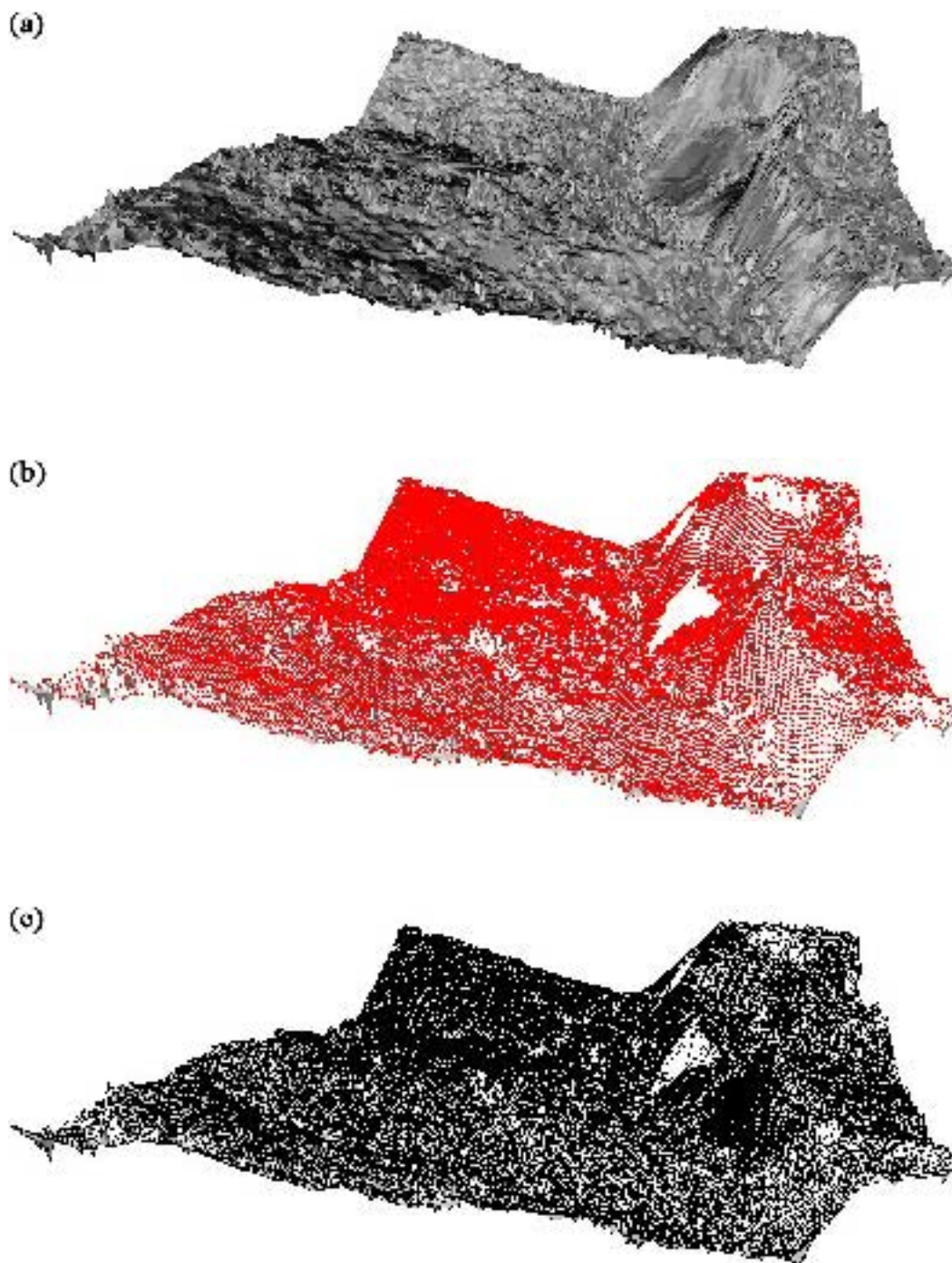
6.5 Studie lomových fazet vzniklých při zatěžování prostým krutem

Tato studie byla provedena s cílem posoudit možnost realizace šíření čela trhliny v lokálním prostém zátěžném módu III. Studovanou oblastí bylo vedeno celkově 14 profilů ve dvou vzájemně kolmých směrech s_1 (směr makrošíření trhliny) a s_2 tak, aby došlo k rovnoměrnému pokrytí obou vyšetřovaných lomových fazet, obr. 17. Střed studované oblasti ležel ve vzdálenosti přibližně 1 mm od povrchového ohniska porušení, které se podle obr. 17 nacházelo vlevo dolů ve směru profilů 1-5. Topografická analýza byla provedena na základě zpracování dat zjištěných stereofotogrammetrickým měřením typu C (tab. 2). Představu o celkové topografii je možno získat z obr. 18.



Obrázek 17: Analyzovaná oblast (zkušební těleso 5).

Je zřejmé, že čelo trhliny se podél obou fazet šíří v lokálních smíšených módech I+III, resp. I+II. Přítomnost módu I ve všech fázích šíření potvrzuje zanedbatelnou roli čistě smykového mechanismu módu III při růstu únavových trhlin v kovových materiálech [14]. Podrobnější diskuze byla provedena v [IX].



Obrázek 18: Prostorový pohled na část analyzované oblasti: (a) snímek s texturou, (b) zjištěné datové body a (c) jejich Delaunayova triangulace.

6.6 Srovnání stereofotogrammetrie a optické měřicí metody

Srovnávací analýza byla provedena na lomovém povrchu zkušebního tělesa 1, který se vyznačuje poměrně nízkou makročlenitostí ($R_z < 300 \mu\text{m}$), díky níž bylo možno na zařízení *MicroProf 100* provést snímání v přesnějším jednovrstevném režimu. Poloha studované oblasti přibližně odpovídala stereofotogrammetricky rekonstruované oblasti 1 (měření typu A). Snímání povrchu bylo

provedeno s konstantním krokem o velikosti $2,5 \mu\text{m}$ v obou rastrovacích směrech, což je hodnota obdobná vzdálenosti bodů v případě jejich ekvidistantního rozložení při stereofotogrammetrickém měření typu A.

Vybrané parametry drsnosti lomového reliéfu studované oblasti byly vyhodnoceny pomocí aplikace *Mark III* dodávané se zařízením *MicroProf 100*. Tyto parametry, spolu s údaji zjištěnými při stereofotogrammetrické rekonstrukci oblasti 1 (výstup aplikace *MeX*), jsou uvedeny v tab. 3, kde D_B je fraktální dimenze zjištěná prostorovou variantou metody počítání čtverců (srv. obr. 4b). Z dosažených výsledků je zřejmé, že s výjimkou koeficientu špičatosti γ_2 dosahují v obou případech všechny sledované charakteristiky srovnatelných hodnot. Nepatrně nižší úroveň vertikální členitosti (R_z , R_a , R_q) zjištěná měřením na zařízení *MicroProf 100* je v souladu s nižší vzdáleností studované oblasti od povrchu tělesa. Jistý vliv lze zřejmě přisoudit také technickým omezením tohoto zařízení.

Tabulka 3: Parametry drsnosti zjištěné pomocí aplikací *Mark III* a *MeX*.

	R_z [μm]	R_a [μm]	R_q [μm]	γ_1 [μm]	γ_2 [μm]	D_S [—]	D_B [—]
<i>Mark III</i>	67,988	5,737	7,462	-0,237	1,002	—	2,055
<i>MeX</i>	74,426	6,394	8,011	-0,090	-0,083	2,056	—

Ze srovnání obou měřících metod vyplývá, že zařízení *MicroProf 100* je pro topografická měření povrchu zkušebního tělesa 1 velmi dobře použitelné. Hlavní výhodou je vysoká rychlost měření (až 1000 Hz) a zejména ekvidistantní charakter zjištěných povrchových dat, který značným způsobem usnadní jejich případné matematické zpracování.

7 ZÁVĚR

Výsledky dizertační práce

V dizertační práci je řešena problematika kvantitativní analýzy topografie lomových povrchů zkušebních těles z oceli ČSN 41 5340 únavově namáhaných symetrickým ohybem, symetrickým krutem a jejich soufázovou synchronní kombinací. Hlavním cílem práce bylo především posoudit vztah mezi aplikovaným způsobem experimentálního zatěžování a výsledným lomovým reliéfem.

Z provedeného šetření vyplývá, že zvyšující se podíl krutové složky na celkovém zatížení (rostoucí parametr Z) vede k nárůstu složitosti trajektorie únavové trhliny, ale také k rostoucí míře poškození obou lomových povrchů jejich vzájemným otěrem. V důsledku těchto protichůdných faktorů narůstá s rostoucím parametrem Z makrodrsnost povrchu, na mikroskopické úrovni

však členitost lomového reliéfu v oblastech blízkých povrchu zkušební tělesa s rostoucím Z spíše klesá. Za přechodovou lze považovat hodnotu $Z \sim 0,5$ (tj. přibližně poloviční podíl krutu), po jejímž překročení jsou jak nárůst celkové složitosti lomových povrchů, tak i lokální působení otěru velmi výrazné. Pro všechny způsoby experimentálního namáhání byl pozorován růst členitosti lomového reliéfu také ve směru od okraje do středu zkušební tělesa, v okrajových oblastech však s rostoucí délkou trhliny dochází na mikroúrovni opět spíše k mírnému poklesu. Důležitým závěrem detailní analýzy lomových faset vzniklých při čistě krutovém zatěžování je zjištění přítomnosti otevíracího módu I ve všech fázích růstu trhliny. To potvrzuje předpoklad zanedbatelné role čistě smykového módu III při šíření dlouhých únavových trhlín. Nejnovější výsledky získané na pracovišti ÚFI FSI VUT v Brně v oblasti vysokocyklové únavy potvrzují výše uvedené závěry.

Členitost povrchové topografie byla hodnocena vybranými parametry drsnosti. Jejich výpočet byl proveden pomocí komerčního systému *MeX* a autorem vytvořené aplikace *Profiler*. Pro analýzu lomových povrchů podobného topografického charakteru se jako popisně významné a vzájemně nezávislé charakteristiky jeví zejména parametry R_q , m_0 , H a R_L (případně R_S). Popis spektrálních vlastností lze provést parametrem β (případně ζ_0 , ζ_n). Takto navržená sada kvantifikuje všechny základní aspekty topografie a svým rozsahem představuje rozumný kompromis mezi příliš zjednodušujícím a zbytečně rozsáhlým popisem. Orientačně lze doporučit také výpočet parametrů R_z , γ_1 a γ_2 .

Ze srovnávacích optických měření provedených na lomovém povrchu zkušební tělesa namáhaného prostým ohybem dále vyplývá, že zařízení *Microprof100* se jeví být dobře použitelnou měřicí metodou. Hlavní výhodou je především ekvidistantní charakter naměřených dat, který značným způsobem usnadní jejich další matematické zpracování. Pro makroskopicky členitější lomové povrchy je ovšem třeba počítat s nutností provést měření ve vícevrstevném režimu.

Literatura

- [1] D. F. Socie, G. B. Marquis, *Multiaxial Fatigue*. SAE Int., Warrendale 2000.
- [2] J. Pokluda, “Únavová životnost při víceosém namáhání”. *Mater. Inženýrstvo* **9**, 3 (2002) 33-40.
- [3] M. Zemandl, “Přístupy a kritéria pro predikci únavové pevnosti při kombinovaném víceosém namáhání”. Ústav termomechaniky AVČR, pobočka Plzeň, Centrum diagnostiky materiálů, 1999.
- [4] S. Scherer, O. Kolednik, “A new system for automatic surface analysis in SEM”. *Europ. Microsc. Anal. March* (2001) 15-17.
- [5] K. Mills et al., “History of Fractography”. In: K. Mills et al. (eds.) *Metals Handbook*, Vol. 12., ASM International, Metals Park, Ohio 1992, 1-9.
- [6] B.B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman, New York 1984.
- [7] A.S. Balankin, “Physics of fracture and mechanics of self-affine cracks”. *Eng. Fract. Mech.* **57**, 2-3 (1997) 135-203.
- [8] J. Pokluda, P. Staněk, “Rekonstrukce únavového procesu z morfologie lomové plochy I+II”. *Strojírenství* **30** (1980) 485-496, 552-561.
- [9] J. Pokluda, P. Šandera, J. Horníková, “Statistical approach to roughness-induced shielding effects”. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* **27** (2004) 141-157.
- [10] H. Lauschmann, I. Nedbal, “Auto-shape analysis of image textures in fractography”. *Image Anal. Stereol.* **21** (2002) 139-144.
- [11] T. Kobayashi, D.A. Shockey, Ch.G. Schmidt, R.W. Klopp, “Assessment of fatigue load spectrum from fracture surface topography”. *Int. J. Fatigue* **19**, Suppl. 1 (1997) S237-S244.
- [12] I. Dlouhý, B. Strnadel, “Závislost dimenze fraktálu lomové plochy na mechanismu šíření trhliny”. *Hut. listy* **6-8** (2002) 46-54.
- [13] M. Zemandl, “Fraktografie únavových lomů kovových materiálů při mechanickém namáhání”. *Mat. Inženýrstvo* **9**, 3 (2002) 41-48.
- [14] J. Pokluda, R. Pippan, “Can pure mode III fatigue loading contribute to crack propagation in metallic materials?”. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* **28** (2005) 179-185.

Vlastní práce autora

- [I] K. Slámečka, J. Pokluda, L. Bartík: “Životnost nízkolegované oceli při kombinovaném namáhání v krutu a ohybu”. In: O. Bokůvka, P. Palček (eds.) *Proc. Degradácia 01*, ŽU v Žilině, Žilina 2001, 36-41.
- [II] K. Slámečka, J. Pokluda: “Prostorová rekonstrukce mikroreliefu lomových ploch”. In: I. Ptáčková (ed.) *Proc. FSI Junior konference 2002*, Vutium, Brno 2002, 203-206.
- [III] P. Šandera, J. Horníková, K. Slámečka: “3D rekonstrukce mikromorfologie lomové plochy ultrapevné oceli”. In: J. Kasl, P. Zuna (eds.) *Proc. Přínos metalografie pro řešení výrobních problémů*, ČVUT Praha & Škoda-výzkum Plzeň, Libverda 2002, 339-342.
- [IV] R. Nemeš, K. Slámečka, J. Pokluda: “Biaxial fatigue of high-strength low-alloy steel”. In: *Proc. Transcom, Section 5: Material Engineering and Mechanical Engineering Technologies*, ŽU v Žilině, Žilina 2003, 51-54.
- [V] K. Slámečka, I. Sabirov, J. Pokluda, R. Pippan: “3D morphology of fracture surfaces in bending-torsion fatigue”. In: *Proc. Transcom, Section 5: Material Engineering and Mechanical Engineering Technologies*, ŽU v Žilině, Žilina 2003, 55-58.
- [VI] K. Slámečka, J. Pokluda: “Stereofotogrammetrická analýza multiaxiálních lomových povrchů oceli ČSN 15 340”. In: M. Chalupová, A. Töröková (eds.) *Proc. Degradácia 03*, ŽU Žilina, Žilina 2003, 53-57.
- [VII] K. Slámečka, J. Pokluda: “Stereofotogrammetrická kvantitativní fraktografie a fraktální analýza biaxiálních únavových lomů”. In: I. Ptáčková (ed.) *Proc. FSI Junior konference 2003*, Vutium, Brno 2004.
- [VIII] J. Pokluda, R. Pippan, K. Slámečka, O. Kolednik: “Fatigue crack growth in metals under pure mode III: reality or fiction?” In: A. Carpinteri, L.P. Pook (eds.) *Proc. Fatigue Crack Paths (FCP 2003)*, University of Parma, Parma 2003, p. 92.
- [IX] K. Slámečka, J. Pokluda: “Analysis of fracture morphology and local loading modes in torsional fatigue”. *Mater. Sci. Forum* **482** (2005) 263-266.
- [X] K. Slámečka, J. Pokluda: “3D analysis of fatigue fracture morphology generated by combined bending-torsion”. In: *Proc. Advanced Fracture*

Mechanics for Life and Safety Assessments (ECF15), KTH, Stockholm 2004, CD.

- [XI] K. Slámečka, P. Ponižil, J. Pokluda, “Quantitative fractography in bending-torsion fatigue”. *Mater. Sci. Eng.*, přijato k publikaci.

Karel Slámečka

Curriculum Vitae

Osobní údaje

Datum a místo narození: 17. 6. 1977, Slavičín.

Adresa trvalého bydliště: Družstevní 79, 763 21 Slavičín.

Dosažené vzdělání

2001 – dosud: doktorské studium oboru Fyzikální a materiálové inženýrství na FSI VUT v Brně.

1999 – 2001: obor magisterského studia Přesná mechanika a optika na FSI VUT v Brně ukončený diplomovou prací „Životnost ocelových vzorků při kmitavém zatěžování kombinovaným ohybem a krutem“.

1998 – 1999: diferenční ročník na FSI VUT v Brně.

1995 – 1998: obor bakalářského studia Strojírenská technologie na FSI VUT v Brně ukončený bakalářskou prací „Návrh nástroje pro přesné stříhání“.

1991 – 1995: SOU ve Slavičíně ukončené maturitou.

Zaměstnání a pedagogická činnost

únor 2006 – dosud: technický pracovník na Ústavu fyzikálního inženýrství, FSI VUT v Brně.

2001 – 2004: výuka teoretických cvičení z předmětů „Fyzika I a II“.

Další projekty a zkušenosti

2005: roční studijní pobyt na Queen Mary, University of London (projekt Marie Curie Training Sites). Účast na výzkumu ve skupině prof. Z.X. Gua.

2002, 2003: dvoutýdenní a měsíční stáž na Erich Schmid Institute of Materials Science, Leoben.

2002: měsíční vzdělávací pobyt na Žilinskej univerzite v Žilině.

2002, 2003: úspěšně obhájena grant FSI VUT v Brně.

Odborné znalosti

Víceosá únava inženýrských materiálů, kvantitativní fraktografie, numerické modelování deformačních procesů, vývoj softwaru (Object Pascal, C++).

Abstract

The work is focused on the fractographical analysis of fatigue fracture surfaces generated under pure torsion, pure bending, and mixed bending-torsion loading of specimens made from high-strength low-alloy Cr-Al-Mo steel. The main objective was to examine a relationship between experimental loading and the fracture surface topography.

Based on observations and the quantitative study, it is concluded that both the complexity of the crack path and the frictional damage of mating fracture surfaces is rising with an increase in the torsion loading component (increasing loading parameter Z). The critical value of Z is estimated as $Z \sim 0,5$ (e.g. about 50% of torsion); after exceeding this value the increase of the surface roughness on the macroscopic level as well as of the intensity of frictional effects is very evident. For all investigated specimens the increase in roughness was also observed with an increasing distance of analysed region from the free surface; close to the surface, however, on the local level there is rather a low decrease. The significant result of the study of fracture facets generated under pure torsion loading is the evidence of Mode I support in all crack growth phases, which confirms a negligible importance of a pure mode III crack growth mechanism in fatigue of metallic materials.

Roughness of surface topography was evaluated by utilizing a number of parameters. Calculations were performed using the commercial system *MeX* and the original application *Profiler*, which is an important outcome of this work. It is concluded that parameters R_q , m_0 , H and R_L (or R_S in 3D) appear to be significantly sensitive to the analysed surface topography. Spectral character could be described using parameter β (or ζ_0 , ζ_n in 3D). The proposed set quantifies all fundamental aspects of surface topography and the extend of roughness characterization is a good compromise between too simplified description on one hand and unnecessarily complicated description on the other. Additionally, parameters R_z , γ_1 and γ_2 are recommended to be evaluated in some cases in order to acquire supplementary information.

Optical measurements carried out on a fracture surface generated under pure bending loading have shown comparative results as a former stereophotogrammetric technique and hence proved the usability of the device *Microprof100* in the fractographical research. The main advantage is an equidistant nature of topographical data that significantly facilitate subsequent mathematical processing.