

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojírenství

Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv integrity povrchu na mechanické vlastnosti

Autor: **Václav Auterský**

Vedoucí práce: **Doc. Dr. Ing. Antonín KRÍŽ**

Akademický rok 2011/2012

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování:

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu práce Doc. Dr. Ing. Antonínu Křížovi, za poskytnuté rady a čas při vypracování bakalářské práce. Dále Ing. Jiřímu Šimečkovi za provedení únavových zkoušek.

Také chci poděkovat své rodině za podporu.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Auterský	Jméno Václav	
STUDIJNÍ OBOR	2301R016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Dr. Ing. Kříž	Jméno Antonín	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Vliv integrity povrchu na mechanické vlastnosti		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2012
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	73	TEXTOVÁ ČÁST	55	GRAFICKÁ ČÁST	44
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Bakalářská práce se zabývá vztahem drsnosti povrchu a metod obrábění na únavové vlastnosti materiálu. Je rozdělena na teoretickou část kde je popsána integrita povrchu a prakticko část, kde byla provedeno měření drsností povrchu a únavové zkoušky.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">Integrita povrchu, drsnost povrchu, únava materiálu, ČSN 19 436</p>

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Auterský	Name Václav	
FIELD OF STUDY	2301R016 „Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Dr. Ing. Kříž.	Name Antonín	
INSTITUTION	ZČU - FST -KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Influence of surface integrity on the mechanical properties		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2012
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	73	TEXT PART	55	GRAPHICAL PART	44
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis deals with the relationship between surface roughness and machining methods for fatigue properties of the material. It is divided into a theoretical part where the integrity of the surface is described and a practical part, where it was necessary to measure surface roughness and fatigue tests.
KEY WORDS	Surface integrity, surface roughness, material fatigue ČSN 19 436

1.	Povrch a jeho definice.....	1
1.1.	Úvod.....	1
1.2.	Definice povrchu.....	1
1.3.	Povrch a jeho vytváření.....	2
1.3.1.	Fyzikální vlastnosti povrchu	3
1.3.2.	Povrch z geometrického hlediska.....	6
1.3.3.	Povrch z chemického hlediska	7
1.3.4.	Koroze.....	7
1.3.5.	Pasivace povrchu.....	8
1.4.	Vliv povrchu na vybrané vlastnosti.....	9
1.4.1.	Vliv na únav	9
1.4.2.	Únavové trhliny vycházející z povrchu.....	12
1.4.3.	Stabilní růst trhliny při vysokocyklové únavě.....	14
1.4.4.	Úpravy povrchu vedoucí ke zvýšení únavové pevnosti	14
1.4.5.	Vliv opotřebení na únavové vlastnosti	15
1.4.6.	Vliv na chemické vlastnosti	17
2.	Metody popisující stav povrchu ve vazbě na integritu povrchu.....	18
2.1.	Integrita povrchu.....	18
	Vnější vlivy na integritu povrchu	20
2.2.	20
2.3.	Mikrostruktura povrchu	20
2.4.	Mikrotvrdost	21
2.4.1.	Deformační zpevnění povrchové vrstvy.....	21
2.4.2.	Hodnocení rozložení hodnot mikrotvrdosti v povrchových vrstvách.....	21
2.5.	Zbytková napětí	23
2.5.1.	Druhy zbytkových napětí z hlediska rozsahu oblastí:	24
2.5.2.	Vliv zbytkového napětí na vlastnosti:	24
2.5.3.	Metody hodnocení zbytkového napětí.....	25
2.5.4.	Metoda RTG difrakce.....	27
2.5.5.	Metoda Barkhausenova šumu	28
2.5.6.	Metoda odvrátání povrchových vrstev	29
3.	Charakteristiky drsností a jejich hodnocení	31
3.1.	Optické metody měření.....	32
3.1.1.	Metoda světelného řezu.....	32
3.1.2.	Laserový konfokální mikroskop.....	33
3.2.	Nepřímá kvantitativní měření	33
3.3.	Dotykové profiloměry.....	33
3.4.	Základní pojmy drsnosti povrchu.....	33
3.5.	Normalizované charakteristiky drsnosti povrchu.....	37
3.5.1.	Střední aritmetická úchylka profilu R_a	37
3.5.2.	Výška nerovností profilu z deseti bodů R_z	38
3.5.3.	Největší výška nerovností profilu R_m	39
3.5.4.	Střední rozteč nerovností profilu S_m	39
3.5.5.	Střední rozteč místních výstupků S	40
3.5.6.	Nosný podíl t_p	40
3.6.	Nenormalizované charakteristiky drsnosti povrchu – výškové charakteristiky	41
3.6.1.	Střední kvadratická úchylka profilu R_q	41
3.6.2.	Střední výška nerovnosti profilu $y_{p \max}$	42
3.6.3.	Střední hloubka nerovností profilu $y_{v \max}$	42
3.6.4.	Stupeň plnosti profilu R	42
3.6.5.	Poměry hodnot výškových charakteristik	42
3.7.	Vybrané nenormalizované charakteristiky drsnosti povrchu v podélném směru profilu	42
3.7.1.	Střední aritmetická vlnová délka λ_a	42
3.7.2.	Střední kvadratická vlnová délka λ_q	43
4.	Experimentální část bakalářské práce	43
4.1.	Úvod.....	43
4.2.	Materiál.....	43
4.2.1.	Charakteristické vlastnosti a použití.....	45
4.3.	Zkušební vzorky.....	46

4.4.	Použité zařízení	47
4.5.	Měření vyvozeného momentu.....	49
4.6.	Dotykový profiloměr Marsurf M 300 [25].....	50
4.7.	Vnikací zkoušky.....	52
4.8.	Naměřené hodnoty drsností povrchů	52
	Průběh experimentu	59
4.9.	59
4.10.	Diskuse výsledků	60
4.10.1.	Měření drsnosti povrchu.....	60
4.10.2.	Únavové zkoušky	60
5.	Závěr	61
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:.....	61

1. Povrch a jeho definice

1.1. Úvod

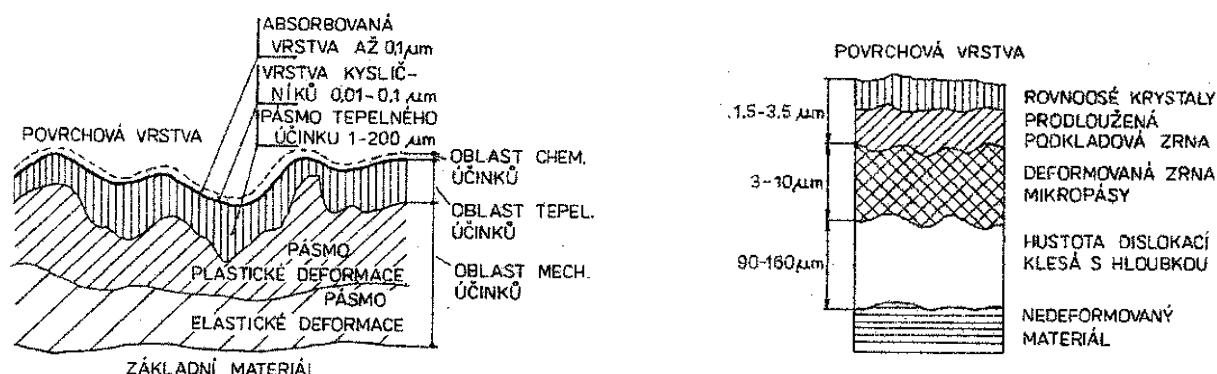
Povrch podmiňuje vzhled a do značné míry i funkčnost vyrobené a provozované součásti a je rozhraním, které je vystaveno interakci materiálu s okolním prostředím a tím i k její degradaci vlivem opotřebení, koroze a dalších vlivů. Povrch a podpovrchové vrstvy se velkou měrou podílejí na celkových vlastnostech součásti.

Je známým faktem, že více než 90% všech havárií strojních součástí je způsobeno únavovým poškozením. V tomto případě má povrch zásadní vliv na iniciaci únavového poškození, neboť toto poškození začíná nejčastěji na povrchu součásti. Iniciace únavového poškození je zejména u součástí namáhaných krutem nebo ohybem, kde jsou maximální hodnoty napětí právě na povrchu. V jiných případech se jedná o jiné vady ať už konstrukční – nevhodně zvolený zápich, strukturní – vyřádkované karbidy nebo metalografické – nedodržení předepsané teploty TZ, nebo dokonce přehřátí. Na jakosti povrchu také závisí přesnost chodu strojních součástí, jejich hlučnost, doba záběhu, ztráty třením, elektrická vodivost, přestup tepla, únavová pevnost odolnost proti opotřebení, koroze apod.

Dosud je stav povrchu nejčastěji hodnocen především pomocí charakteristik drsnosti a zkoumání povrchových a podpovrchových defektů. S rostoucími požadavky na strojní součásti, jejich spolehlivost a životnost jsou vyvíjeny metodiky, jejichž posláním je komplexní hodnocení stavu vytvořeného povrchu, které zohlední většinu degračních faktorů které působí v součinnosti. Tato souhrnná charakteristika je pojmenována jako integrita povrchu. Ta v sobě zahrnuje jak podmínky vzniku funkčního povrchu, tak i účinky použitých technologických postupů a jejich vliv na vlastnosti nově vytvořené plochy.

1.2. Definice povrchu

Povrchem tělesa lze obecně vnímat obálku makroskopického tělesa, která tvoří hranici mezi základním materiálem a okolím.



obr. 1 schéma změn v povrchové vrstvě [2]

Oblast	Hloubka	Funkční ovlivnění
horní monovrstva	0,1nm	adsorbce, chemická reaktivita
tenký film	0,1-100nm	odrazivost,tření,koroze,tepelná vodivost
vnější povrch	0,1-10 μ m	zpevnění,sturktura zrn, aerosol
silný film	>10 μ m	antikoroziní vrstvy, nátěry

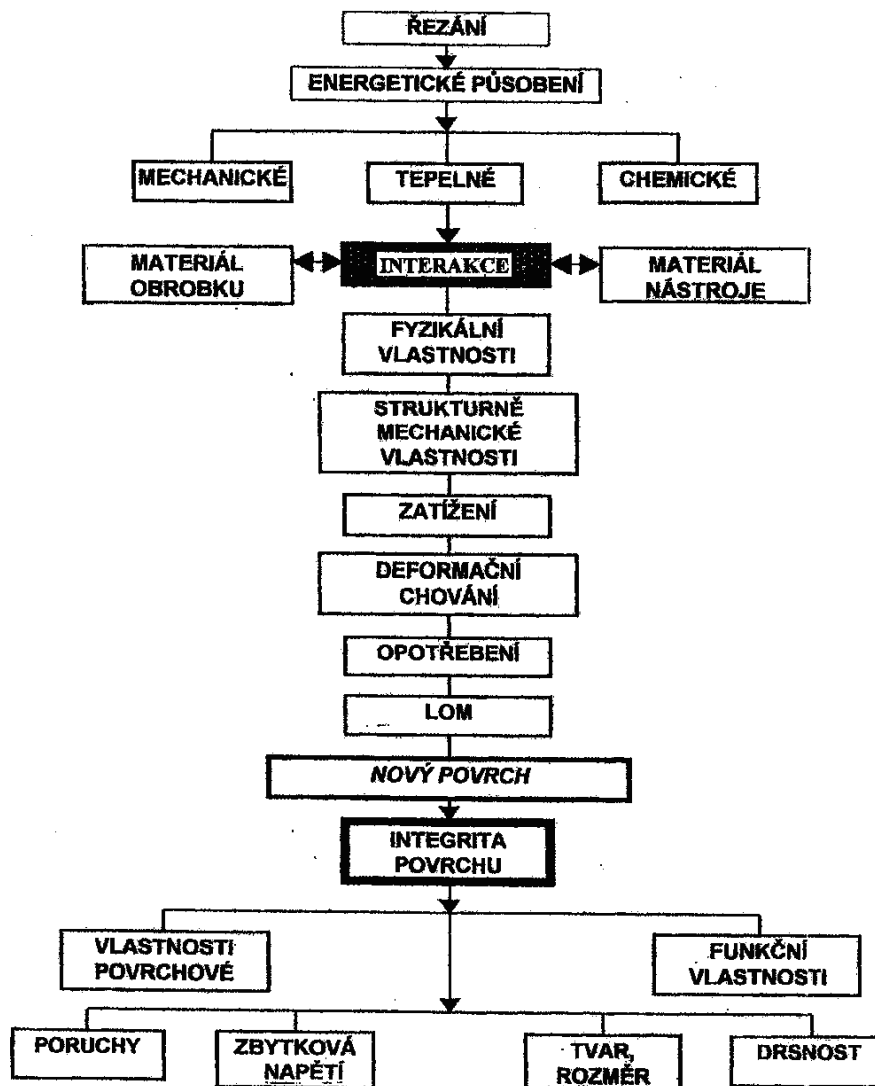
Tab. 1 oblasti povrchu [2]- to je tabulka

1.3. Povrch a jeho vytváření

Pro zabezpečení jakosti výrobku je nutné volit takové technologie výroby umožňující dosažení požadovaného tvaru, rozměru a požadovaných mechanických vlastností pro podmínky provozu. Výsledné vlastnosti povrchu a podpovrchových vrstev jsou odrazem procesů, které se podílely při jeho vytváření, ať už se jedná o odlévání, svařování, tváření obrábění nebo tepelné dělení.

Největší pozornost je nutno věnovat funkčním povrchům třískově obráběným, protože tato technologie je nejčastější dokončovací operací. U třískového obrábění dochází ke vzniku charakteristických nerovností vlivem vzájemného pohybu nástroje a obrobku. Podle požadavků na funkční plochy je nutno zvolit vhodné technologie třískového obrábění, popřípadě další povrchové úpravy.

Výsledný povrch je ovlivněn především technologií obrábění, řeznými podmínkami, materiálem a geometrií břitu řezného nástroje, tuhostí a pevností systému stroj – nástroj – obrobek – přípravek a řezným prostředím.



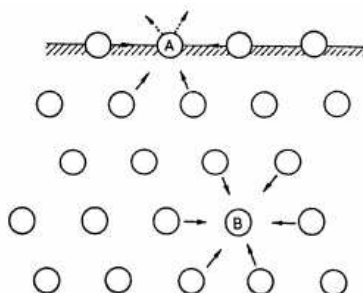
obr. 2 algoritmus vzniku povrchu při obrábění [2]

1.3.1. Fyzikální vlastnosti povrchu

Na povrchu pevné látky dochází ke skokové změně rozložení sil působících na atomy v krystalových mřížkách. Silové působení na atomy uvnitř objemu je v různých směrech vykompenzováno, zatímco na povrchu je toto silové působení jiné, jelikož se tyto atomy na povrchu nevyskytují viz obr. 3. Tím se struktura tenké povrchové vrstvy liší od struktury vnitřní.

Vlivem této rovnováhy dochází k několika jevům:

Relaxace – vychýlení atomů z jejich regulárních poloh uvnitř krystalu. Tato vzdálenost se mění v rovině povrchu a ve směru kolmém na povrch, uvádí se v procentech změny mezirovinné vzdálenosti. Velikost relaxace závisí především na krystalové struktuře a orientaci povrchu, prvkovém složení pevné látky a na teplotě.

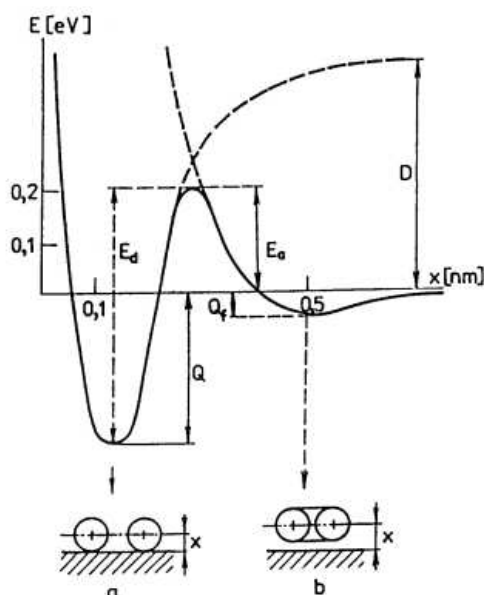


obr. 3 schéma působení sil na atomy[13]

Rekonstrukce povrchu – na rozdíl od relaxace dochází u rekonstrukce nejen k změně vzdáleností a mezivazebných úhlů k přeskupení atomů. Vlivem nestability krystalové plochy na povrchu dojde přerušování starých vazeb a vzniku nových, než jaké by měla tato rovina uvnitř objemu.

Dynamika struktury povrchu - atomy na povrchu pevné látky jsou ve svých středních polohách drženy menšími silami než atomy uvnitř. Tím je jim snadněji umožněn translační pohyb, kterým probíhá difuze a proto tato na povrchu probíhá několikanásobně rychleji než uvnitř objemu při stejné teplotě. Díky vyšší energii atomů na povrchu může dojít ke změně jejich konfigurace a vzniknou obecně jiné struktury než v objemu. Ty mohou zůstat na povrchu v tenkých vrstvách nebo se stanou zárodkem objemové transformace, která bude nadále postupovat do objemu.

Adsorpce – při adsorpci částice přímo neprochází skrz povrch, ale pouze jsou zachyceny na rozhraní. Vlivem nenasytění povrchové vrstvy atomů dochází k akumulaci atomů plynů u povrchu. Podle toho jaké silové poměry vznikají mezi adsorbátorem a adsorbentem (substrát pevné látky) je rozlišováno na chemisorpci a fyziosorbci. Při chemisorpci dochází k chemické reakci – přenosem nebo sdílením elektronu pouze mezi určitými molekulami. Chemisorpce nemůže proběhnout na libovolném místě. K tomu je potřeba aktivační energie a tato reakce je většinou exotermní. Na povrchu vznikne pouze jedna vrstva adsorbovaných částic a tento děj je nevratný. Na nově vzniklé monovrstvě se fyzikálními vazbami (van der Waalsovy síly) postupně vytvoří více vrstev – fyzikální adsorpce. Probíhá velmi rychle, zpravidla za nižších teplot na rozdíl od chemisorpce bez aktivační energie a v celém povrchu.



obr. 4 křivka potenciální energie E pro jednodimenzionální model a dvouatomovou molekulu / x - vzdálenost od povrchu, E_a - aktivační energie chemisorpce, E_d - aktivační energie desorpce, Q - adsorpční teplo chemisorpce, Q_f adsorpční teplo fyzikální adsorpce, D - disociační energie molekuly/ a- chemisorbované atomy, b-fyzikálně adsorbovaná molekula [13]

Absorpce - je proces při kterém přecházejí atomy přes rozhraní pevné látky směrem dovnitř. Tohoto procesu je využíváno například u procesu nitridace, kdy difunduje dusík z pecní atmosféry do povrchové vrstvy výrobku.

Emise – výstup elektronů z povrchu. K tomu je zapotřebí určitého množství energie (výstupní práce) k překonání energetické bariéry, obecně zvýšením kinetické energie elektronů na povrchu alespoň na hodnotu výstupní práce. energii pro výstup elektronu lze dodat čtyřmi způsoby:

Dodáním tepelné energie – rozžhavení pevné látky

Sekundární emise – dopad jiného elektronu zvenčí

Fotoelektronová emise – energie získaná pohlcením světelné částice – fotonu

Vlivem silného elektrického pole (tunelová emise)

Absorpce záření – při dopadu elektromagnetického vlnění se část energie se odrazí, část pohltí a část projde. Podíl prošlé energie neuvažujeme, protože je nevýznamný a z bylé dvě části dáváme do poměru – poměrná odrazivost ρ a poměrná pohltivost α . Poměrná pohltivost má velký význam například u přeměny sluneční energie na teplo, kde požadujeme vysokou pohltivost v oblasti infračerveného záření a nízké emisivitě. Absorpční a odrazivé vlastnosti povrchu kovů mají velký význam u použití laserového záření. Při tepelném zpracování laserem je požadována co nejnižší součinitel odrazivosti.

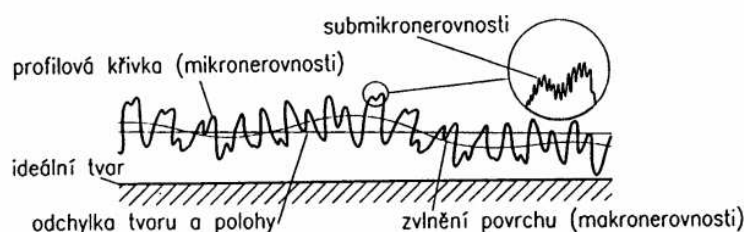
Elektrické vlastnosti – při průchodu elektrického vodiče součástí hraje povrch u přechodu proudu v místě styku vodičů značnou roli, neboť v tomto místě dochází k zvýšení proudové hustoty a též odporu. To způsobuje lokální nárůst teploty a v kombinaci s tlakovým zatížením může dojít ke svaření. S rostoucím objemem povlaků oxidů a jiných příměsí (sulfidy, chloridy) vzrůstá elektrický odpor.

Optické vlastnosti – odlesk a barva povrchu se odvíjí od délky elektromagnetického vlnění, jeho odrazem, lomem a absorpcí a interakce záření s pevnou látkou. Dokonalý odraz světla dosáhneme u kovových ploch jejichž nerovnosti a nepravidelnosti budou alespoň o jeden řád nižší než nejkratší vlnová délka dopadajícího světla. Této vlastnosti můžeme využít při hodnocení drsnosti povrchu pouhým okem. Pokud se bude plocha předmětu bude lesknout její hodnota Ra bude menší než 0,039 μm . [8]

1.3.2. Povrch z geometrického hlediska

Geometrické vlastnosti povrchu jsou pro výslednou funkci součásti často rozhodující (např. v optice, nebo při namáhání abrazí).

„Textura povrchu zahrnuje drsnost, vlnitost i tvarovou úchylku sledovaného povrchu. Rozdíly mezi těmito charakteristikami jsou dány poměrem rozteče nerovností k jejich výšce. U drsnosti je to poměr 1 - 50, u vlnitosti je to poměr 50 - 1000, u tvarové úchylky povrchu je to hodnota nad 1000.“ [2]



obr. 5 základní pojmy z geometrie povrchu [8]

Zajímavý pohled přináší vztah mezi poměrem plochy povrchu součásti S vůči objemu součásti V . U masivních objektů s malým poměrem S/V jsou fyzikální a chemické vlastnosti ovlivněny především základním materiálem, naopak u malých objektů s velkým poměrem $S:V$ (plechy) jsou jejich vlastnosti výrazně ovlivněny vlastností povrchu. [2]

Těchto vlastností se využívá například u ocelových lan nebo elektrických vodičů. Pro pevnost ocelového lana je výhodnější vyrobit lano o ze svazku slabších drátů než kdyby bylo z jednoho prutu velkého průřezu.[16]

Z hlediska tuhosti součásti je rozhodující poměr plochy ku objemu. Čím bude tento poměr nižší, tím bude součást tužší. Tento nejmenší poměr a zároveň největší tuhost má koule.

1.3.3. Povrch z chemického hlediska

Sledování povrchu z chemického hlediska má velký význam, neboť chemické vlastnosti povrchu a jeho reaktivita mají značnou váhu při samotné volbě materiálu. Na rozhraní povrchu pevné látky dochází vlivem styku s kapalnými a plynnými fázemi ke změnám chemického složení nebo oxidačních stavů prvků. Čistý povrch kovů bude reagovat s okolím. A do jaké míry závisí zejména na elektronegativitě a oxidačních stavech prvků na fázovém rozhraní materiál x okolní prostředí, teplotě a reaktivitě. Tyto procesy mohou být žádoucí, například při aplikaci tenkých vrstev, chemicko-tepelném zpracování nebo při pokovováním

kdy je uměle řízeno reakční prostředí, ale také k nežádoucím degradačním procesům jako je koroze.

1.3.4. Koroze

„Korozi lze definovat jako samovolně probíhající nevratný proces postupného narušování a znehodnocování materiálů chemickými a fyzikálně-chemickými vlivy prostředí.“ [8]

Koroze se zdaleka neomezuje pouze na kovy a jejich vzájemné slitiny, ale také ostatní materiály používané v inženýrské praxi (plasty, beton, sklo). Degradace koroze se projevuje od změny odlesku a barvy až po úplnou destrukci součásti.



Povrch vyvrtané litiny ČSN 422420 - oblast 1 – pouze vrtáno; oblast 2 – přechodová oblast do tvářeného povrchu; oblast 3 tvářený povrch; 4 – zahlazený povrch.

obr. 6 příklad korozní odolnosti v závislosti na tvorbě povrchu [6]

Chemická koroze – probíhá v plynech či kapalinách s oxidační nebo redukční povahou. Na povrchu se objevují vrstvy oxidačních produktů a na kvalitě těchto produktů bude záviset šíření koroze a její rychlost. Produktem jsou nejčastěji oxidy kovů, popřípadě jiné sloučeniny (sírany, uhličitany nebo chloridy).

Koroze redukčními plyny – je způsobována difúzí redukčních plynů a reakcí s nekovovými prvky (například reakce vodíku s uhlíkem) bez vzniku korozních zplodin. Vlivem toho dochází k změnám chemického složení (oduhličení) nebo k vodíkovému praskání, neboť atomární vodík v oceli snadno difunduje do oceli, kde se většinou hromadí v pórech či bublinách a snižuje energii hranic zrn.

Elektrochemická koroze – je umožněna přítomností iontů, které vznikly disociací korozního prostředí (styk kovů s elektrolytem). Zároveň dochází k anodické oxidaci kovu a katodické redukci složek korozního prostředí nebo redukci kyslíku rozpuštěného v elektrolytu.

Proces koroze je kombinace dějů anodické oxidace (rozpuštění kovů) a katodické redukce (většinou redukce kyslíku nebo vylučování vodíku). Na povrchu kovu dochází k ionizaci atomů a ionty přecházejí do elektricky vodivého roztoku – elektrolytu. „Snadnost, s jakou atom kovu ztrácí elektrony a přechází do roztoku, nazýváme ušlechtilostí a lze její hodnotu pokládat za jednu u chemických vlastností kovového povrchu. Je určena standardním potenciálem.“ [8]

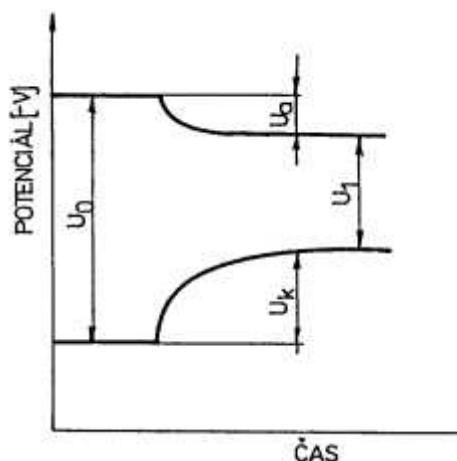
U většiny kovových povrchů dochází k anodickému rozpouštění v aktivním stavu. Nejsou pokryty žádným filmem. Zde jsou změny povrchu u polykrystalických kovů ovlivněny

strukturou povrchových vrstev a orientací zrn. Na povrchu se vytváří oxidy, které následně zpomalují přechod iontů kovu do roztoku a anionů z elektrolytu na povrch kovu.

Mezi záporně nabitým povrchem a kladně nabitým elektrolytem dochází ke vzniku potenciálního rozdílu. Velikost tohoto rozdílu nedovedeme stanovit, ale obvykle stanovíme potenciální rozdíl mezi kovem a srovnávací elektrodou (platinový plíšek povlečený platinovou černí nasycenou vodíkem). Standardním potenciálem charakterizujeme ochotu iontů přecházet z atomů kovu do roztoku – ušlechtilost kovu. Kovy s negativním potenciálem (neušlechtilé) mají nejmenší korozní odolnost, oproti kovům s kladným potenciálem (ušlechtilé). Tyto rozdíly v potenciálu se postupem času ustalují, dochází ke zpomalování koroze a tzv. polarizaci – zmenšení potenciálního rozdílu mezi anodou a katodou.

1.3.5. Pasivace povrchu

U některých kovů s vysokým záporným potenciálem, například hliníku, se vytváří ochranná vrstva z oxidu kovu a elektrolytu, přičemž tento oxid je ušlechtilější než původní kov a zpomaluje nebo dokonce zastaví korozi. Tento proces se nazývá pasivací a je významný u materiálu jako nerezová ocel, nikl, titan a hliník a hliníkové slitiny. [8]



obr. 7 schéma změny potencionálů elektrod / U_0 – počáteční rozdíl napětí mezi anodou a katodou, U_1 – ustálený rozdíl, U_k katodová polarizace, U_a anodová polarizace [8]

Ušlechtilost kovů – vyjadřuje ochotu iontů přecházet z atomů kovu do roztoku. Vyjadřuje se pomocí standardního potenciálu. Kovy s kladným potenciálem považujeme za ušlechtilé viz Tab2

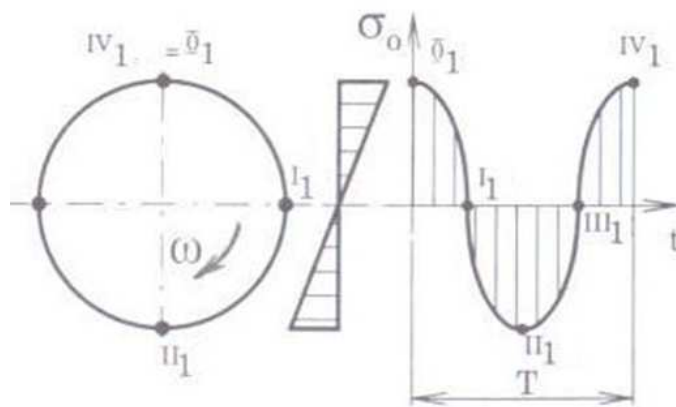
kov	potenciál / V /	kov	potenciál /V/
Sodík	- 2,71	Cín	- 0,14
Hořčík	- 1,55	Olovo	- 0,12
Hliník	- 1,33	Vodík	0,00
Zinek	- 0,76	Antimon	+ 0,20
Chrom	- 0,56	Měď	+ 0,34
Železo	- 0,44	Stříbro	+ 0,80
Kadmium	- 0,40	Rtuť	+ 0,86
Kobalt	- 0,29	Zlato	+ 1,36
Nikl	- 0,23		

Tab. 2 standardní elektrodové potenciály některých kovů v kyselém prostředí [8]

1.4. Vliv povrchu na vybrané vlastnosti

1.4.1. Vliv na únav

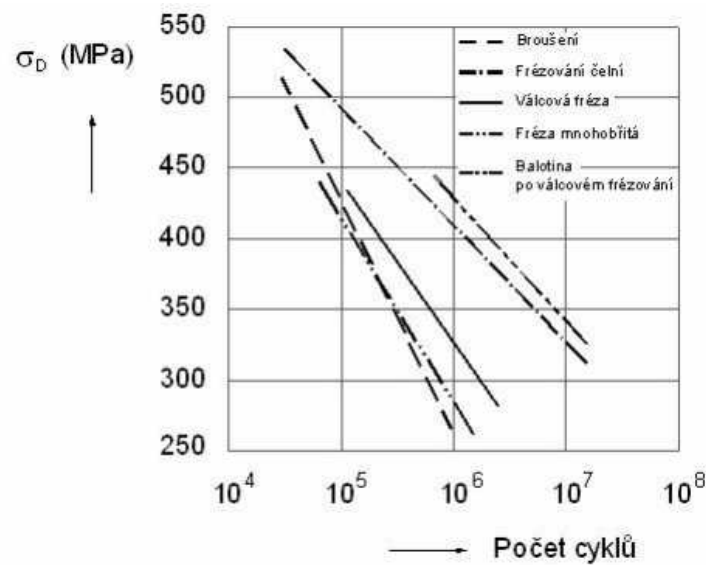
Únava materiálu způsobuje více než 90% všech lomů na strojních součástích a konstrukcích. Její základní příčinou je dynamické zatížení provozovaných součástí. Dobrým příkladem je například cyklické zatížení hřídelí na dopravním prostředku.



obr. 8 průběh napětí na hřídeli [15]

Při každé otáčce hřídele dochází ke změně napětí z maximálního tlakového k odlehčení na nulové napětí a následně přejde po stejné funkci na maximální tlakové. V ideálním případě v ose zůstává nulové namáhání, ale s větší vzdáleností od středu osy toto napětí roste. Na povrchu bude dosahovat maximálních hodnot. Proto má kvalita povrchu a podpovrchových vrstev velký vliv na celkovou životnost součásti jelikož únavový lom vzniká obvykle na povrchu nebo těsně pod povrchem. Tyto změny napětí mají velmi nepříznivý vliv na únavové vlastnosti provozované součásti. Typické pro tento typ degradace

je že vzniká při nižším zatížení než jaké je jeho mez kluzu. Zde je nutno definovat tzv.: mez únavy. Mez únavy je tedy definována jako maximální zatížení, které snese materiál při určitém počtu zatěžovacích cyklů, aniž by došlo k jeho porušení.



obr. 9 průběh meze únavy v závislosti na metodě dokončování [5]

Při stanovení meze únavy je jedním z faktorů součinitel jakosti povrchu η_p

$$\sigma_c^* = \sigma_c \frac{\eta_p v}{\beta} \cdot \kappa$$

σ_c^* - snížená (základní) mez únavy

σ_c - základní mez únavy

součinitel vrubu $\beta = f(\alpha, \eta_C)$

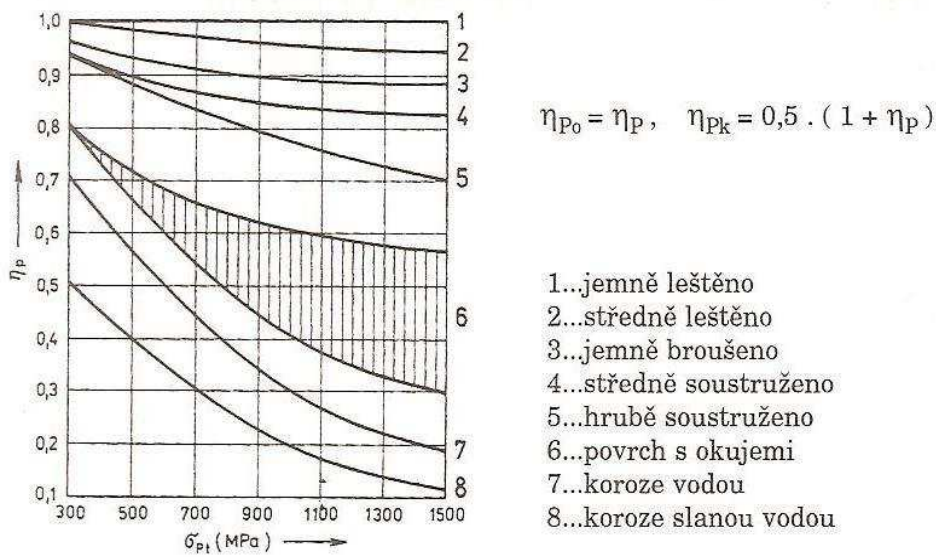
součinitel tvaru α

součinitel materiálu η_C

součinitel velikosti v

součinitel zpevnění povrchu κ

[15]

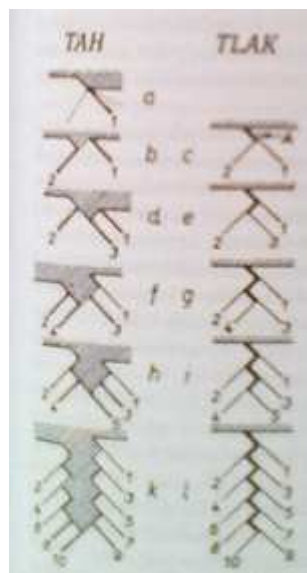


obr. 10 vliv součinitele jakosti povrchu[15]

1.4.2. Únavové trhliny vycházející z povrchu

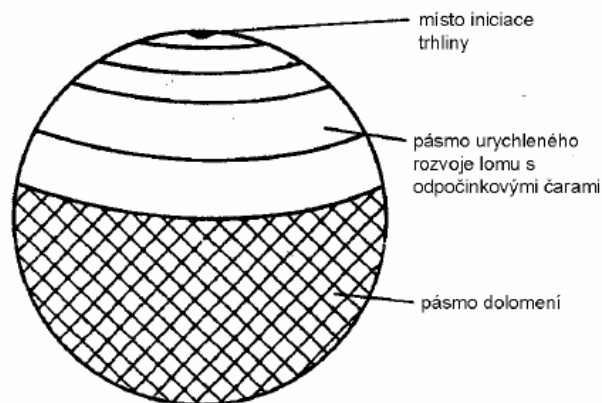
Příčinou vzniku únavových trhlin na povrchu a v podpovrchové vrstvě je nejčastěji nerovnoměrnost rozložení napětí. Tuto nerovnoměrnost způsobují makroskopické koncentrátoři napětí, především konstrukční vruby a povrchové nerovnosti z mikrogeometrie povrchu.

Při cyklickém zatěžování vznikají nové trhliny, které se následně zvětšují s přibývajícím počtem cyklů střídavého namáhání. Uvnitř objemového materiálu brání šíření trhliny a posunu krystalů dislokace, na povrchu součásti brání posunu pouze povrchové napětí.

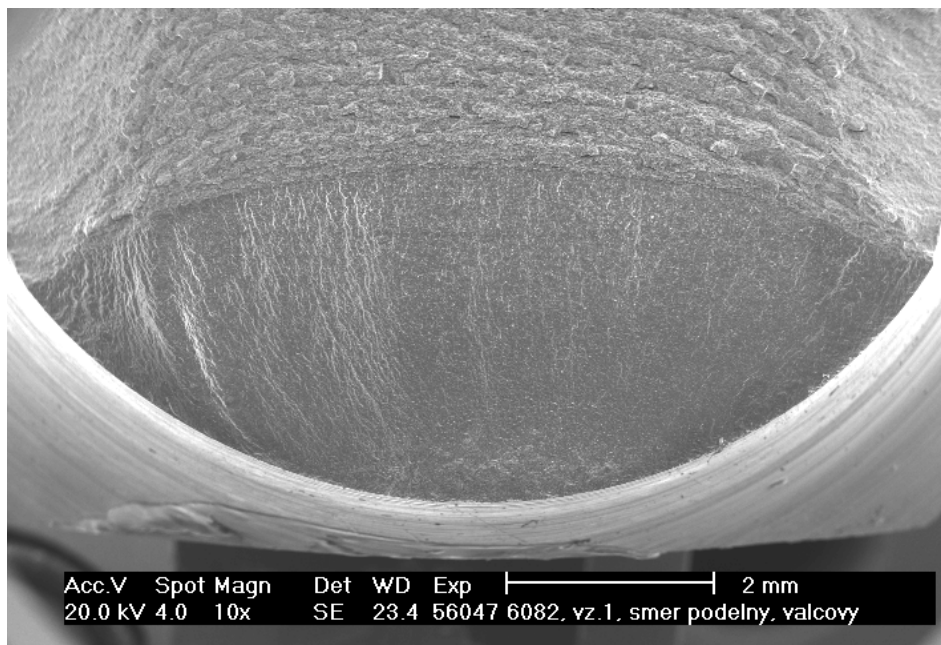


obr. 11 Příklad mechanismu šíření trhliny[13]

Únava vzniká též přemístěním pole dislokací. Destrukce součásti začíná při prvním zatěžovacím cyklu, kdy nejprve dochází ke změnám mechanických vlastností v důsledku kumulace plastické deformace a změně hustoty a poloh dislokací v materiálu. Materiál mění svoje mechanické vlastnosti, cyklicky se změkčuje nebo naopak zpevňuje. Dále dochází k výše popisovanému vzniku mikrotrhlin, které rostou a vlivem nerovnoměrného rozložení napětí a deformace se některá z nich stane trhlinou řídicí. Překročením kritického napětí ve zbytku součásti dojde k lomu a destrukci materiálu.



obr. 12 průřez materiálu po únavovém lomu



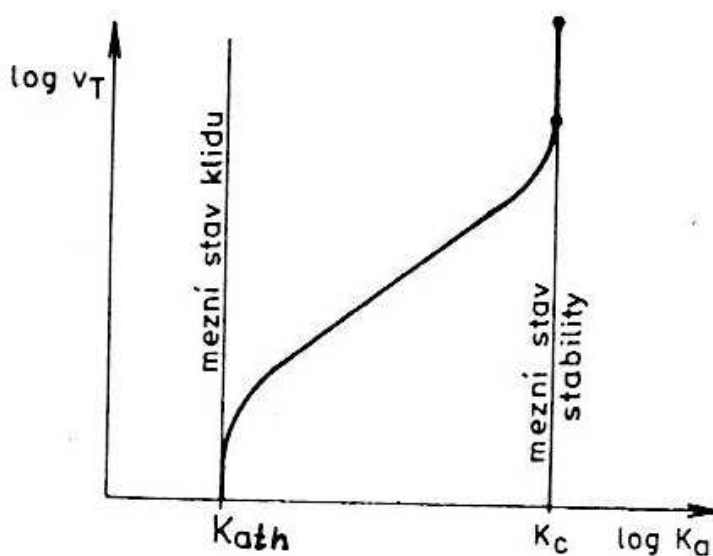
obr. 13– příklad únavové lomové plochy hliníkové slitiny 6082 [26]

1.4.3. Stabilní růst trhliny při vysokocyklové únavě

„Rychlost růstu trhliny je funkcí faktoru intenzity napětí K_I . Mezi jeho prahovou hodnotou a hodnotou lomové houževnatosti ji lze popsat lineárním vztahem (v logaritmických souřadnicích, viz obr.14), který po odlogaritmování vede na exponenciální vztah označovaný jako Paris-Erdoganův:

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K_I)^m$$

V něm konstanty c, m závisí na materiálu a charakteru zátěžného cyklu. Pak je možné integrací určit počet definovaných zátěžných cyklů, které může součást absolvovat, než trhlina dosáhne kritické nebo přípustné délky.“ [7]



obr. 14 graf růstu stabilní trhliny [7]

1.4.4. Úpravy povrchu vedoucí ke zvýšení únavové pevnosti

Prodloužení životnosti lze docílit pomocí mechanických a chemických úprav povrchu. Deformací povrchu a vnesení vnitřního napětí do materiálu dojde ke zvýšení pevnosti pouze do určité hloubky a zároveň si materiál zachová houževnaté jádro. Mezi mechanické patří například válečkování nebo kuličkování. Z chemické povrchové úpravy – chemicko-tepelné zpracování. Při chemicko-tepelném zpracování jsou vytvářeny povrchové vrstvy, jejichž chemické složení a mechanické vlastnosti se liší od základního materiálu. Toho se docílí difúzním sycením povrchové vrstvy určitými prvky, z určitého prostředí, které může být pevné, kapalné nebo plynné. Požadované vlastnosti získáme buď přímo obohacením povrchové vrstvy konkrétním prvkem za vysokých teplot, nebo následujícím tepelným zpracováním (nejčastěji kalení a popouštění). Mezi tyto metody patří například cementování, nitridování, nitrocementování, nebo karbonitridování.

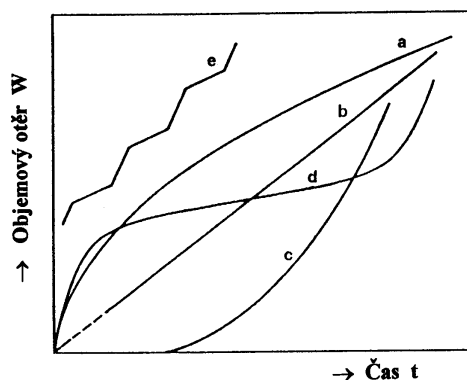
1.4.5. Vliv opotřebení na únavové vlastnosti

Opotřebení – rozrušování povrchu vlivem přemísťování nebo úplného odstraňování částí vrchních vrstev z povrchu materiálu při styku funkčního povrchu mechanickým účinkem a dochází ke vzniku trhlin a po následném odtržení částic se odhalí nový povrch. V některých případech může dojít k odtržení, překlopení a následnému „nalepení“ na povrch.

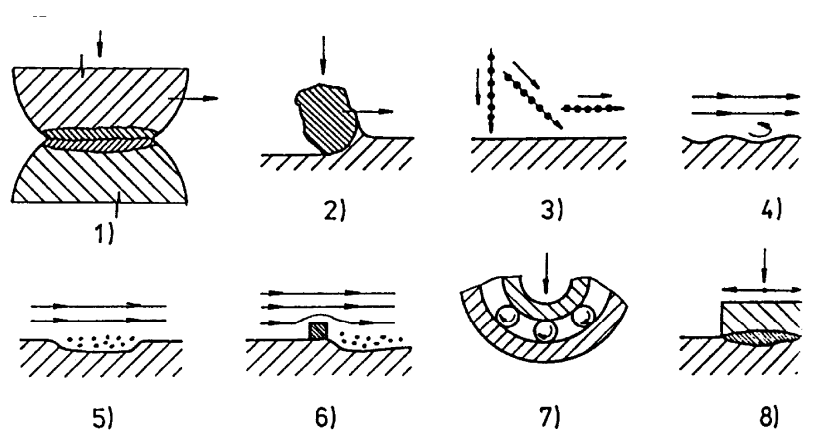
Jednou z možností jak hodnotit opotřebení, například pomocí objemového ořezu úbytek materiálu vztažený na jednotku délky W [$m^3 \cdot m^{-1}$]. Časová rychlost ořezu závisí především na působící normálové síle, kontaktní ploše a její drsnosti, relativní rychlostí mezi funkční plochou a působícím média a druhem tření.

Opotřebení se obecně projevuje:

- mikroplastickou deformací vyvolanou zatlačováním tvrdých částic do měkčího povrchu druhého členu
- únavou povrchových vrstev při opakovaném rázovém zatížení
- vznikem oxidů, který je podporován mikroplastickou deformací a zvýšení teploty v místě dotyku materiálů
- změnou struktury
- aktivací povrchových vrstev materiálu.



obr. 15 schéma závislosti objemového opotřebení W na čase /a-záběh kluzné dvojice, b-lineární závislost (charakteristická pro abrazi), c-průběh prokavitaci a únavové opotřebení, d-kombinace záběhu,ustáleného a progresivního opotřebení, e-periodické zvyšování intenzity opotřebení povrchu/ [8]



obr. 16 schéma různého poškození materiálu opotřebením /1- adhezivní, 2- abrazivní, 3,4- erozivní, 5,6- kavitační, 7- únavové, 8- vibrační/ [8]

Rozdělení opotřebení:

Adhezivní – nejčastější případ, vlivem velkých meziatomových sil mezi povrchy nastává vytrhávání částic povrchu a přenesení na jiný povrch případně odpadnutí. U velkých tlaků a teplot mezi může dojít k zadírání – lokálnímu svaření dvou materiálů

Abrazivní – oddělování části povrchů nerovnostmi druhého povrchu nebo tvrdšími částicemi které se pohybují mezi třecími plochami

Erozivní – opotřebení vlivem kontaktu pevných částic unášených v kapalině nebo plynu. Při opotřebení záleží zejména na úhlu a rychlosti dopadu částice, její velikosti, tvaru, tvrdosti a na druhu a teplotě média. Částice opakovaně naráží do povrchu a jejich kinetická energie se mění v deformační práci. Nárazy částic mají charakter únavového zatěžování. Pro malé úhly dopadu jsou vhodné tvrdé materiály (kalená ocel), naopak pro velké úhly jsou vhodné houževnaté materiály (pryž, měkká ocel), které bez porušení absorbují kinetickou energii dopadajících částic.

Kavitační – vzniká působením dynamických účinků vyvolaných vznikem a zánikem bublin vyplněných sytou párou v místech s náhlým poklesem tlaku kapaliny pod tlak syté páry a opětovného nárůstu na tlak syté páry. Vznik mechanických sil popisují dva modely:

Náraz sférických tlakových vln a náraz paprsků kapaliny.

Únavové – při opakovaném styku dvou těles, kde dochází k působení tečných a normálových sil. Velkou roli hraje velikost tečných napětí a orientace jejich rovin, kde působí maximální smyková napětí. Ty mohou vést k únavovému porušení. Dochází ke zdrsnění povrchu a šíření trhlin v rovnoběžném směru s plochou povrchu a způsobují odlupování částic kovu.

Vibrační – někdy také označováno jako třecí únava nebo vibrační koroze. Vibrační opotřebení vzniká v místech styku dvou materiálů při jejich vzájemném kmitavém pohybu o různé amplitudě, frekvenci a proměnlivém zatížení. Opotřebení probíhá za současného působení abraze, adheze a oxidace.

[8]

1.4.6. Vliv na chemické vlastnosti

Při kombinaci mechanického namáhání a nepříznivých korozních podmínek dochází k urychlení postupu koroze a toto následně ovlivňuje mechanické a únavové vlastnosti. Podle druhu zatížení lze rozdělit na: korozní praskání a korozní únavu.

Korozní praskání je definováno jako kombinace statického zatížení při současném působení korozního prostředí. Toto zatížení může být vyvolané z vnějšku (natahování součástí) nebo z vnitřního pnutí (po tváření za studena či svařování). Praskání se projevuje šířením trhlin po hranicích zrn nebo přes zrna. Čisté kovy jsou v tomto ohledu nejodolnější a s rostoucí homogenitou materiálu klesá náchylnost k praskání.

Na rozdíl od korozního praskání, u korozní únavy působí cyklické zatížení. Mez únavy se snižuje v závislosti na frekvenci namáhání a době působení agresivního prostředí. Pokud bude frekvence příliš vysoká, bude převažovat mechanická úrava. Korozní úrava se projevuje při relativně nižším počtu cyklů. Každá nehomogenita povrchu (vrub, vměstek) zvyšuje lokální koncentraci napětí. V těchto místech jsou snadno iniciovány trhliny a dochází k opakovanému narušování křehké pasivační vrstvy. Pokud nebude umožněno nově odkryté části povrchu vzniklé trhliny dostatečně obnovovat pasivační vrstvu, koroze bude postupovat do objemu součásti.



obr. 17 korozní úrava nástrojové oceli [21]

2. Metody popisující stav povrchu ve vazbě na integritu povrchu

2.1. Integrita povrchu

Mechanismus vzniku nového povrchu se velmi podílí na jeho kvalitě, budoucím chování a vlastnostech. Při jeho vytváření dojde ovlivnění určitého pásma pod povrchem.

Tato oblast má rozdílné fyzikální a chemické vlastnosti než zbylý objem materiálu a je dána do vztahu pro budoucí jakost spolehlivost a životnost součástí.

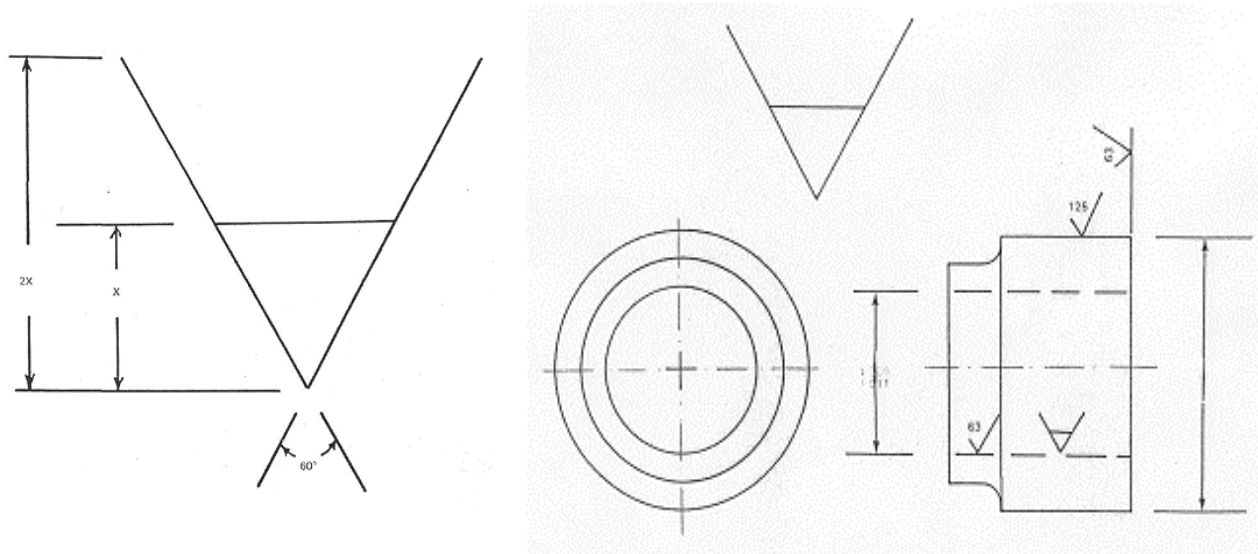
Pojem integrita povrchu „IP“ byla zavedena Fieldem a Kahlesem roku 1964. Byla definována jako „podstatná nebo zdokonalená podmínka vyrobeného povrchu při obrábění, nebo jiných technologických operacích“.

„Integrita povrchu je proto odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká, bere v úvahu důsledky působení technologických metod na jakost obrobene plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek.“ [5]

Aspekty IP jsou postihovány například normou ANSI B211.1 z roku 1986.

Minimální soubor údajů IP	Standardní soubor údajů IP	Rozšířený soubor údajů IP
Povrchová úprava Snímky mikrostruktury (10x nebo více) Mikrotrhliny Sledování stavu makrotrhlin Mikrostruktura Mikrotrhliny Plastická deformace Fázové přeměny Drsnost povrchu Chemicko tepelné změny Snímky po vybraném leptání Mikrotvrdost	Minimální soubor dat IP Únavové zkoušky Korozní únava Hodnocení zbytkového napětí	Standardní soubor údajů IP Další mechanické zkoušky Pevnost v tahu Zkoušky tečení Jiné specifické zkoušky (hodnocení třecích a kluzných vlastností, těsnicí vlastnosti)

Tab. 3 rozdílné soubory dat integrity povrchu [3]



obr. 18 symbol integrity povrchu a označení na výkrese [6]

DRUH ÚČINKU (Efektu)	Podmínky (obrábění)	Maximální dosažená hloubka efektu							
		soustružení nebo frézování	vrtání	broušení	chemické obrábění	elektro- chemické obrábění	elektro- chemické broušení	elektro- jiskrové obrábění	obrábění laserovým paprskem
Mechanické změny materiálu									
Plastická deformace	na čisto	0,043	0,020	0,008	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
	na hrubo	0,076	0,119	0,089	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Plasticky deform. částice	na čisto	xxx	xxx	0,013	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
	na hrubo	xxx	xxx	0,033	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Změny Tvrdosti 1)	na čisto	0,013	0,025	0,038	0,025	0,036	0,018	0,025	-
	na hrubo	0,127	0,508	0,254	0,079	0,051	0,038	0,203	-
Mikro a makro trhliny	na čisto	0,013	0,013	0,013	xxx	0,008	0,000	0,013	0,015
	na hrubo	0,038	0,038	0,229	xxx	0,038	0,025	0,178	0,102
Zbytkové napětí 2)	na čisto	0,152	-	0,013	0,025	0,000	0,000	0,051	0,005
	na hrubo	0,356	-	0,318	0,025	0,000	0,000	0,076	-
Metalurgické změny materiálu									
Rekrystalizace	na čisto	-	-	0,013	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
	na hrubo	-	-	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Interkryst. napadení	na čisto	xxx	xxx	xxx	0,008	0,008	0,000	xxx	xxx
	na hrubo	xxx	xxx	xxx	0,152	0,038	-	xxx	xxx
Selekt.leptání póry,výčnělky	na čisto	0,010	-	0,005	0,015	0,010	0,003	0,013	-
	na hrubo	0,025	0,076	0,010	0,038	0,064	0,013	0,041	-
Metalurgické transformace	na čisto	0,010	0,038	0,013	-	0,000	0,003	0,015	0,015
	na hrubo	0,076	0,508	0,152	-	0,005	0,008	0,127	0,038
Teplem ovliv. oblasti	na čisto	0,003	-	0,018	xxx	xxx	xxx	0,015	0,015
	na hrubo	0,025	0,076	0,318	xxx	xxx	xxx	0,127	0,038

Tab. 4 srovnání hloubek jednotlivých efektů integrity povrchu [6]

2.2. Vnější vlivy na integritu povrchu

- Mechanické – provozní napětí
- Chemické – koroze, reakce mezi nástrojem a obrobkem
- Fyzikální – záření, bludné proudy
- Kombinace – tepelné zpracování, obrábění, tváření, koroze pod napětím

2.3. Mikrostruktura povrchu

Mikrostruktura povrchu se hodnotí pomocí metalografických výbrusů, které se provádí v rovině kolmé k obráběnému povrchu. Zde je možné hodnotit změnu stavu povrchu po odlomení třísky v porovnání s neovlivněným jádrem, např. změny struktury vlivem obrábění, trhliny, praskliny, chemicko-tepelné změny, vyhřátí povrchové vrstvy. Hodnocení je prováděno na světelném mikroskopu a bývá doplněno měřením hodnot mikrotvrdosti. [2]

2.4. Mikrotvrdost

2.4.1. Deformační zpevnění povrchové vrstvy

Působením síly na plochu povrchu vznikají tečná a podélná napětí na které materiál reaguje změnou napjatosti a elasticko-plastickou deformací. Deformace materiálu je umožněna pohybem dislokací v kluzných rovinách krystalové mřížky. S postupující deformací roste počet dislokací a hustota dislokací, vzdálenost mezi nimi se zmenšuje a dislokace se budou vzájemně omezovat a bránit si v pohybu. Tímto dojde k postupnému zpevňování materiálu, snížení tažnosti a práce na další přetvoření bude vyšší. S rostoucí pevností se zvyšuje tvrdost – schopnost materiálu odolat pronikání cizího tělesa do povrchové vrstvy.

„Hloubka zpevnění je definována jako vzdálenost od povrchu, ve které již nedochází ke změně mikrotvrdosti.“ [2]

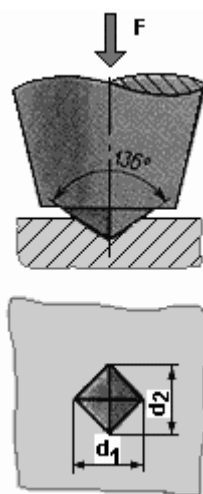
Při obrábění oceli v měkkém stavu může dojít k nárůstu tvrdosti několikanásobně vůči základnímu materiál.

Deformační zpevnění je často komerčně využíváno ke zvýšení pevnosti celého objemu materiálu nebo alespoň jeho povrchové vrstvy (např. protahování drátů).

2.4.2. Hodnocení rozložení hodnot mikrotvrdosti v povrchových vrstvách

K hodnocení mikrotvrdosti se používají přístroje – mikrotvrdoměry, které bývají součástí metalografických mikroskopů nebo jako samostatné přístroje. Většinou pracují na principu Vickersova tvrdoměru, přičemž na indentor (jehlan s čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem 136°) je vyvozeno definované zatížení v rozmezí od 2 gramů do 10 kilogramů a posléze jsou odměřovány délky vzniklých úhlopříček. Výsledná mikrotvrdost HV při určitém zatížení viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** tvrdost lze spočítat podle následujícího vzorce (1) jako:

$$HV = 1,854 F/d^2 \text{ [kp/mm}^2\text{]} \quad (1) \quad [9]$$

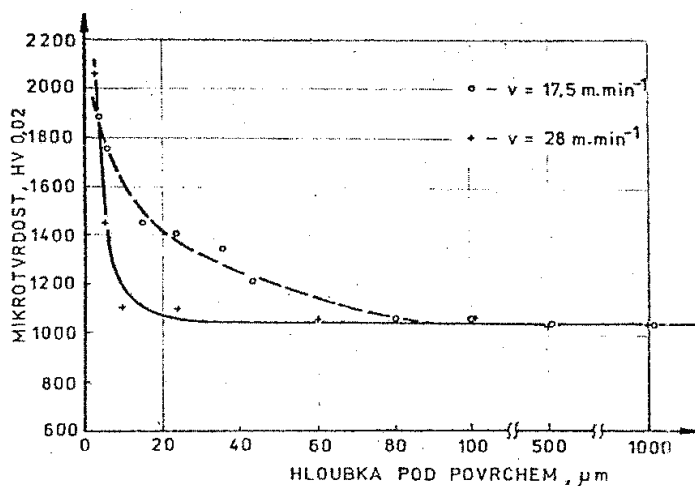


obr. 19 zkouška tvrdosti podle Vickerse [22]

Zkouška tvrdosti ¹⁾		Zkouška tvrdosti při malém zatížení		Zkouška mikrotvrdosti ⁴⁾	
Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,1471
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,2	0,1961
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,2452
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,4903
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807

Tab. 5 přehled zkušebního zatížení [20]

Hodnocení je prováděno nejčastěji na metalografických výbrusech v příčném řezu vzorku, kolmo ke zkoumaného povrchu a vytváříme vtisky s určitými rozestupy.



Výsledky měření mikrotvrdosti povrchové vrstvy oceli 16 350.8

obr. 20 příklad průběhu mikrotvrdosti [2]

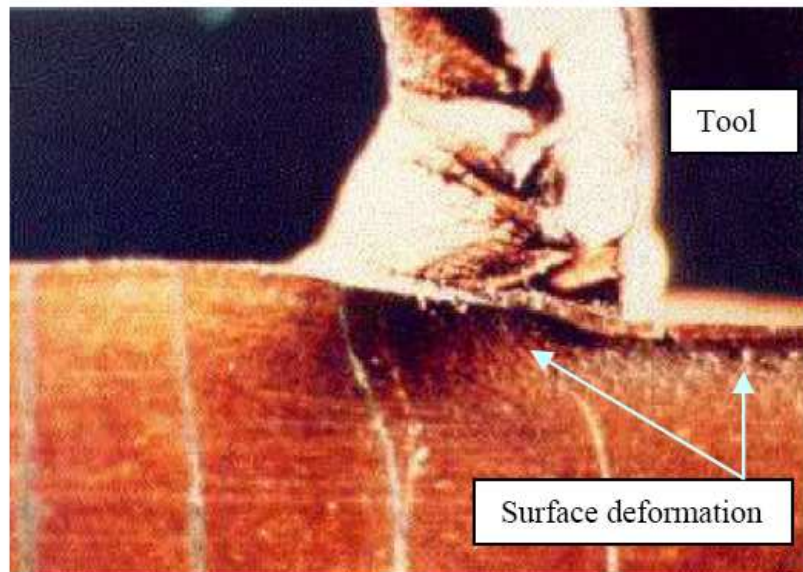
Metoda obrábění	Hloubka zpevnění [mm]
Soustružení	
hrubé	0,2 – 0,5
jemné	0,05
Vývrtávání	
hrubé	0,2 – 0,5
Frézování	
válcové	0,12
čelní hrubé	0,2 – 0,5
čelní dokončovací	0,1
Vrtání	0,15
Vyhrubování	0,15
Vystružování	0,2
Výroba ozubení	
hrubování	0,14
dokončování	0,12
ševingování	0,1
Broušení	0,015 – 0,06
Hydroleštění	0,05 – 0,15
Mechanické leštění	0,02 – 0,05

obr. 21 hodnoty zpevnění o

některých [2] metodách obrábění

2.5. Zbytková napětí

Ke vzniku zbytkového napětí dochází při každé technologické operaci, zejména s mechanickým, tepelným a chemickým působením. Často se zaměřujeme na zbytková napětí po obrábění, neboť třískové obrábění je nejčastější finální operace před výslednou kontrolou a expedicí výrobku. Při obrábění dochází k elasticko-plastické deformaci v oblasti tvorby třísky za současného nerovnoměrného ohřevu materiálu.



obr. 22 plastická deformace povrchu při obrábění [3]

Hlavní příčinou vzniku zbytkových napětí jsou:

- nerovnoměrná plastická deformace v obrobeném povrchu
- nerovnoměrný ohřev a ochlazování materiálu, které způsobuje např. teplotní gradient při tepelném zpracování, tváření, obrábění a ochlazování prostředím
- nerovnoměrné změny struktury, vyvolané působením tepla a mechanických sil (fázové transformace, precipitace nových strukturních složek, změna velikosti zrna
- chemické procesy, spojené s reakcí částic pronikajících do povrchové vrstvy- oxidace, galvanické pokovování

[5], [2]

2.5.1. Druhy zbytkových napětí z hlediska rozsahu oblastí:

Zbytková napětí I. druhu: makroskopická, je zasažena do hloubky několik zrn, vnitřní síly a momenty spojené se zbytkovým napětím jsou v rovnováze a jakékoliv narušení (např. jejich rozdělení) této rovnováhy způsobuje makroskopické změny rozměrů

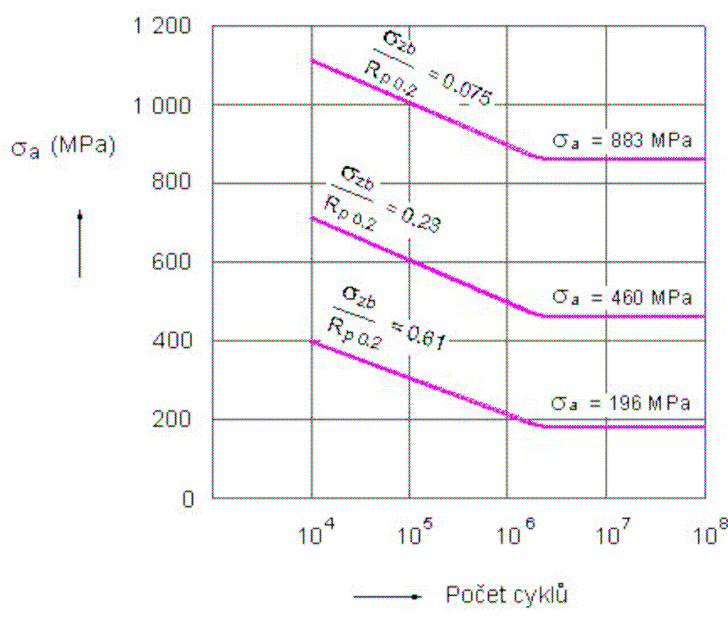
Zbytková napětí II. druhu: oblast o velikosti jednoho zrna nebo jeho části, vnitřní síly a momenty jsou v dostatečně velké rovnováze a její narušení má za následek změnu mikroskopické deformace

Zbytková napětí III. druhu: v mikroskopické oblasti zahrnující několik meziatomových vzdáleností, všechny síly a momenty jsou ve sledované oblasti části zrna v rovnováze narušení způsobí změnu ultramikroskopických rozměrů

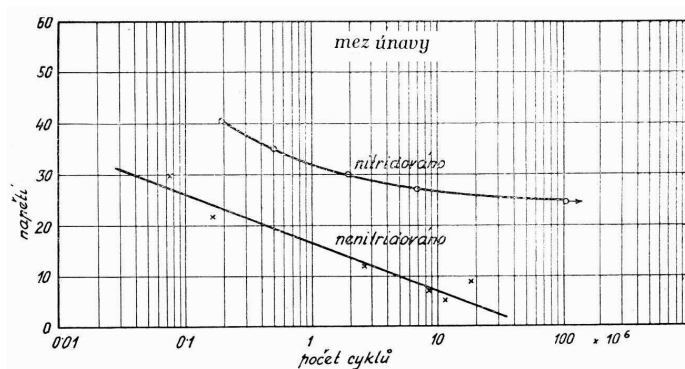
Ve skutečnosti se vyskytují společně všechny druhy, z hlediska vlastností povrchové vrstvy mají největší význam napětí I. druhu.[2]

2.5.2. Vliv zbytkového napětí na vlastnosti:

Zbytková napětí jsou rozdělena na tlaková a tahová, jejichž vliv je obzvláště patrný při výsledné únavové pevnosti materiálu. Tahová napětí snižují únavovou pevnost, protože snadněji vznikají mikrotrhliny, naopak přítomnost tlakových zbytkových napětí zvyšuje a prodlužuje životnost součástí. Velká zbytková napětí (zejména tahová) vznikají například při svařování jejichž příčinou vzniku je nerovnoměrné teplotní pole při ohřevu součástí a následném prudkém ochlazení, kde je často při náročných aplikacích nutno zařadit ještě žhánání na snížení pnutí. V některých výrobních procesech jsou záměrně zařazovány operace, které vnášejí tlaková napětí do povrchu a tím pravděpodobně dojde ke zvýšení únavové životnosti. Jednou z nejčastěji využívaných možností je například válečkování, při kterém dochází k vnesení tlakového zbytkového napětí a povrch bude vyhlazený a zpevněný.



obr. 23 vliv nitridace na únavovou pevnost



obr. 24 příklad vlivu zbytkového napětí na únavovou pevnost [5]

2.5.3. Metody hodnocení zbytkového napětí

Měřících metod existuje celá řada, problém nastává s volbou optimální metody pro danou součást. Každá metoda má své výhody a nevýhody, měří s určitou (ne)přesností a je vhodná pouze pro nějakou oblast použití.

Měřící metody lze rozdělit do několika skupin:

- **Destruktivní** – měření deformace odstraněním povrchové vrstvy se zbytkovým napětím
- **Polodestruktivní** - součást lze i po měření použít
- **Nedestruktivní** – nedojde k ovlivnění součásti po měření

Podle principu metody měření:

- **Mechanické** – je měřena deformace, která vzniká porušením rovnováhy odstraněním určité vrstvy z povrchu. Ze změny deformace se stanovuje průměrná hodnota napětí I. druhu. Nevýhodou je znehodnocení součásti a určité zkreslení výsledků, neboť odstraněním vrstvy lze snadno vnést do vzniklého povrchu další přídavná napětí.
- **Fyzikální** – tyto metody využívají fyzikálních vlastností kovů (optické, magnetické – metoda Barkhausenova šumu, akustické, difrakce)
- **Chemické** – difúze vodíku, změna chemické aktivity

Podle charakteru měřené veličiny:

- **Přímé**
- **Nepřímé** – zbytková napětí se měří ze změn jiných veličin

Metody zjišťování zbytkových napětí	Tvar součásti	Způsob měření		
<i>Mechanické</i>	plochý tvar	deformace pásků	změna délky	
			změna zakřivení	
		vrtání děr	válcová díra mezikruží	
	rotační tvar	změna rozměru válce		odstranění povrchové vrstvy
				rozříznutí trubky
		trubka		odstranění povrchové vrstvy
				odstranění vnitřní vrstvy
		kroužek		rozříznutí
				změna křivosti
	obecný tvar	metoda sítě	deformace sítě	
		křehké laky	vznik trhlin	
		křehké modely	vznik trhlin	
<i>Fyzikální RTG</i>	obecný tvar	difrakce	vzdálenost meziatomových rovin	
<i>Fyzikální ultrazvuk</i>		šíření vln	změna rychlosti	
			odraz vln vnitřní tlumení	
<i>Elektrické</i>	obecný tvar	změna proudu	změna potenciálu procházejícího proudu	
			změna velikosti vířivých proudů	
			změna indukčního toku	
<i>Magnetické</i>	obecný tvar	změny magnetizmu	magnetická indukce	
			zbytkový magnetizmus	
			četnost akustických emisí	
<i>Akustické</i>	obecný tvar	prozvučitelnost	četnost akustických emisí	
<i>Chemické</i>		obecný tvar	difuze vodíku	trhliny na povrchu
			změna chemické aktivity	změna struktury

Tab. 6 metody zjišťování zbytkového napětí [2]

2.5.4. Metoda RTG difrakce

Z nedestruktivních metod je tato metoda nejrozšířenější. RTG difrakce pracuje na principu rozptylu rentgenových paprsků na krystalech, kde změříme změny vzdáleností atomových rovin, které vzniknou po plastické deformaci. Po dopadu záření se paprsky rozptýlí a vytvoří kuželové plochy. Ze změny difrakčního úhlu u deformovaných krystalů je přepočítán deformaci na napětí. Na deformaci krystalu se podílí všechny tři druhy zbytkového napětí a tato tedy metoda umožňuje zaznamenat i napětí II. a III. řádu.

Tuto metodu lze použít pouze na krystalické materiály, zároveň s rostoucí velikostí zna klesá přesnost měření, umožňuje měřit v různých směrech, měříme pouze ve tenkých vrstvách 10-2 - 10-3mm. Napětí je určováno ze vztahu:

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = -\cot g\Phi_0(\Phi - \Phi_0)$$

Základní podmínkou difrakce je, aby náhodně orientované krystaly a jejich krystalické roviny splňovaly Braggovu podmínku difrakce :

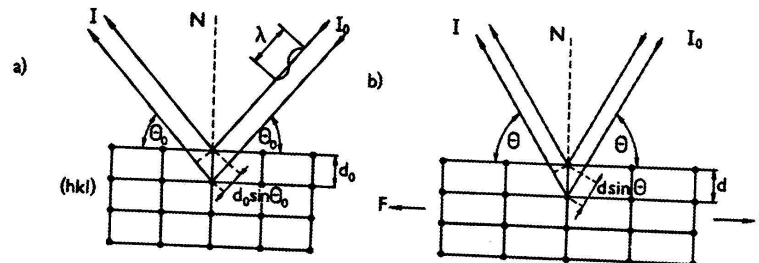
$$n\lambda = 2d \sin\Phi \quad (3)$$

n – řád reflexe (násobná konstanta)

d - vzdálenost krystalografických rovin

λ – vlnová délka záření

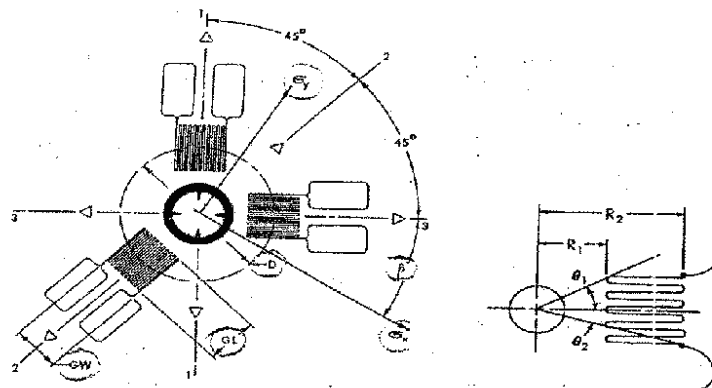
Φ – úhel difrakce



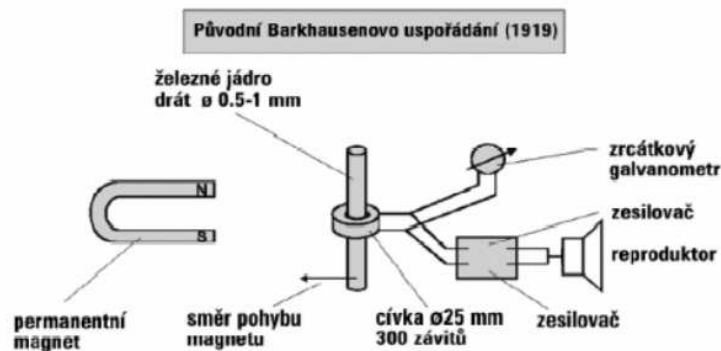
obr. 25 deformace krystalické mřížky a) nenapjatý stav b) změny vyvolané silou F [13]

2.5.5. Metoda Barkhausenova šumu

Jedná se o nedestruktivní magnetickou metodu, která detekuje strukturní a napět'ové změny v materiálech. Jejím objevitelem byl profesor Barkhausen. Původní uspořádání jeho pokusu bylo následující na reproduktor byla připojena indukční cívka a galvanometr. Do indukční cívky bylo vloženo ocelové jádro. Při přibližování a oddalování magnetu k jádru je v reproduktoru slyšet z reproduktoru hlasité praskání, které souvisí s nespojitostmi při magnetování feromagnetických materiálů.



obr. 26 umístění tenzometrické růžice [2]

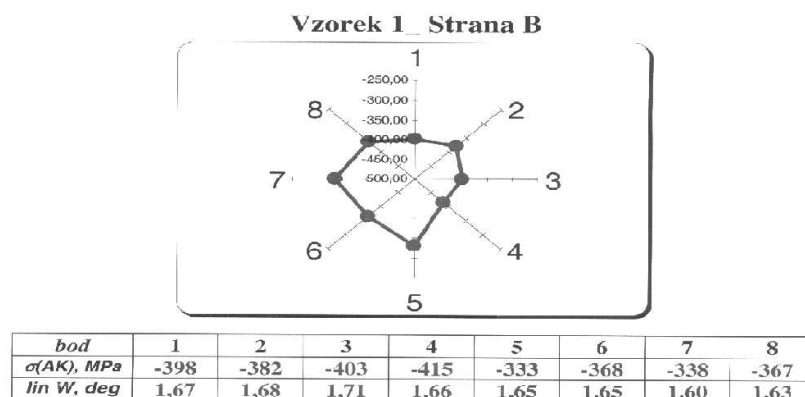


obr. 27 původní Barkhausenovo uspořádání [14]

Proces magnetizace je charakterizován hysterezní křivkou, z jejíž deformace se stanoví velikost napětí v materiálu. Rostoucí tvrdost materiálu změny mikrostruktury a přítomnost tlakových napětí v materiálu snižují amplituda praskání zatímco tahová napětí intenzitu praskání zvyšují. Hloubka měření se pohybuje od 0,01 až 1,5mm. Nevýhodou je složitá kalibrace a použití pouze pro feromagnetické materiály.

2.5.6. Metoda odvrtávání povrchových vrstev

Tato metoda je vhodná pro zjišťování povrchového napětí v blízkosti povrchu součástí. Podstatou metod vrtání děr je odstranění povrchové vrstvy materiálu a následné uvolnění zbytkových napětí. Díry jsou nejčastěji o průměru 1 a 4 mm, hloubka vytvořeného otvoru je 1 až 1,5násobek průměru díry. Pro měření vzniklých deformací jsou nejčastěji užívány tenzometrické růžice, tvořené 3 měřícími mřížkami, které jsou vůči sobě pootočený o 45°. Narušením vnitřní rovnováhy dojde k deformaci okolo vrtané díry. S rostoucí vzdáleností od otvoru klesá vzniklá deformace. Proto je při měření důležitá vzdálenost od okraje k měřenému místu. Tím je snížena citlivost metody a je zaznamenáno cca 20-40% uvolněné deformace a velkou roli hraje soustřednost díry a tenzometru, která by se neměla být +/- 0,004D



obr. 28 příklad rozložení zbytkového napětí RTG difrakční analýzou u otvorů z oceli 12050

[14]

3. Charakteristiky drsností a jejich hodnocení

„Drsnost je definována jako souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Do drsnosti se nepočítají vady povrchu, tj. náhodné nepravidelné nerovnosti, které se vyskytují jen ojediněle (risky, trhlinky, důlky apod.) a které vznikají vadami materiálu, poškozením nebo jiným způsobem.

„Podle převládajícího směru nerovností se drsnost posuzuje v příčném nebo podélném směru. Parametry drsností se vyhodnocují na skutečných profilech, které se získávají jako průsečnice kolmé popř. šikmé roviny se skutečným povrchem.“ [11]

Pro hodnocení mikrogeometrie povrchu ploch součástí a jednotlivých charakteristik drsností byl vyvinut velký počet kontrolních metod a měřících přístrojů, pracujících na různých fyzikálních principech. Tyto přístroje nazýváme drsnoměry.

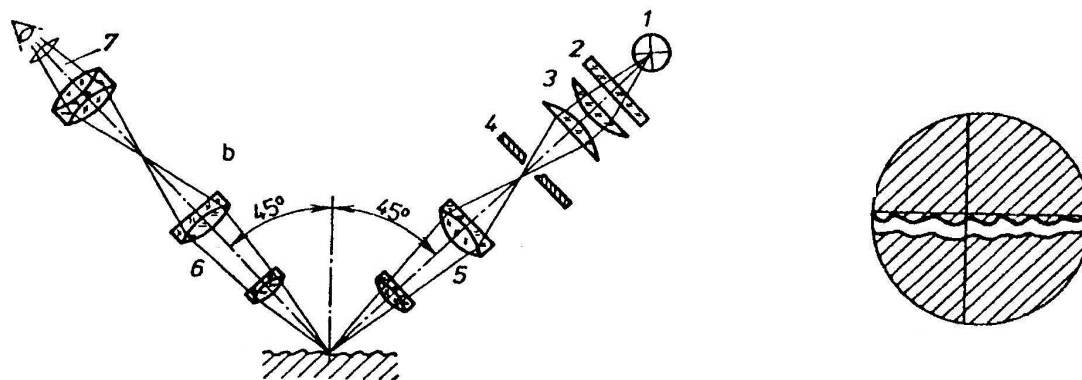
3.1. Optické metody měření

U optických metod je omezujícím faktorem hloubka ostrosti nebo vlnová délka světla. (u světelných mikroskopu interferenční jevy).

3.1.1. Metoda světelného řezu

Základní schéma funkce přístroje je na obr. Na sloupu stojanu je výškově a otočně nastavitelné rameno s osvětlovacím a pozorovacím mikroskopem. Jejich optické osy svírají pravý úhel.

Při této metodě je vzorek z jedné strany osvětlen v úhlu 45° rovnoběžným svazkem paprsků a osvětlené místo pozorovatel pozoruje mikroskopem ve směru kolmém na dopadající svazek. Výsledný obraz nerovností povrchu se v okuláru jeví jako zvlněný proužek v tmavém poli. Zvlněný proužek je zvětšeným obrazem šikmého řezu skutečného profilu v místě dopadu světla na vzorek. Okulár obsahuje skleněnou destičku s nitkovým křížem a pomocnou milimetrovou stupnicí. Destičku lze libovolně posouvat a natáčet pomocí mikrometrického šroubu se stupnicí dělení po 0,01mm. Ze znalosti zvětšení okuláru a posuvu mikrometrického šroubu je umožněno měřit hodnoty R_m , R_z nebo měření roztečí stop po nástroji.



obr. 29 schéma dvojitého mikroskopu pro měření [13]

obr. 30 obraz v okuláru

drsnosti povrch metodou

světelného řezu[13]

3.1.2. Laserový konfokální mikroskop

Na rozdíl od klasických světelných mikroskopů má laserový konfokální mikroskop větší rozlišení a hloubku ostrosti, protože světelným zdrojem je laserový paprsek o kratší vlnové délce než je široké spektrum světelného paprsku a snímání probíhá postupně se měnící se hloubkou zaostření „confocal = „mající společné ohnisko“; tímto termínem se označuje optické uspořádání, ve kterém jsou objektiv a kondenzor zaostřeny na stejný bod.“ [12]

Tento mikroskop dokáže v určitém rozsahu zvětšení nahradit elektronový řádkovací mikroskop. Jeho hlavní výhodou je zejména možnost vytvářet prostorové rekonstrukce mikroskopických objektů, složené z několika desítek až stovek optických řezů zkoumaného povrchu. Jeho vlastnosti využíváme zejména při sledování morfologie, povrchových defektů, vnímání zkoušek nebo stop opotřebení při scratch testech nebo impact testech. Velkou výhodou tohoto mikroskopu je, že nepotřebuje vakuum. [12]

3.2. Nepřímá kvantitativní měření

U této metody je povrch porovnáván komparačními přístroji kontrolovanou plochu se vzorovou. Získáme kvantitativní analogový údaj o rozdílu drsnosti porovnávaných povrchů. Podle fyzikálního principu jsou přístroje rozlišovány na:

- Mechanické
- Pneumatické
- Elektrické induktivní
- Fotoelektrické

3.3. Dotykové profiloměry

Dotykové profiloměry jsou nejuniverzálnější, nejrozšířenější a nejdokonalejší přístroje pro měření mikrogeometrie povrchu. Pracují na principu snímání výškových rozdílů nerovností pomocí hrotu, který se pohybuje konstantní rychlostí vůči kontrolované ploše. Rozdíl výšek se mnohonásobně zvětší mechanickým převodem, mechanicko-opticky, mechanicko-pneumaticky, elektrodynamicky, elektromagneticky, elektroinduktivně, piezoelektricky nebo elektrokapacitně. Výstupem z těchto přístrojů je profilograf, popisující změny nerovností profilu podél měřeného úseku. Hodnoty běžných dotykových přístrojů mají maximální výškové rozlišení 0,1 μ m. U řádkovací tunelové mikroskopie (STM) a mikroskopie atomových sil (AFM) se dosahuje přesnost až 0,01nm.

3.4. Základní pojmy drsnosti povrchu

Základní povrch – povrch, ze kterého hodnotíme se vyhodnocují veličiny drsnosti povrchu, zároveň má tvar jmenovitého povrchu a jeho poloha odpovídá obecnému směru skutečného povrchu v prostoru.

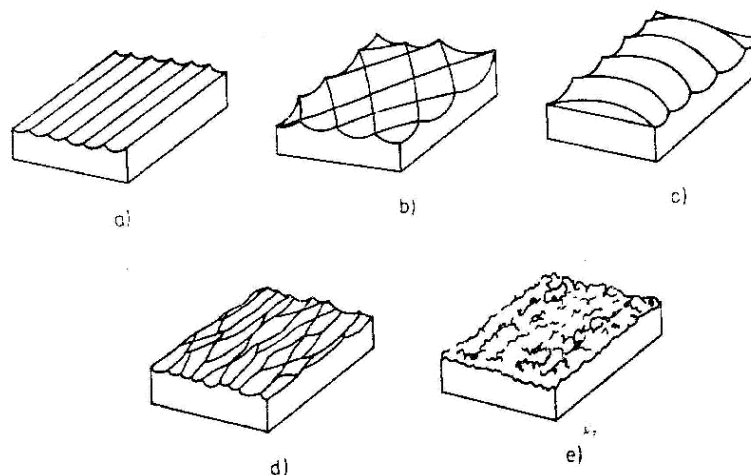
Jmenovitý povrch – povrch ideální, jejich jmenovitý tvar je určen výkresem nebo jinou technickou dokumentací

Skutečný profil – získáme ho pokud provedeme řez rovinou kolmou (nebo šikmou) k základnímu povrchu

Jmenovitý profil - ideální profil, odlišný od skutečného profilu.

Podle toho, jak je vedena kolmá rovina řezu, lze získat buď příčný nebo podélný profil. U příčného profilu je veden řez rovinou kolmou ke směru nerovností. Podélný profil získáme řezem rovinou ve směru nerovností. Tento profil získáme pouze u povrchů s převládajícím směrem nerovností (povrchy s periodickým profilem).

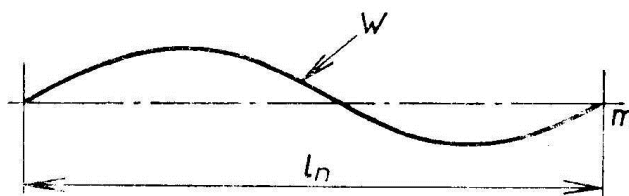
Základní typy povrchů: anizotropní – mají výrazný směr nerovností, izotropní – s méně výrazným směrem nerovností



obr. 31 základní typy povrchů a, b, c- anizotropní; d- s méně výrazným směrem profilu; e- izotropní [1]

Vlnitost W

Profil nerovností povrchu po filtrování dolno-propustným filtrem o určité mezní rozteči. Používá se pro vyhodnocování charakteristik vlnitosti.

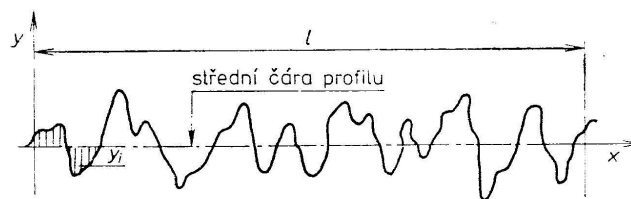


obr. 32 parametr vlnitosti povrchu W [1]

Střední čára profilu m

Střední čára profilu m je základní čára, ke které stanovujeme a vyhodnocujeme veličiny drsnosti povrchu. Má tvar jmenovitého profilu a rozděljuje skutečný profil tak, aby v rozsahu základní délky je součet druhých mocnin úchylek od této čáry minimální.

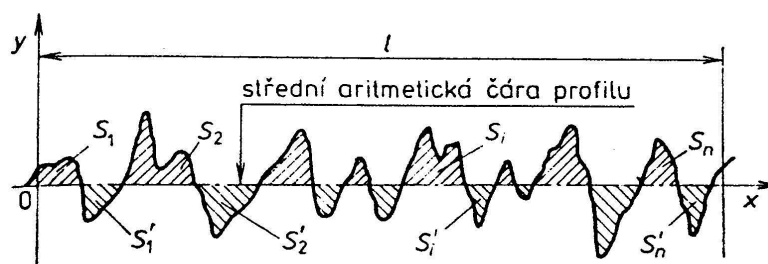
$$\int_0^l y^2 dx = \min$$



obr. 33 střední čára profilu [1]

Střední aritmetická čára povrchu m

Základní čára, má tvar jmenovitého profilu, je ekvidistantní se směrem skutečného profilu. Rozdělení profilu skutečného profilu tak, aby v rozsahu základní délky součty ploch nad ní a pod ní byly stejné. V praxi je snáze zjistitelná při grafickém zpracování než střední čára profilu

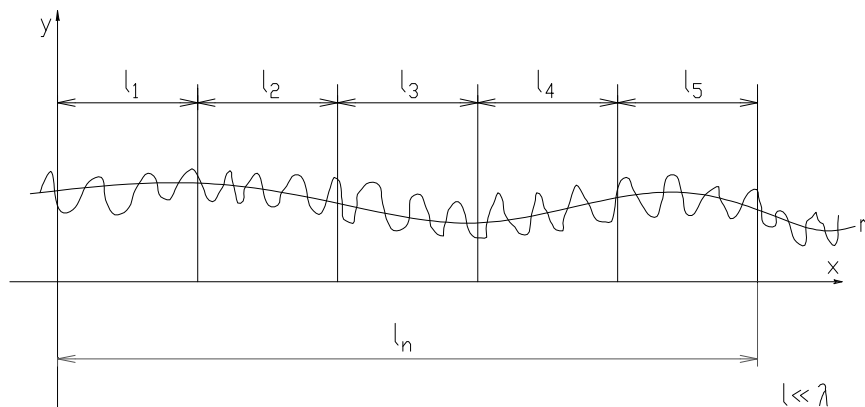


obr. 34 střední aritmetická čára profilu [13]

Základní délka l

Základní délka čáry, která odděluje nerovnosti charakterizující drsnost povrchu od jiných geometrických úchylek. Základní délky volíme podle měřené veličiny.

Vyhodnocovanou délku označujeme jako l_n .



obr. 35 základní čára profilu [11]

Filtrace profilu

Při měření drsnosti povrchu je nutno, aby se při měření neprojevil vliv nerovností vlivem větší rozteče, například vlnitost nebo jiné úchytky tvaru. Tomu se lze vyvarovat nastavením základní mezní rozteče l_λ (cut-off) rovné základní délce l , podle které se zkoumaný profil filtruje. Na této délce l_λ se přenáší 75% amplitudy sinusového tvaru profilu při užití předepsaného filtru. Filtrace je prováděna mechanicky, elektricky popřípadě pomocí matematických funkcí. Filtraci je nutno nastavit podle základních délek stanovených normou.

l (mm)	R_a (μm)
0,08	do 0,025
0,25	přes 0,025 do 0,4
0,8	přes 0,4 do 3,2
2,5	přes 3,2 do 12,5
8	přes 12,5 do 100,0

Tab. 7 základní délky l pro veličinu R_a [1]

l (mm)	R_a (μm)
0,08	do 0,010
0,25	přes 0,01 do 1,6
0,8	přes 1,6 do 12,5
2,5	přes 12,5 do 50
8	přes 50 do 400

Tab. 8 základní délky l pro veličinu R_z a R_m dle normy ISO 4287-97 [1]

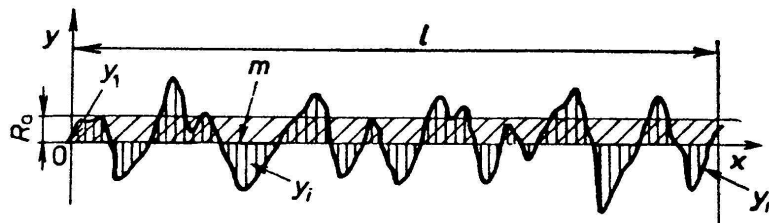
3.5. Normalizované charakteristiky drsnosti povrchu

3.5.1. Střední aritmetická úchylka profilu R_a

Přednostní výšková charakteristika drsnosti povrchu.

Geometrická interpretace parametru vyjadřuje výšku obdélníku sestrojeného nad střední čarou a shodné ploše jako nerovnosti profilu uzavřené profilem střední čáry

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y(x_i)|$$



obr.36 geometrický význam hodnoty R_a [13]

x – úsečka odečítaná na střední čáře m

$y(x)$ – funkce popisující profil

y_i – souřadnice n bodů profilu povrchu v mezích základní délky

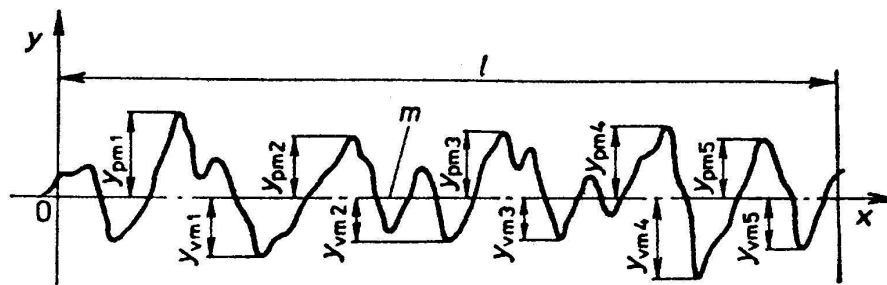
3.5.2. Výška nerovností profilu z deseti bodů R_z

Střední hodnota výšek pěti nejvyšších výstupků profilu a pěti nejnižších prohlubní profilu.

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pmi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{rmi}|}{5}$$

y_{pmi} – výška i -tého nejvyššího výstupku

y_{rmi} – hloubka i -té nejhlubší prohlubně

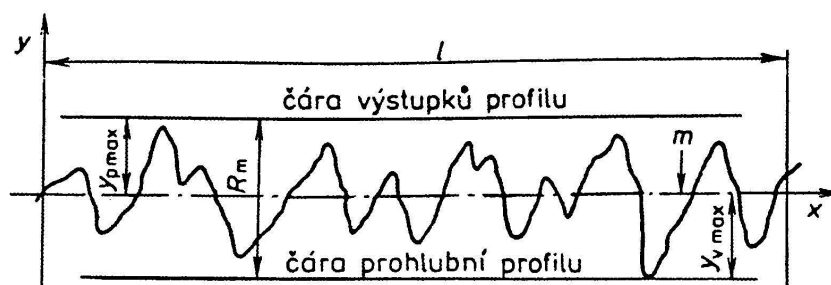


obr. 37 výška nerovností profilu z deseti bodů Rz [13]

3.5.3. Největší výška nerovností profilu R_m

Výškový charakteristika nerovnosti povrchu, určená vzdáleností mezi čarou výstupků profilu a čarou prohlubní v rozsahu základní délky. Udává pouze největší hloubku profilu, většinou jako doplňkové měřítko.

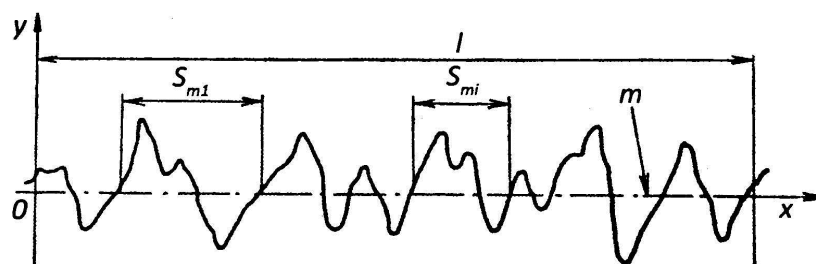
$$R_m = |y_{r \max}| + |y_{p \max}|$$

obr. 38 největší výška nerovností profilu R_m [13]

3.5.4. Střední rozteč nerovností profilu S_m

Charakteristika nerovnosti povrchu v podélném směru profilu, určuje se střední hodnota roztečí nerovností profilu S_{mi} v rozsahu základní délky.

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi}$$



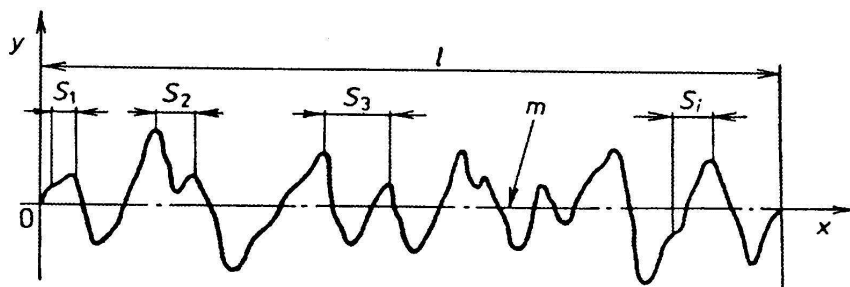
obr. 39 střední rozteč nerovností profilu S_m [13]

Střední rozteč nerovností profilu slouží pro délkové (frekvenční) ocenění drsností povrchu, zejména pro periodicky se opakující složky v profilu povrchu. Například u soustružených povrchu se hodnota S_m rovná hodnotě posuvu.

3.5.5. Střední rozteč místních výstupků S

Střední rozteč místních výstupků profilu S je jinou charakteristikou nerovnosti v podélném směru profilu. Určuje se jako S_m v rozsahu základní délky.

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i$$

obr. 40 střední rozteč místních výstupků S [13]

S_i – délka úseků střední čáry profilu mezi průmětem dvou nejvyšších bodů sousedních místních výstupků Podobně jako u S_m slouží S profilu pro délkové (frekvenční) ocenění drsností povrchu, zejména pro periodicky se opakující složky v profilu povrchu, zvláště pro zhodnocení náhodné složky v profilu povrchu.

3.5.6. Nosný podíl t_p

Nosný podíl t_p je tvarovou charakteristikou profilu. Je definován jako poměr nosné délky profilu k základní délce

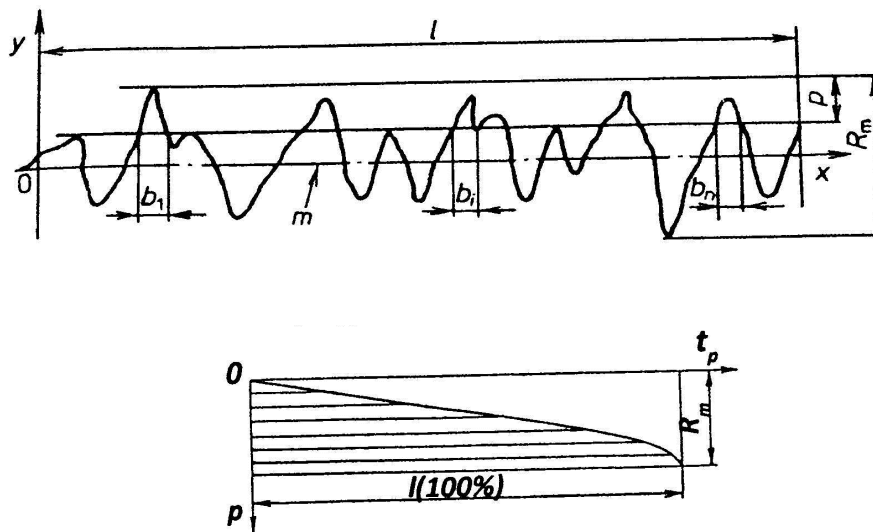
$$t_p = \frac{l_p}{l}$$

l – základní délka profilu

l_p – nosná délka profilu, součet délek úseků vytvořených na řezu v hloubce p pod čarou výstupků profilu

p – poloha řezu profilu, vyjadřuje se podílem z R_m (%)

Z hodnot nosných podílů v různých polohách řezů materiálu sestavujeme nosnou křivku jako grafické znázornění hodnot relativní nosné délky na poloze řezu profilu

obr. 41 nosný podíl tp [13]

3.6. Nenormalizované charakteristiky drsnosti povrchu – výškové charakteristiky

3.6.1. Střední kvadratická úchylka profilu R_q

Nenormalizovaná charakteristika, používá se pro výškové zhodnocení profilu povrchu, citlivěji vyjadřuje úchylky od homogenního profilu povrchu, často se uvádí, že hodnoty R_q a R_a jsou prakticky rovnocenné. Změny poměru R_q a R_a v důsledku změny tvaru profilu nabývají hodnot od 1,0 do 1,5 například hodnota 1,1 odpovídá soustruženým povrchům.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx}$$

3.6.2. Střední výška nerovnosti profilu $y_{p \max}$

Střední hodnota vzdáleností bodů profilu povrchu od čáry výstupků profilu, tj. vzdálenost nejvyššího bodu profilu od střední čáry v rozsahu měřené délky.

3.6.3. Střední hloubka nerovností profilu $y_{v \max}$

Střední hodnota vzdáleností bodů profilu povrchu od čáry prohlubní profilu, tj. vzdálenost nejnižšího bodu profilu od střední čáry v rozsahu měřené délky.

3.6.4. Stupeň plnosti profilu R

Určuje uzavřenost nebo otevřenost profilu.

$$R = y_{p \max} / R_m$$

3.6.5. Poměry hodnot výškových charakteristik

Tyto poměry slouží pro zhodnocení změn tvaru profilu povrchu v důsledku jeho funkčního zatížení

$$y_{v \max} / R_m$$

3.7. Vybrané nenormalizované charakteristiky drsnosti povrchu v podélném směru profilu

3.7.1. Střední aritmetická vlnová délka λ_a

Střední aritmetická vlnová délka se používá například při posuzování změn tvaru drsnosti povrchu vlivem opotřebení. Určuje také míru roztečí místních výstupků a prohlubní

Střední aritmetická vlnová délka λ_a je 2π násobek poměru střední aritmetické úchyly a střední hodnoty sklonu profilu.

$$\lambda_a = 2\pi \frac{R_a}{\Delta_a}$$

λ_a je běžnou aproximací λ_q .

3.7.2. Střední kvadratická vlnová délka λ_q

Podobně jako λ_a určuje také míru roztečí místních výstupků a prohlubní. Užívá se pro hodnocení změn tvaru profilu povrchu v tribologických aplikacích.

Střední kvadratická vlnová délka λ_q je 2π násobek poměru střední kvadratické úchyly a střední kvadratické hodnoty sklonu profilu.

$$\lambda_q = 2\pi \frac{R_q}{\Delta_q}$$

4. Experimentální část bakalářské práce

4.1. Úvod

Experimentální část byla soustředěna na problematiku hodnocení textury povrchu pomocí dotykového profiloměru a konfokálního mikroskopu na vzorcích, které byly třískově obráběny a dále na provedení únavových zkoušek. Vzorky byly zhotoveny 5 různými metodami třískového obrábění a současně jedna sada byla tepelně zpracována v povrchové vrstvě (kaleno laserem). Sady vzorků byly obráběny sejnými metodami a řeznými podmínkami, ale různými řeznými nástroji.

Při únavových zkouškách je vyžadováno, aby byl povrch vzorků vyleštěný, což má za následek eliminaci ovlivnění zkoušky stavem povrchu, zejména ovlivnění jeho drsností, které je značné.

Cílem tohoto testu nebylo zjištění Woehlerova diagramu, cílem projektu je zkoumání integrity povrchu strojních součástí. Povrchy běžně vyráběných strojních součástí nejsou obvykle vyleštěné, obvykle mají na sobě stopy po dokončovacích obráběcích operacích, nebo u povrchů, které nejdou třískově opracovány je charakteristický. V tomto experimentu bude posuzován vliv různých způsobů zpracování na únavové poškození.

4.2. Materiál

Pro experimentální část této práce byla zvolena ocel D3.

Ekvivalentní označení v zahraničí							
PN	W. NR	DIN	EN	AISI	RUSKO	ČÍNA	BÖHLER
NC11	1.80	X210Cr12	X210Cr12	~D3	H12	Cr12	K100

Tab. 9 přehled značení oceli v jiných zemích [18]

Chemické složení [hm.%]																		
Materiál		Fe	Al	C	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	N	Nb	Ni	P	S	Si	Ti	V	W
19436	min	zbyt.		1.8		11.0		0.20							0.20			
	max			2.5		12.5	0,4	0.45	0.20			0.50	0.030	0.035	0.45		0,15	0.20

Tab. 10 chemické složení oceli D3 - 19 436 [18]

Vliv jednotlivých prvků:

Uhlík C: nejvíce ovlivňuje mechanické vlastnosti, zejména pevnost, tvrdost a kalitelnost a tím i houževnatost a plasticitu

Chrom Cr: feritotvorný prvek, zvyšuje prokalitelnost, pevnost zvláště za tepla, při poměru obsahu Cr a C vyšším než 8,074 dochází v oxidačním prostředí k pasivaci povrchu

Mangan Mn: austenitotvorný prvek, zvyšuje prokalitelnost, zvyšuje citlivost na hrubnutí zrna, snižuje tepelnou a elektrickou vodivost

Křemík Si: feritotvorný prvek, prokalitelnost zvyšuje méně než Cr a Mn, působí jako desoxidační prvek

[23]

Technologické obráběcí procesy			Možnost použití	Teplota, °C
Tváření	Kování		+	850-1050
	Válcování		+	850-1050
Tepelné zpracování	Tepelné zušlechťování	Kalení	+	960-1000
		Popouštění	+	220-520
	Žíhání	Změkčování	+	820-860
	Žíhání	K odstranění vnitřních pnutí	+	600-700
Tepelno-chemické zpracování	Nitrizace		+	470-520
	Jiné			

Tab. 11 vhodnost oceli pro technologické operace a rozmezí optimálních teplot [24]

4.2.1. Charakteristické vlastnosti a použití

Nástroje na stříhání za studena: tváření a drcení, na řezné nástroje a formy. Vysoce legovaná chromová ocel s vysokou prokalitelností při kalení v oleji a na vzduchu, zvláště vysoká odolnost proti opotřebení jak kovovými tak minerálními látkami, dostatečná řezivost (lepší než u oceli 19 422), velmi vysoká pevnost v tlaku, značně nízká rázová houževnatost zejména v závislosti na směru protváření, zde lze snadno dosáhnout výrazné karbidické řádkovitosti, dobrá stálost rozměrů při tepelném zpracování (změna rozměrů větší než u oceli 19 312), zvýšená citlivost na rychlý a nestejněměrný ohřev, vhodnost ke kalení na sekundární tvrdost (možnost např. nitridování), dosti obtížná obrusitelnost, obtížná tvárnost za tepla a poněkud ztížená obrobitelnost v žíhaném stavu.

Na nástroje pro stříhání za studena: všechny druhy nástrojů s velkou životností pro stříhání na lisech a děrování materiálů menších tloušťek a materiálů vysoké pevnosti (zejména tvarově složité nástroje pro stříhání dynamových a transformátorových plechů a plechů z nerezavějících ocelí), nože pro tabulové nůžky na plech a páskovou ocel (do tloušťky stříhaného materiálu asi 4 mm), nože na stříhání drátu apod.

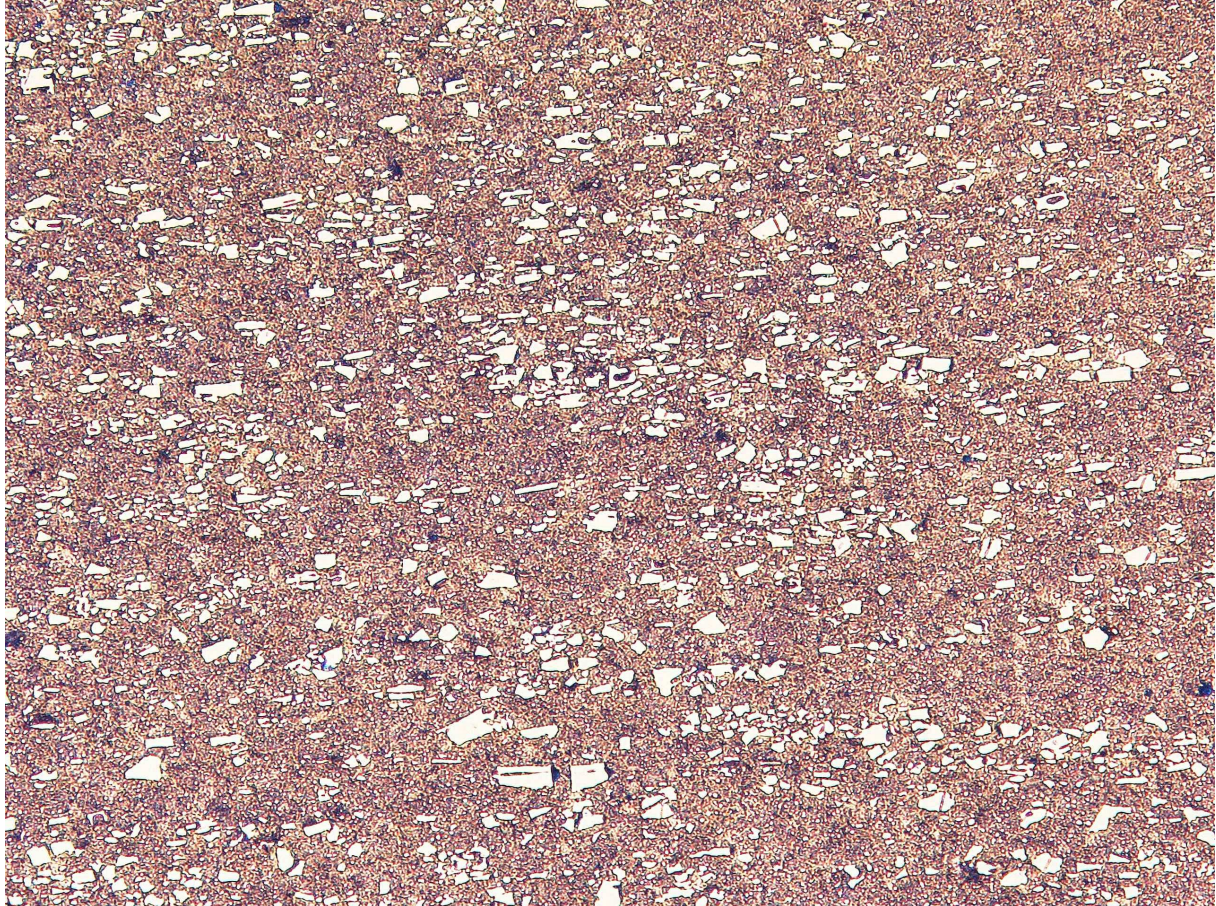
Nástroje pro tváření: menší průvlaky a nástroje pro tažení, všechny druhy jednoduchých nástrojů na přetváření a ražení materiálů menších tloušťek u nichž nedochází k přídavnému namáhání ohybem nebo na roztržení, jednoduché a symetrické nástroje na protlačování a tlačení, nástroje na válcování závitů, malé, hladké a profilové válce, kovadla (i pro práce za tepla).

Nástroje řezné: protahovací a protlačovací trny, profilové nože a tvarově složité frézy pro menší řezné rychlosti a pro obrábění nekovových abrasivních materiálů. Formy: malé formy

s velkou životností pro tváření plastických hmot, práškových hmot, skla, porcelánu a keramických materiálů.

Nástroje na drčení a mletí: kladiva drtičů a čelisti pro jemné drčení a mletí.

Formy: malé formy pro tváření plastů, zejména reaktoplastů velmi namáhané vtokové vložky hlavice pístů a komory.



*obr. 42 metalografický výbrus, zvětšeno 100x leptáno v roztoku Vilella-Bain
jasně viditelné primární ostrohranné karbidy*

4.3. Zkušební vzorky

Celkem bylo zkoušeno 5 skupin vzorků po 3 kusech. Každý vzorek byl ze spodní části broušený, boky zkušebních vzorků byly vyleštěné, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků vlivem šíření trhlin právě z těchto míst a z horní části obráběny. Frézované povrchy byly obráběny čelní válcovou frézou a sousledně.

Jelikož broušení zakřivených ploch boků všech vzorků a také horních ploch vzorků BL1-BL3 nebylo možné provádět na metalografických bruskách, byla úprava ploch prováděna ručně, pomocí smirkového papíru od hodnoty hrubosti 80 až 1200, poté pomocí plátna a diamantové pasty.

označení vzorku	řezný nástroj	řezná rychlost [m/min]	hloubka řezu [mm]	posuv na zub [mm/ot]	povrchové úpravy
BF1 - BF3	SK	v = 350	h = 536	s = 0,5	Indukčně kalený povrch
BFL1 - BFL3	LX11	v = 350	h = 536	s = 0,5	
BFK1 - BFK3	IN 22 ISCAR	v = 350	h = 536	s = 0,5	
BB1 - BB3	Al ₂ O ₃				
BL1 - BL3	broušeno, ručně doleštěno	v = 350	h = 536	s = 0,5	ručně doleštěno

Tab. 12 rozdělení vzorků, metody obrábění a řezné podmínky

Materiál byl zakalen v oleji z teploty 1050°C. Poté byl 2x popouštěn při teplotě 520°C na tvrdost 63 HRC.

4.4. Použité zařízení

Experimentálním programem byl použit stroj pro zkoušky na únavu s rovinným ohybem a při kmitavém napětí v krutu typ PWYG od firmy Carl Shenc.

Účel použití:

Zkušební stroj slouží ke stanovení meze únavy materiálů při dynamicky se měnícím napětí na základě dynamických zkoušek krutem nebo ohybem. S přídatným zařízením pro předpětí lze vytvořit statický moment, takže umožňuje zjišťovat kromě meze únavy při souměrném střídavém namáhání také mez únavy při momentu předpětí a superponovaném střídavém momentu, např. ke stanovení diagramů meze únavy při kmitavém napětí. Lze též vyvodit i statické předpětí.

Měření momentu se provádí přes ocechovanou pružinovou tyč, jejíž deformace se měří číselníkovým indikátorem a je měřítkem pro namáhání.

Technická specifikace:

Kmitavý moment: $\pm 69 \text{ Nm} - \pm 490 \text{ Nm}$, $\pm 20 \text{ Nm} - \pm 196 \text{ Nm}$ s přídatným zařízením pro menší momenty

Statický moment: 0-981 Nm

0-392 Nm s přídatným zařízením pro menší momenty

Složený moment: 981 Nm

392 Nm s přídatným zařízením pro menší momenty

Frekvence kmitání:

Stejnoseměrný motor 750...3000 1/min

Úhel kmitu max. $\pm 7,5$ stupně

Upínací délka: max. 750 mm

Příkon: 4,8 kW

Nastavení pro zkoušku ohybem:

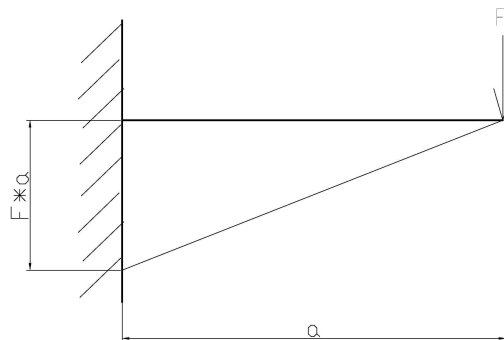
Při stanovení napětí vyvozeného ohybem nosníku je využíván elementární zákon teorie pružnosti a pevnosti, které je definováno jako:

$$\sigma = \frac{M * y}{I} \quad [\text{MPa}]$$

kde M je ohybový moment v Nm, y je vzdálenost těžiště profilu od krajních namáhaných vláken nosníku. Je definován v mm. I je moment setrvačnosti definován v mm^4

V případě tohoto stroje lze vzorek definovat jako nosník obdélníkového průřezu jednostranně pevně uchycený viz obr, je ohybový moment definován jako součin síly na páce, tedy

$$M_o = F * a$$



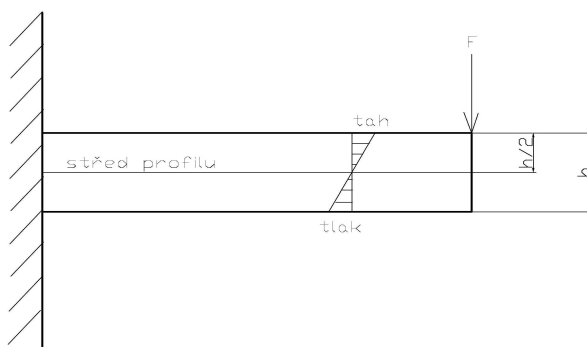
obr. 43– ohyb nosníku

Moment setrvačnosti obdélníkového průřezu je stanoven na:

$$I = \frac{b * h^3}{12} \quad [\text{mm}^4]$$

kde b značí šířku nosníku v nejužším místě a h výšku v mm.

Vzdálenost těžiště profilu od krajních namáhaných vláken u nosníku tohoto tvaru je $b/2$, při rovnoměrném ohybu je toto též umístěním neutrální osy.



obr. 44 ohyb vetknutého nosníku

Výsledný vzorec je:

$$\sigma = \frac{F * a * \frac{h}{2}}{b * h^3} = \frac{F * a}{b * h^2} \text{ [MPa]}$$

jmenovatel je také znám jako průřezový modul v ohybu obdélníkového průřezu W_o

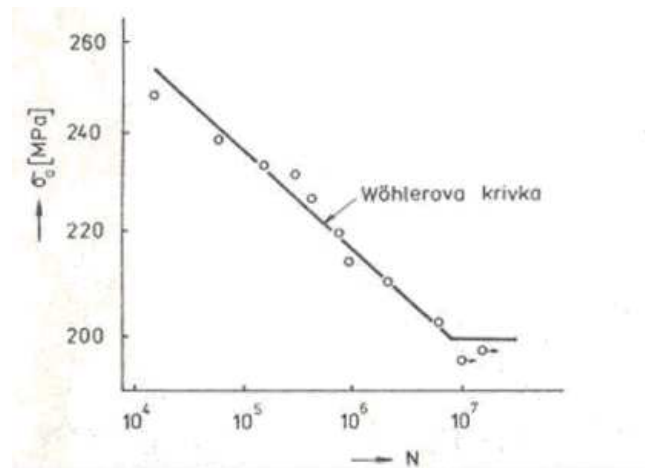
$$W_o = \frac{bh^2}{6} \text{ [mm}^3\text{]}$$

4.5. Měření vyvozeného momentu

Na použitém stroji firmy Shenck je pro měření vyvozeného napětí použita kalibrovaná zkrutná měřicí tyč jednostranně pevně uchycená k měřicí skříni. Pro eliminaci příčného zúžení, které nastane v důsledku zkrácení nosníku při ohybu, což vyplývá jednoznačně z Hookeova zákona je měřicí skříň pružně uchycena k loži stroje, čímž je zejména eliminováno přídavné parazitní napětí, které by výsledné měření mohlo negativně zkreslit. K měřicí tyči přiléhá otočné rameno, na které dosedá hrot číselníkového úchylkoměru. V tom důsledku, že tyč má v krutu lineární charakteristiku, lze tímto způsobem snadno nastavit příslušné napětí. Při kalibraci závažími bylo zjištěno, že 170 dílků na číselníkovém úchylkoměru, jehož stupnice je rozdělena po tisícinách mm odpovídá momentu 24,5 Nm.

Vyhodnocování výsledků únavových zkoušek

Nejčastějším výsledkem těchto experimentů je tvorba tzv: Wöhlerovy křivky – vynesení amplitudy nominálního napětí v souřadnicovém systému v numerickém měřítku na ose y a počet zatěžovacích cyklů v logaritmickém měřítku na ose x

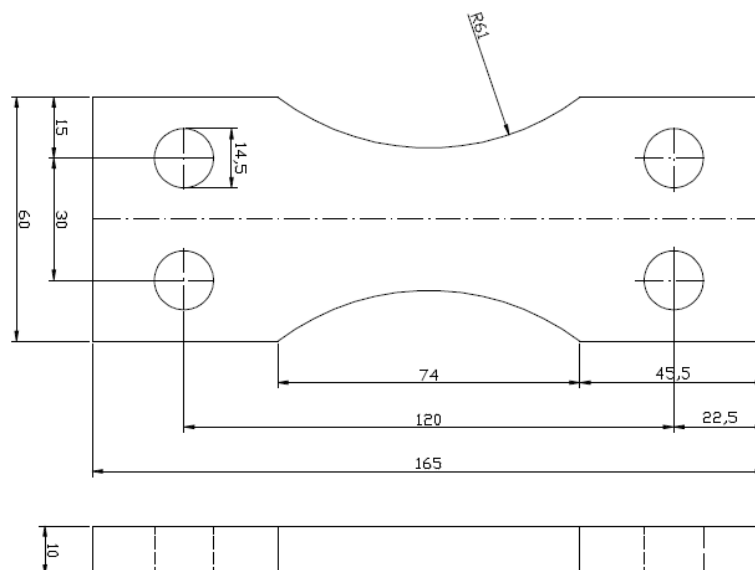


obr. 45 Wöhlerova křivka

Nejzávažnějším výsledkem Wöhlerovy křivky je určení předpokládané závislosti počtu kmitů na jejich amplitudě, tedy určení životnosti součásti při dynamickém zatížení.

Tvar zkoušené tyče:

Pro tento stroj jsou pro zkoušku plochým ohybem určeny tyto vzorky, které jsou vyznačeny na následujícím obr.



obr. 46 tvar a rozměry použitých zkušebních vzorků, tloušťka zkušebních vzorků- 5,5mm Tvar těchto vzorků odpovídá normě ČSN 42 0363

4.6. Dotykový profiloměr Marsurf M 300 [25]

Přístroj na měření drsnosti povrchu Marsurf M 300.

Přenosný přístroj na měření drsnosti povrchu, využívající bezdrátového připojení bluetooth mezi posuvnou a vyhodnocovací jednotkou a s vestavěnou tiskárnou. Měřená data mohou být přenesena na počítač.

„Velký, barevně podsvícený displej zobrazující parametry a profily vám umožňuje bezchybné odečtení naměřených hodnot i při špatných světelných podmínkách. Navíc Marsurf M 300 disponuje integrovanou pamětí pro 40.000 naměřených hodnot a 30 profilů, funkcemi pro monitorování překročení tolerance, výběrem vertikálního měřítka a nesymetrické nastavení referenčních čar pro výpočet počtu špiček R_{pc}.“ [25]

- Měřicí rozsah do 350 μm (.014 in)
- Jednotky μm/μinch volitelně
- Normy: ISO/ASME/JIS a MOTIF volitelně
- Délka měřicí dráhy dle DIN EN ISO 4288/ ASME B46.1:
1.75 mm, 5.6 mm, 17.5 mm (0.07 in, 0.22 in, 0.7 in)
i dle EN ISO 12085: 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 12 mm, 16 mm
- Počet měřících drah: volitelně 1 až 5
- Automatická volba filtru a měřené dráhy
- Vyhodnocované parametry: DIN/ISO: Ra, Rq, Rz, Rmax, Rp, Rpk, Rk, Rvk, Rv, Mr1, Mr2, A1, A2, Vo, Rt, R3z, R_{pc}, R_{mr}, R_{Sm}, R_{sk} JIS: Ra, Rz, RzJIS, Sm, S, tp ASME: Rp, R_{pm} MOTIF: R, Ar, Rx, W, CR, CL, CF
- Znázornění překročení tolerance na displeji včetně záznamu měření
- Automatické nebo manuální nastavení stupnice
- Tisk R-profilu (ISO/ASME/JIS), P-profilu (MOTIF), a záznamu měření
- Datový výstup s nebo bez časových údajů
- Integrovaná paměť pro 40,000 naměřených hodnot a 30 profilů
- Dynamické funkce pro kalibraci
- Možnost uzamčení nastavení přístroje s možností použití hesla



obr. 47 Marsurf M 300[25]

4.7. Vnikací zkoušky

Na vzorcích byly provedeny zkoušky tvrdosti pomocí Vickersovy i Rockwellovy metody. U Rockwellovy metody bylo zvoleno zatížení 1471N tj. 150 HRC, u Vickersovy metody bylo zvoleno zatížení 294,2 N, v obou případech působilo zatížení cca 12 vteřin a následně byla odečtena hodnota tvrdosti - u Rockwella. U Vickerse byly změřeny délky úhlopříček. Měření probíhalo při laboratorní teplotě cca 22°C. Vnikací metoda byla provedena z obou stran, z každé strany bylo měřeno na třech různých místech.

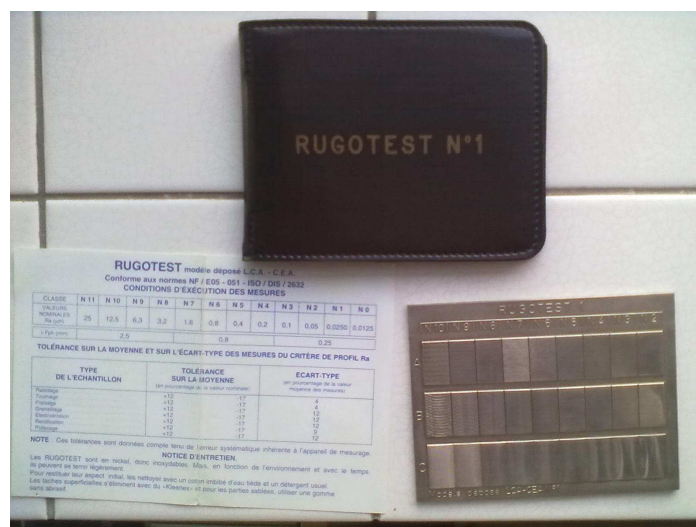
4.8. Naměřené hodnoty drsností povrchů

Průběh měření – konfokální mikroskop

Na každém vzorku byla měřena drsnost povrchu Ra a plošná drsnost SRa. Měření bylo provedeno uprostřed, jelikož zde dochází při zkoušce střídavém namáhání k největšímu napětí a zároveň zde lze očekávat lom zkušební vzorku. Zkušební tyče u horní (frézované strany) bylo měření prováděno kolmo na stopy po nástroji (ve směru x), zkušební tyče drsnost u spodní, broušené strany byla měřena drsnost v ve směru x a y (obr. 49 *směry měření parametru drsnosti*).

Měření parametrů drsnosti povrchu bylo u vzorků realizováno vždy na dvou místech a v každém místě bylo 2x zopakováno a výsledky statisticky zpracovány. Pro měření drsnosti byl zvolen objektiv 10x celkové zvětšení bylo tedy 100x Délka měřeného úseky byla 2560 μ m. Vzhledem k omezeným možnostem nastavení měřené délky, vlivem omezeného počtu objektivů, byla tato délka nejbližší doporučené délce viz. Tab. 7 a zároveň zabrala o něco větší délku měřeného úseku a tím se zahrnula (zatím nevím, jak to formulovat, byl na to širší pohled). Při měření byla ověřena „správnost“ nastavení parametrů mikroskopu na zkušební vzorku s definovanou drsností viz. obr. 48 *Rugotest*. Na definovaném povrchu Ra 0,8 μ m byla naměřena hodnota Ra 0,8001 μ m.

Po vytvoření snímku povrchu a odfiltrování šumů filtrem pro obráběné povrchy byly zaznamenány parametry Ra, SRa a pořízeny snímky povrch 2D, 3D, profil 2D a plošný profil ve 3D.



obr. 48 Rugotest

Postup při měření – dotykový profiloměr

Počet a směry měření jsou shodné jako u měření konfokálním mikroskopem. Byl zaznamenán parametr drsnosti Ra. Měření bylo prováděno na délce $l = 1,750$ mm



obr. 49 směry měření parametru drsnosti

BFL1 – BFL3

Označení	Horní strana				Spodní strana			
	Ra x1	Ra x2	Průměr Ra x	Sra	Ra y3	Ra y4	Průměr Ra y	Sra
BFL1	1,30	1,38	1,34	1,17	0,80	0,97	0,89	1,10
BFL2	1,60	1,49	1,55	1,76	0,75	0,78	0,76	0,94
BFL3	1,44	1,52	1,48	1,39	0,73	0,94	0,84	0,84

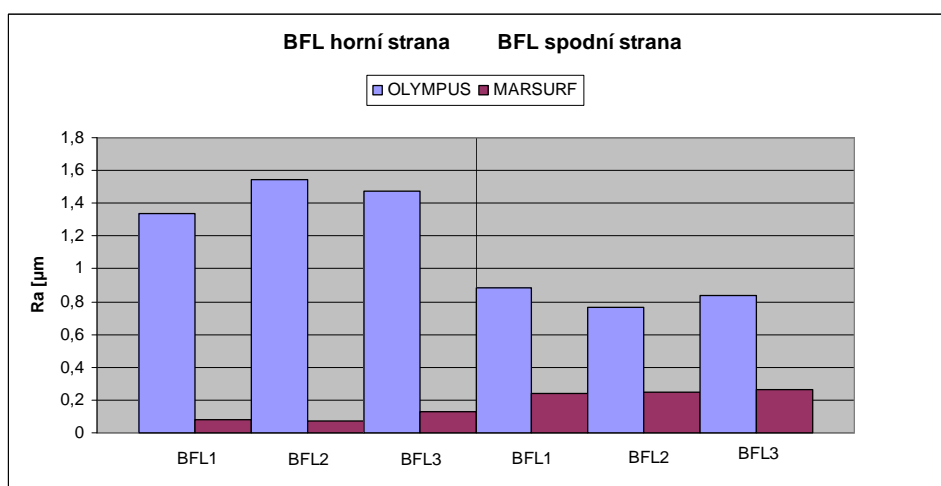
Tab. 13 naměřené hodnoty drsností povrchu konfokálním mikroskopem

Označení	Horní strana			Spodní strana		
	Ra x1	Ra x2	Průměr Ra x	Ra y3	Ra y4	Průměr Ra y
BFL1	0,08	0,073	0,0765	0,239	0,237	0,238
BFL2	0,071	0,079	0,075	0,284	0,25	0,267
BFL3	0,052	0,206	0,129	0,236	0,264	0,25

Tab. 14 naměřené hodnoty drsností povrchu dotykovým profiloměrem

Označení	Horní strana					Spodní strana				
				průměr	Odchylka v % - špatně				průměr	Odchylka v %
BFL1	566	585	606	586	0,0	574	577	554	554	-5,8
BFL2	598	598	596	597,6	1,9	581	579	581	580,4	-1,0
BFL3	540	552	537	543,0	-7,9	552	579	566	565,8	-3,6

Tab. 15 hodnoty tvrdosti HV 30



graf 1 porovnání naměřených hodnot

BFK1 –BFK3

Označení	Horní strana				Spodní strana			
	Ra x1	Ra x2	Průměr Ra x	Sra	Ra y3	Ra y4	Průměr Ra y	Sra
BFK1	1,11	0,75	0,93	1,25	0,86	0,65	0,76	1,20
BFK2	1,99	1,91	1,95	1,11	0,72	0,71	0,71	0,87
BFK3	1,26	1,60	1,43	1,46	0,59	0,52	0,55	0,55

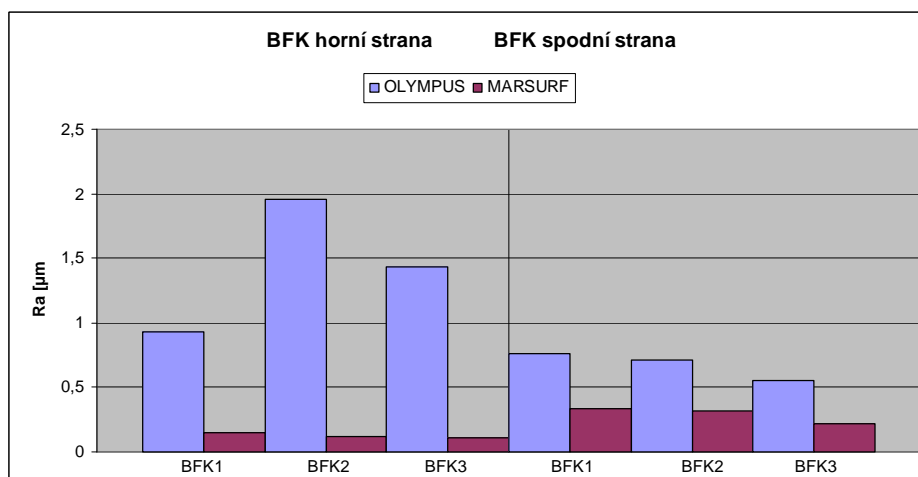
Tab. 16 naměřené hodnoty drsností povrchu konfokálním mikroskopem

Označení	Horní strana			Spodní strana		
	Ra x1	Ra x2	Průměr Ra x	Ra y3	Ra y4	Průměr Ra y
BFK1	0,145	0,155	0,15	0,291	0,375	0,333
BFK2	0,1	0,136	0,118	0,327	0,199	0,316
BFK3	0,111	0,109	0,11	0,228	0,199	0,2135

Tab. 17 naměřené hodnoty drsností povrchu dotykovým profiloměrem

Označení	Horní strana					Spodní strana				
				průměr	Odchylka v %				průměr	Odchylka v %
BFK1	575	564	583	574	-2,0	596	559	585	585	-0,2
BFK2	604	662	620	628,8	6,8	620	568	590	593,0	1,2
BFK3	552	570	623	581,5	-0,8	566	549	574	562,8	-4,1

Tab. 18 hodnoty Tvrdosti HV 30



graf 2 porovnání naměřených hodnot

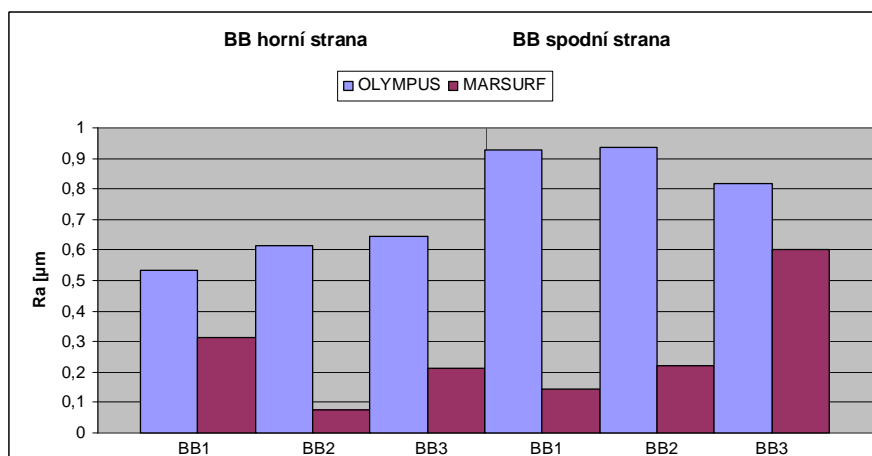
BB1 – BB3

Označení	Horní strana				Spodní strana			
	Ra x1	Ra x2	Průměr Ra x	Sra	Ra y3	Ra y4	Průměr Ra y	Sra
BB1	0,49	0,58	0,54	0,63	0,83	1,03	0,93	1,23
BB2	0,61	0,63	0,62	0,86	1,08	0,79	0,94	1,11
BB3	0,56	0,73	0,64	1,15	0,67	0,96	0,82	0,86

Tab. 19 naměřené hodnoty drsností povrchu konfokálním mikroskopem

Označení	Horní strana			Spodní strana		
	Ra x1	Ra x2	Průměr Ra x	Ra y3	Ra y4	Průměr Ra y
BB1	0,4877	0,5832	0,53545	0,8268	1,0281	0,92745
BB2	0,6065	0,6252	0,61585	1,0796	0,7905	0,93505
BB3	0,5594	0,7258	0,6426	0,6727	0,9588	0,81575

Tab. 20 naměřené hodnoty drsností povrchu dotykovým profiloměrem



graf 3 porovnání naměřených hodnot

Horní strana					Spodní strana			
Označení				průměr				průměr
BB1	53	53	54	53,3	53	52,8	53,5	53,1
BB2	54	55	55	54,7	52,8	54,8	55	54,2
BB3	52,2	54	53,5	53,2	54	52,5	53,5	53,3

Tab. 21 Hodnoty tvrdosti HRC150

Horní strana						Spodní strana				
Označení				průměr	Odchylka v %				průměr	Odchylka v %
BB1	554	589	557	567	-3,4	533	552	604	604	3,0
BB2	570	577	585	577,3	-1,5	608	598	623	609,6	3,9
BB3	594	585	575	584,8	-0,2	563	594	583	580,0	-1,0

Tab. 22 hodnoty Tvrdosti HV 30

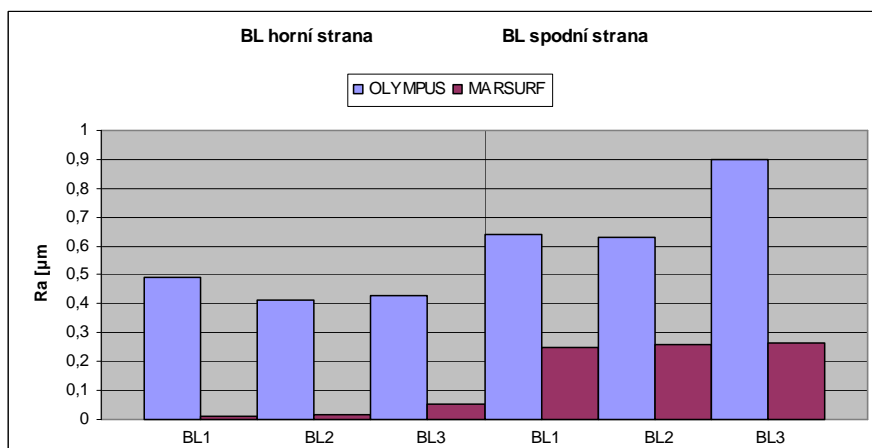
BL1-BL3

Označení	Horní strana						Spodní strana				
	Ra x1	Ra x2	Průměr Ra x	Ra y1	Ra y2	Průměr Ra y	Ra y3	Ra y4	Průměr Ra y	Sra	
BL1	0,45	0,53	0,49	0,93	0,69	0,81	0,76	0,52	0,64	0,46	
BL2	0,52	0,30	0,41	0,91	0,22	0,56	0,66	0,61	0,63	0,72	
BL3	0,52	0,33	0,43	0,28	0,56	0,42	0,99	0,81	0,90	1,02	

Tab. 23 naměřené hodnoty drsností povrchu konfokálním mikroskopem

Označení	Horní strana						Spodní strana			
	Ra x1	Ra x2	Průměr Ra x	Ra y1	Ra y2	Průměr Ra y	Ra y3	Ra y4	Průměr Ra y	
BL1	0,013	0,012	0,0125	0,016	0,023	0,0195	0,251	0,25	0,2505	
BL2	0,016	0,017	0,0165	0,014	0,017	0,0155	0,281	0,235	0,258	
BL3	0,009	0,101	0,055	0,012	0,008	0,01	0,265	0,259	0,262	

Tab. 24 naměřené hodnoty drsností povrchu dotykovým profiloměrem



graf 4 porovnání naměřených hodnot

Hodnoty tvrdosti HRC150

Označení	Horní strana				průměr	Spodní strana			
BL1	53	55	52,5		53,5	55	55	55	55
BL2	55,5	56	55,8		55,8	55	55	55	55
BL3	52	51	51,8		51,6	52,5	52,5	53	52,7

Tab. 25 hodnoty tvrdosti HRC150

Označení	Horní strana					Spodní strana				
				průměr	Odchylka v %				průměr	Odchylka v %
BL1	572	564	557	564	-3,8	575	563	579	572	-2,4
BL2	639	614	592	615,4	4,8	612	594	594	600,3	2,4
BF3	608	631	620	619,8	5,5	592	598	592	594,4	1,4

Tab. 26 hodnoty Tvrdosti HV 30

BF1-BF3

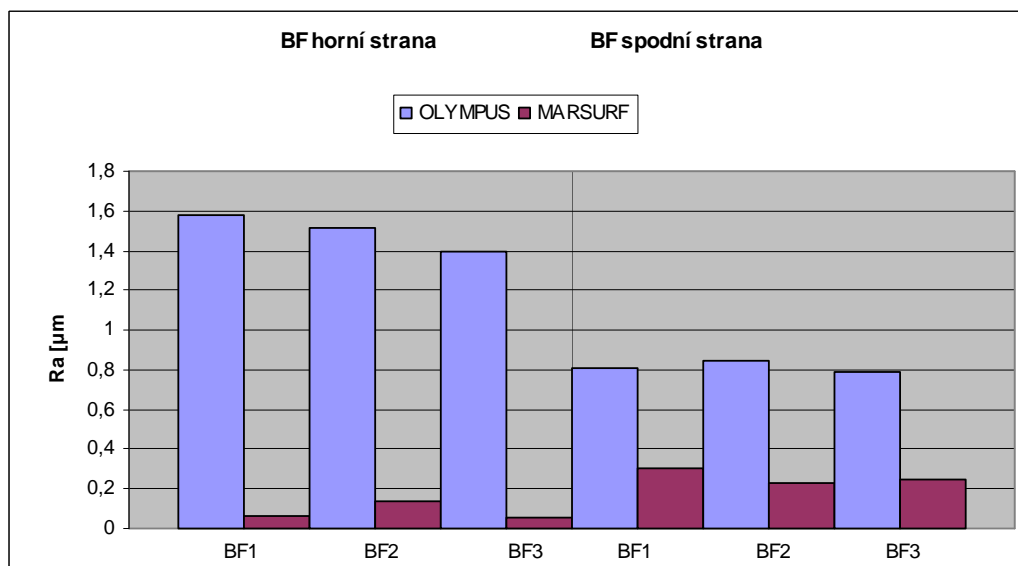
Konfokální mikroskop

Označení	Horní strana					Spodní strana			
	Ra x1	Ra x2	Průměr Ra x	Sra	Ra y3	Ra y4	Průměr Ra y	Sra	
BF1	1,32	1,85	1,58	2,21	0,90	0,71	0,81	1,02	
BF2	1,63	1,40	1,52	2,68	0,97	0,72	0,84	0,99	
BF3	1,39	1,40	1,39	1,18	0,83	0,75	0,79	0,80	

Tab. 27 naměřené hodnoty drsností povrchu konfokálním mikroskopem

Horní strana				Spodní strana		
Označení	Ra x1	Ra x2	Průměr Ra x	Ra y3	Ra y4	Průměr Ra y
BF1	0,043	0,079	0,061	0,271	0,337	0,304
BF2	0,141	0,143	0,142	0,241	0,223	0,232
BF3	0,043	0,153	0,098	0,27	0,234	0,252

Tab. 28 naměřené hodnoty drsností povrchu dotykovým profiloměrem



graf 5 porovnání naměřených hodnot

Horní strana						Spodní strana					
Označení				průměr	Odchylka v %				průměr	Odchylka v %	
BF1	594	585	594	591	0,9	600	589	589	589	0,4	
BF2	587	596	592	591,8	1,0	604	589	590	594,4	1,4	
BF3	592	635	600	609,3	3,8	590	604	606	600,3	2,4	

Tab. 29 hodnoty Tvrdosti HV 30

4.9. Průběh experimentu

Při tahové zkoušce se stal ten případ, že zkušební vzorek o průměru 10 mm praskl v závitě, což bylo zřejmé způsobeno příliš velkým průměrem zkušební části. Z důvodu času nebylo možné vyrobit nové zkušební tyče, ale materiál praskl při přepočtu na hodnotě meze pevnosti $R_m = 2260$ MPa. Tahová zkouška se prováděla pro zjištění meze kluzu a pevnosti.

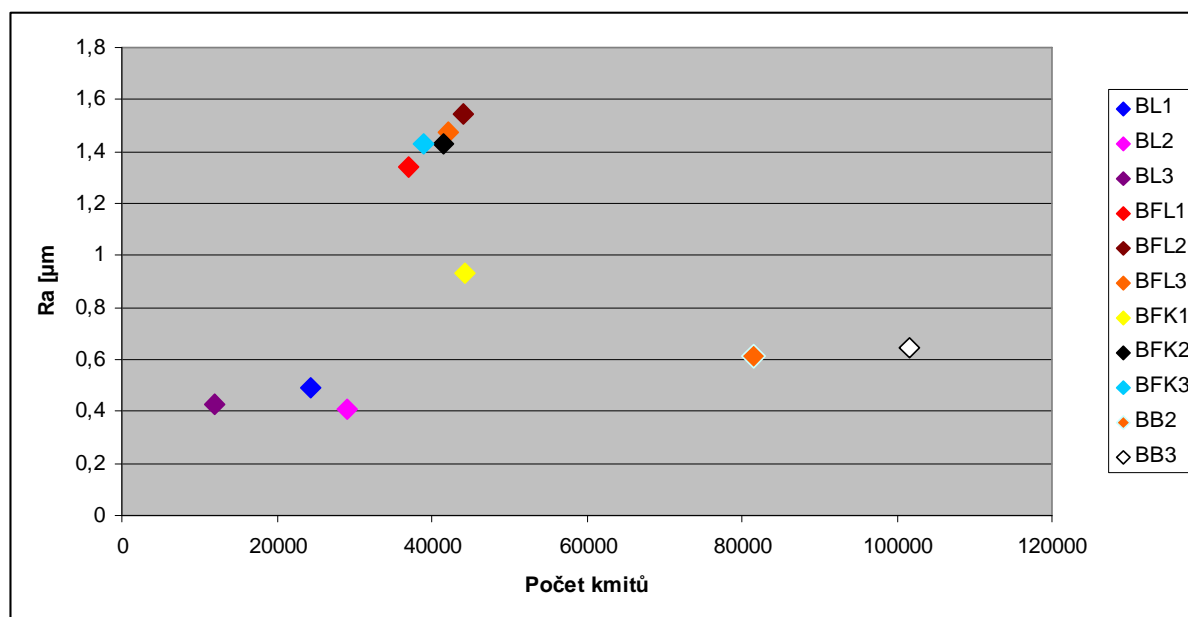
Vzorky byly po měření drsnosti a měření tvrdosti posléze upevněny na únavový stroj SHENCK. Nejdříve byly použity zkušební vzorky. Vzhledem k předpokládaného vysokého ovlivnění výsledků vlivem mikrostruktury z důvodu značného obsahu velkých hrubých karbidů byla nejdříve zvolena nižší úroveň namáhání 350 MPa při 10 Hz. Po proběhnutí značného počtu cyklů – 12,1 miliony byl test zastaven a na vzorku se dosud neprojevil žádné trhliny. Dále bylo napětí zvýšeno na 400 MPa a znovu byl spuštěn test s jinak stejnými parametry. Na vzorku bylo nakmitáno 5,9 milionů cyklů, bez jakýchkoliv známek porušení.

Bylo zvýšeno napětí posléze na 500 MPa a test pokračoval. Po nakmitání 5 milionů bylo napětí zvýšeno na 550 MPa. Ani poté nedošlo ke zlomení zkušební vzorku ani po nakmitání 6 milionů kmitů. Po nastavení 600 MPa došlo k lomu vzorku v počtu kmitů 14 000 kmitů. Byl použit druhý vzorek, kde bylo provedeno nastavení přímo 550 MPa, v tomto případě došlo k prasknutí vzorku ve 3 případech při počtu kmitů od 12 100- 15 500 kmitů.

Všechny vzorky byly tedy namáhány podle předchozího schématu, kdy byly na vzorcích nakmitány počty cyklů 3 mil a posléze byla hodnota napětí zvýšena z 400 až na 600 MPa.

Vzorek	počet cyklů
BL1	24400
BL3	29000
BL3	11904
BFL1	37100
BFL2	44100
BFL3	42050
BFK1	44200
BFK2	41600
BFK3	38900
BB2	81600
BB3	101600

Tab. 30 počty cyklů do přelomení při zatížení 600 MPa a frekvenci 10 Hz



graf 5 závislost drsnosti povrchu a počtu cyklů

4.10. Diskuse výsledků

4.10.1. Měření drsnosti povrchu

Při porovnání výsledků naměřených hodnot parametrů Ra jsou výrazné rozdíly mezi jednotlivými metodami měření. Nejmenší rozdíly byly zaznamenány u povrchů broušených. Možné příčiny jsou různé délky měřených úseků, špatné odfiltrování šumu, či drobné

nečistoty vyskytující se na povrchu. Pro vytvoření závislosti drsnosti povrchu na únavě vzorků byly použity hodnoty z konfokálního mikroskopu, u něhož bylo ověřeno správné nastavení parametrů mikroskopu na zkušebním vzorku s definovanou drsností viz. obr. 48 Rugotest. Na definovaném povrchu Ra 0,8 μm byla naměřena hodnota Ra 0,8001 μm

4.10.2. Únavové zkoušky

První předpoklad, že test bude téměř znemožněn výskytem velkého množství hrubých karbidů v mikrostruktuře se nepotvrdil. Nicméně k ovlivnění oproti teoretické hodnotě 0,3-0,4 Rm materiálu došlo.

Test probíhal nad mezí únavy a křivka časované pevnosti takto zpracovaného materiálu je zřejmě značně strmá.

Z Tab.26 je zřejmé, že v testu nejlépe dopadly vzorky s broušeným povrchem. Povrchy frézované vykazují velmi podobné hodnoty, rozdílné nástroje při stejných parametrech obrábění neměly až takový vliv na únavu, jako jednotlivé metody obrábění.

Při porovnání frézovaných vzorků s broušenými bylo zjištěno, že drsnost frézovaných ploch je přibližně o polovinu větší než ploch broušených a počet cyklů oproti broušeným o polovinu nižší. Iniciale a následné šíření trhlin proběhlo u některých zkoumaných vzorků od frézované plochy do materiálu. Nejhuře dopadly vzorky leštěné, které dosahují zhruba čtvrtiny počtu cyklů oproti broušeným vzorkům, přitom měli téměř stejné hodnoty tvrdosti a původní povrch vzorků BL1-BL3 byl před leštěním broušený. Leštění probíhalo ručně a za sucha, tudíž by ani nemělo dojít k mechanickému či tepelnému ovlivnění.

Nebylo možné otestovat všechny vzorky, jelikož se zjistilo že jsou křivé a tudíž nepoužitelné, konkrétně kompletní sada BF, neboť při indukčním kalení došlo ke značné deformaci vzorků a vzorek BB1 z broušené sady.

5. Závěr

V průběhu testu bylo zjištěno, že způsob obrobení a tím způsobené ovlivnění povrchových vrstev je rozeznatelné pomocí únavových zkoušek. Je to zřejmě také způsobeno způsobem namáhání střídavým ohybem, kdy je v povrchových vrstvách vždy nejvyšší napětí střídající se s nejvyšší amplitudou.

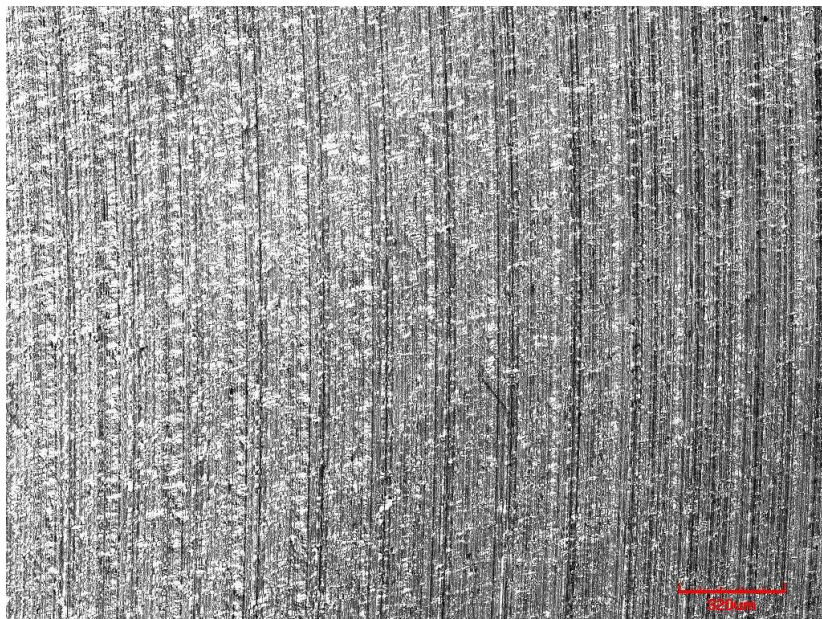
Nejhůře v testu dopadly vzorky leštěné. Jestli se výsledky potvrdí, bude to předmětem budoucího zkoumání. Boky vzorků byly též leštěné ručně, jelikož nebyl k dispozici stroj, jakým by to bylo možno provést, zde bylo však leštění velmi krátké. Z toho vyplývá značná náchylnost únavových testů na výsledný stav povrchu.

Vzhledem k vysoké časové a finanční náročnosti testování nebylo možno provést více experimentů, avšak podařilo se prokázat, že touto cestou lze jít.

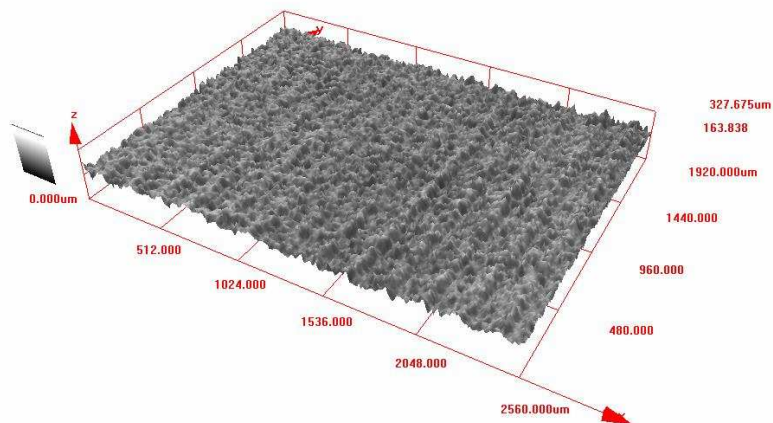
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

- [1] BUMBÁLEK, B.; ODVODY, V.; ODŠTÁL, B.: *Drsnost povrchu*. Praha, 1989.
- [2] BUMBÁLEK, L.: *Vlastnosti povrchové vrstvy a jejich vliv na únavu*. Brno, 2004.
- [3] DAVIM, J.P.: *Surface integrity in Machining*. Springer, 2009.
- [4] ASM Handbook; vol.8: *Mechanical Testing*. ASM International, 1997.
- [5] online: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf
- [6] online: http://www.ateam.zcu.cz/download/FOR_INDUSTRY_Kriz_final_2010.pdf
- [7] online: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/Prednasky-PP2/3-4-prednaska.doc>
- [8] KRAUS, V.: *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň, 2000.
- [9] PTÁČEK, L. A KOLEKTIV: *Nauka o materiálu I*. Brno, 2003.
- [11] KOTLANOVÁ, A.: *Drsnost povrchu*. zcu.yc.cz/TD/DRSNOST.doc
- [12] http://www.ateam.zcu.cz/download/historie_mikroskopie.pdf
- [13] FIALA, J.; KRAUS, I.: *Povrchy a rozhraní*. ČVUT v Praze, 2009.
- [14] http://www.ateam.zcu.cz/download/Integrita_prednaskaTZ.pdf
- [15] HOSNEDL, S.: *Příručka strojního inženýra I*. Praha, 1999.
- [16] KRAUS, V.: *Tepelné zpracování a slinování*. Plzeň, 2000.
- [17] SKÁLOVÁ, J. a kolektiv: *Nauka o materiálu*. Plzeň, 2006.
- [18] <http://cesar.fme.vutbr.cz/informace/nezelezo/Fe258.htm>
- [19] http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def_kontrola_sv.pdf
- [20] http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrlosti.pdf
- [21] http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni_inzenyrstvi_se/atlas/kapitoly/prostredim
- [22] <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdest-vickers.htm>
- [23] <http://svanda.webz.cz/vyuka/legury.htm>
- [24] <http://www.akrostal.pl/cs/12080NC11.html>
- [25] <http://www.mahr.cz/index.php?NodeID=13279>
- [26] <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/MAE/ukazky.php>

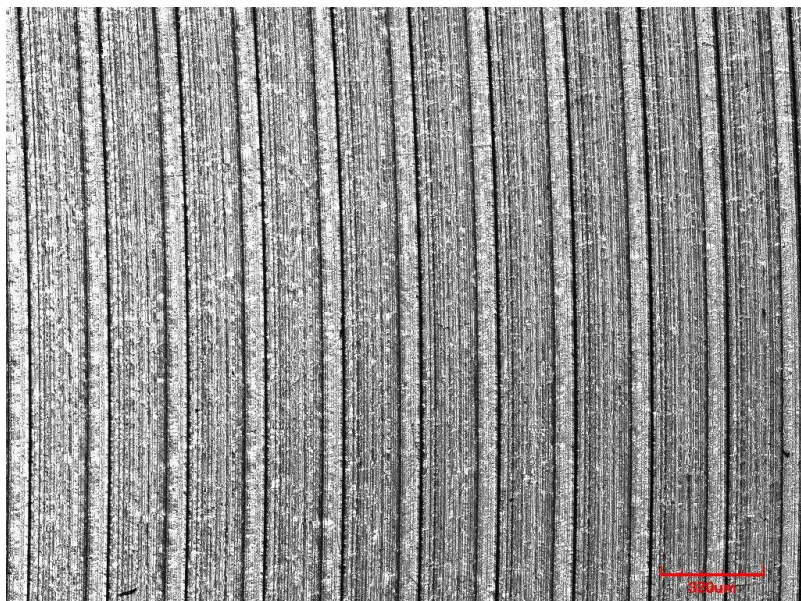
PŘÍLOHA



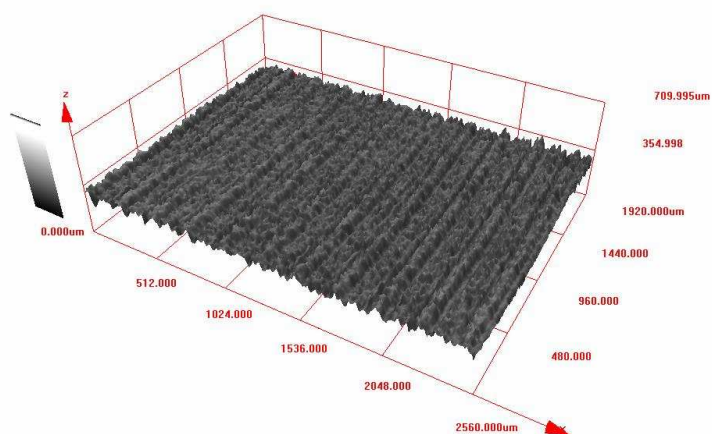
obr. 50 BFLI – 2D snímek, pravidelná stopa po nástroji



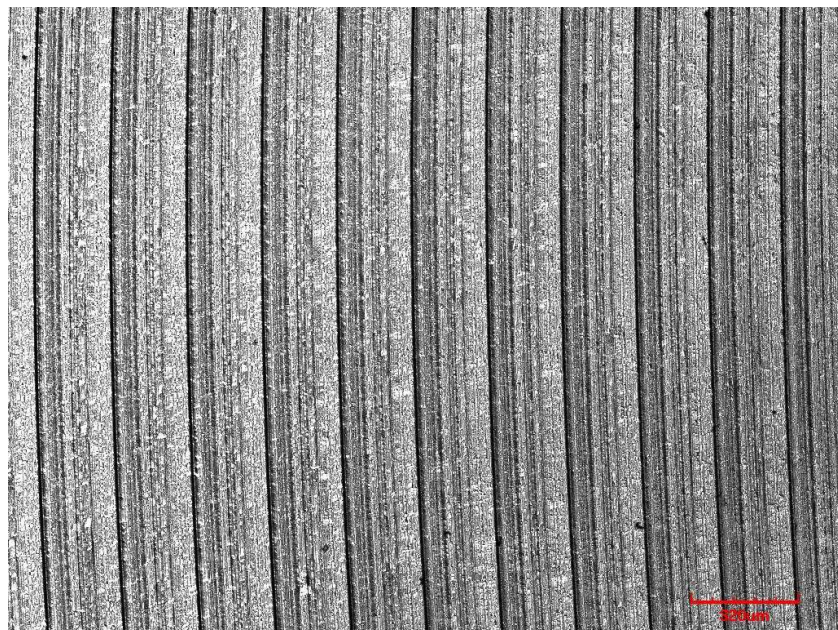
obr. 51 BFLI – 3D snímek



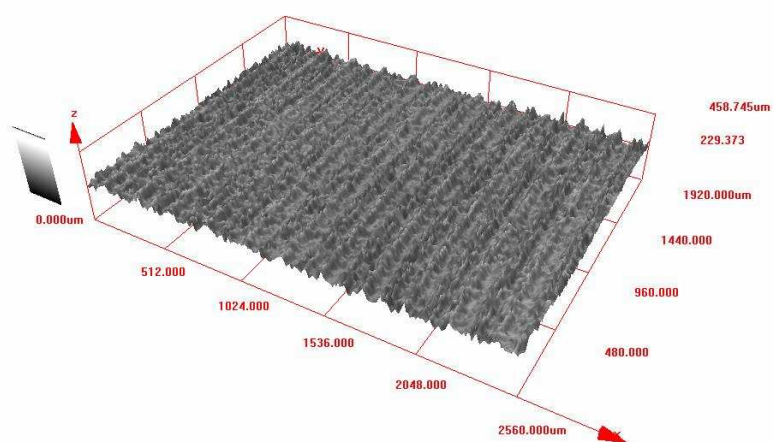
obr. 52 BFL2 -2D snímek, pravidelná stopa po nástroji



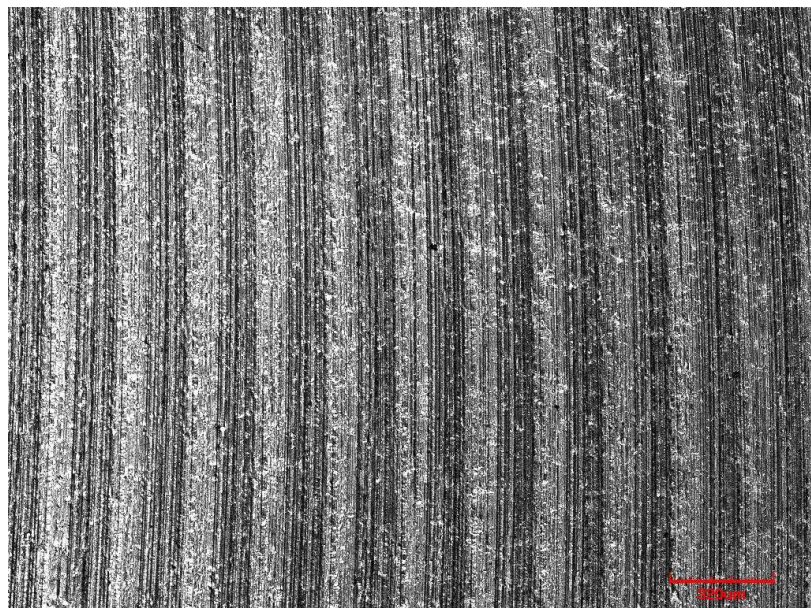
obr. 53 BFL2 -3D snímek



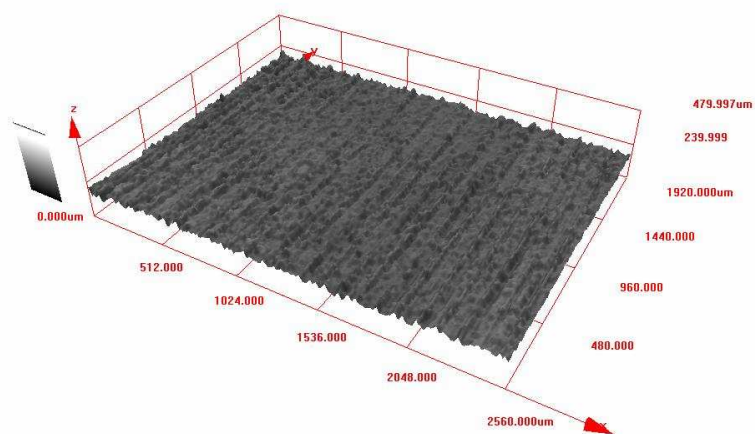
obr. 54 BFL3 – 2D snímek, pravidelná stopa po nástroji



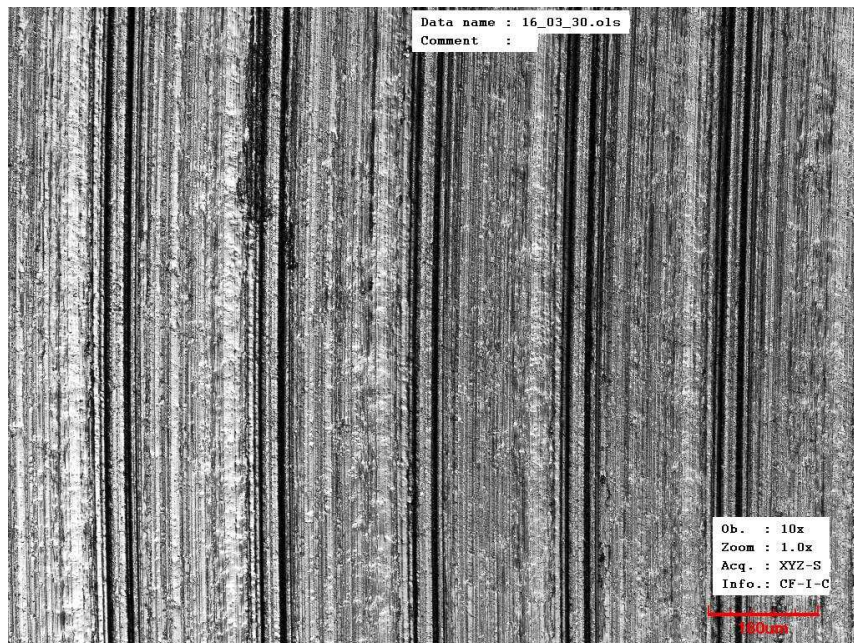
obr. 55 BFL3 -3D



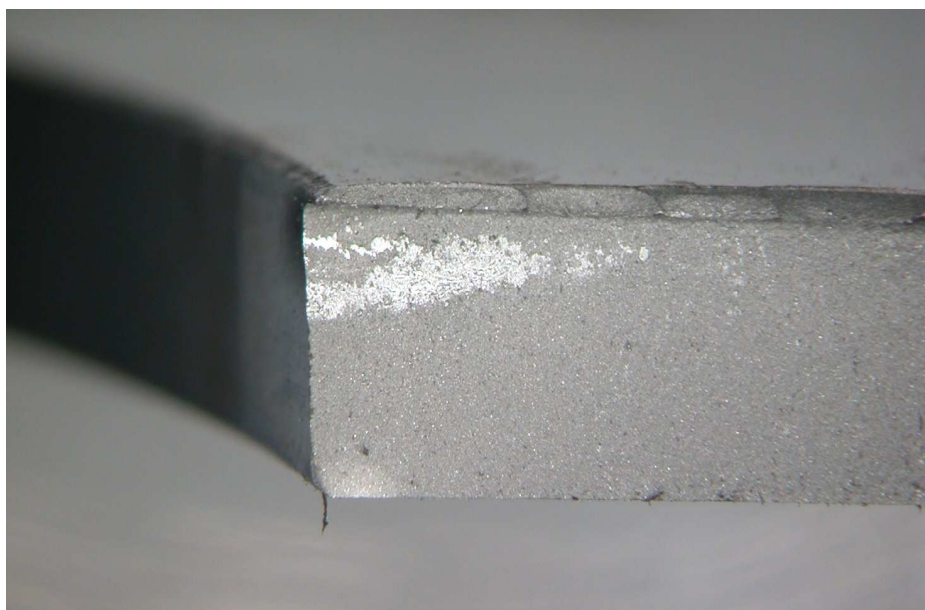
obr. 56 BFK1 -2D pravidelná stopa nástroje



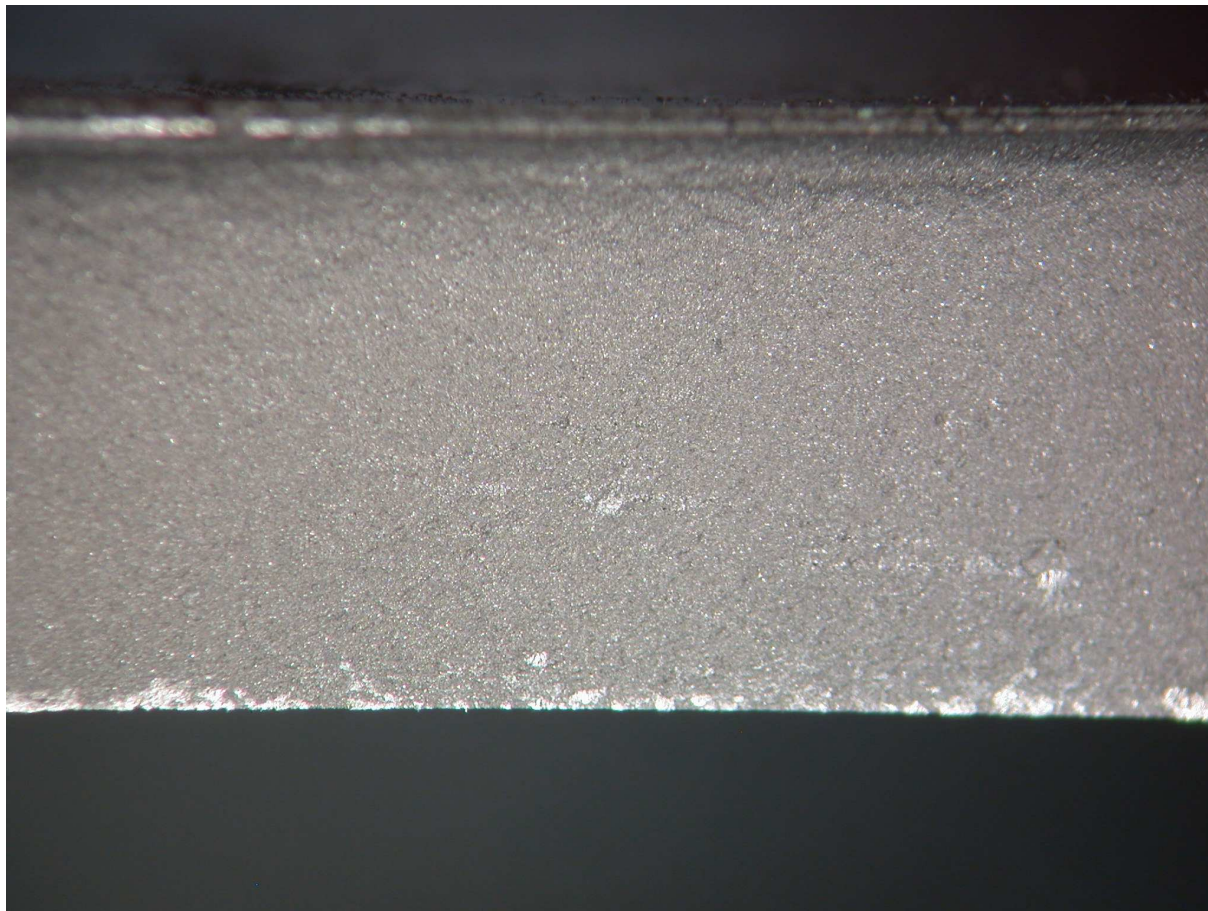
obr. 57 BFK1 -3D snímek



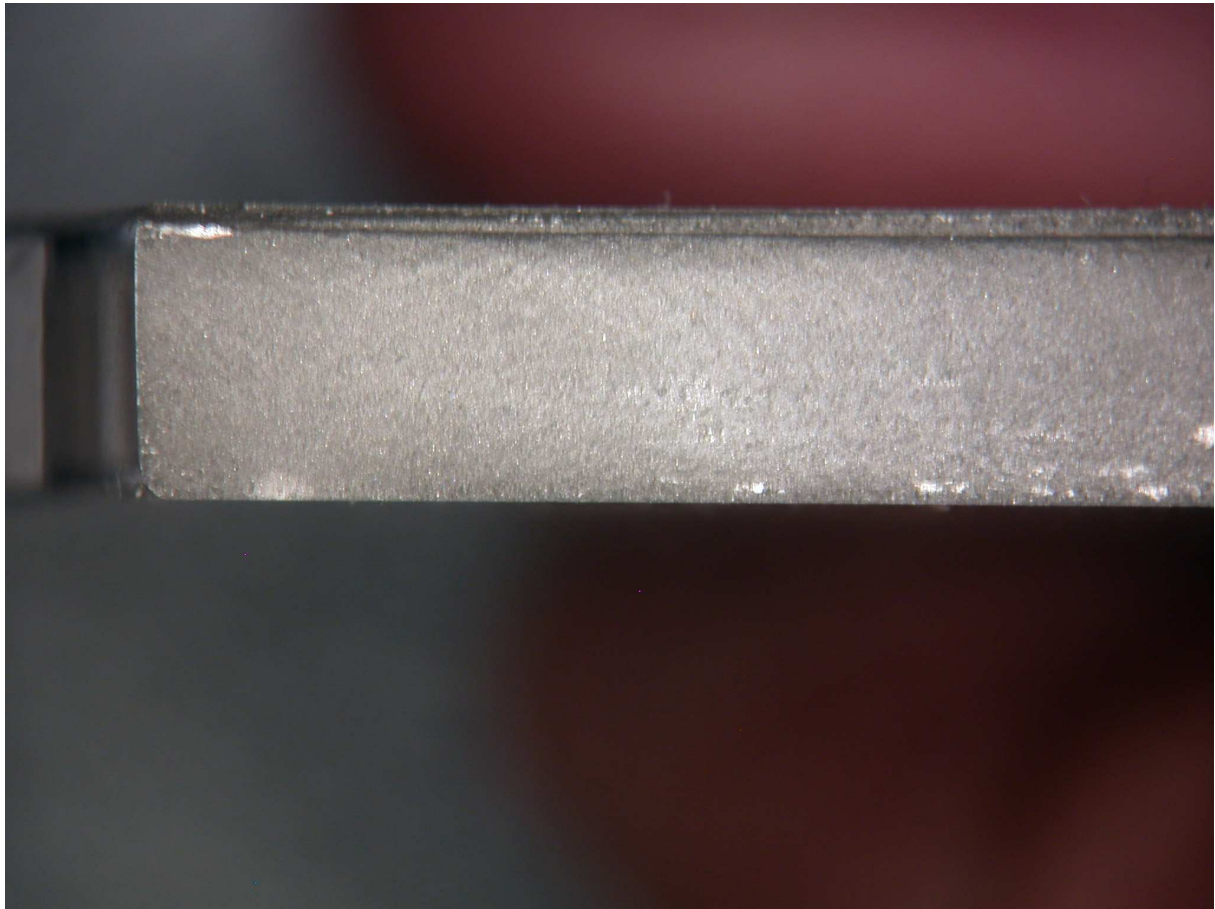
obr. 58 BFK2 -2D pravidelná stopa nástroje



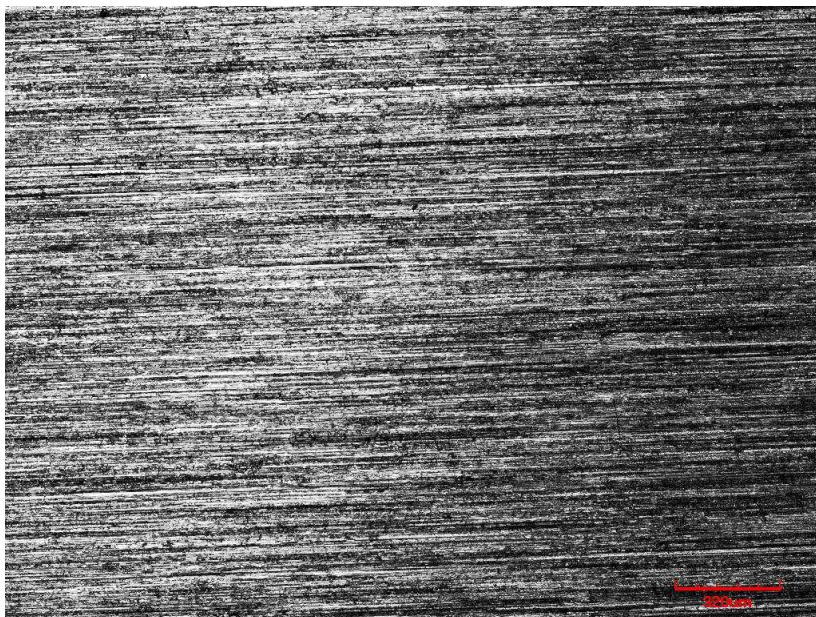
obr. 59 BFK1 lomová plocha



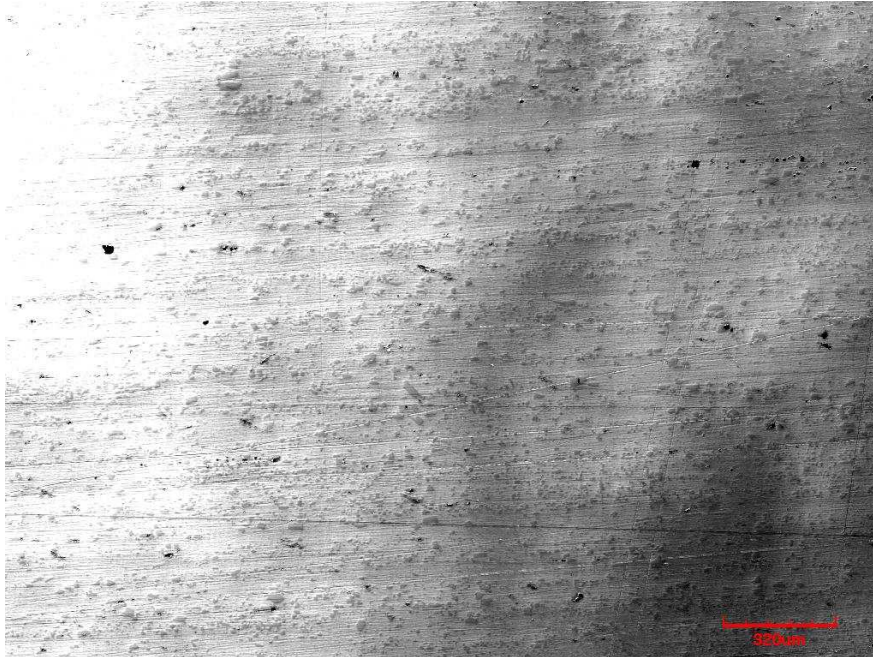
obr. 60 BFK2 lomová plocha



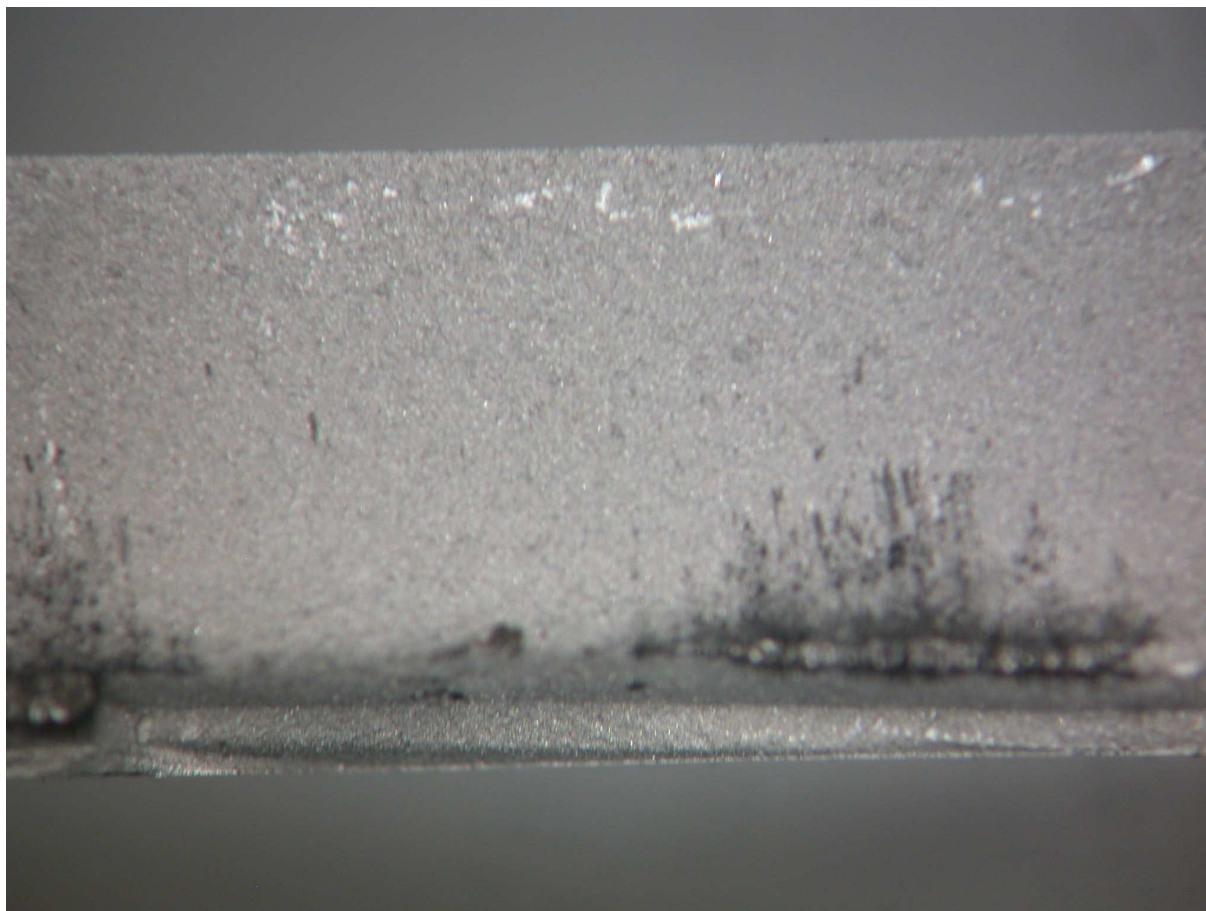
obr. 61 BFK3 lomová plocha



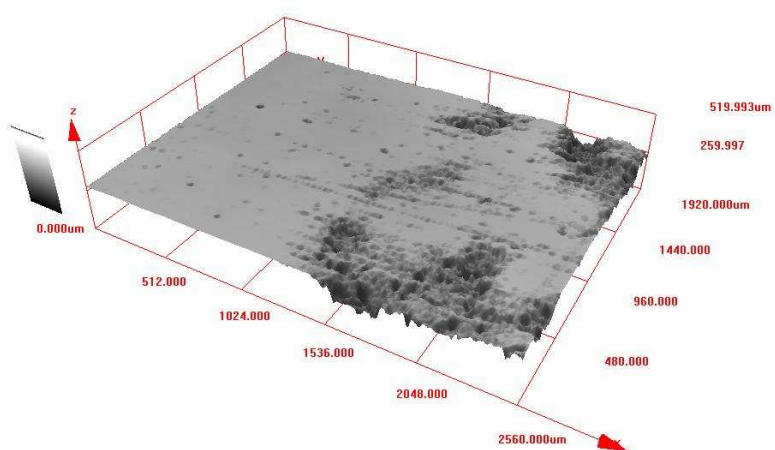
obr. 62 BB1 -2D Nepravidelné stopy po nástroji oproti frézovaným povrchům, ale patrný směr broušení – podél delší strany vzorku



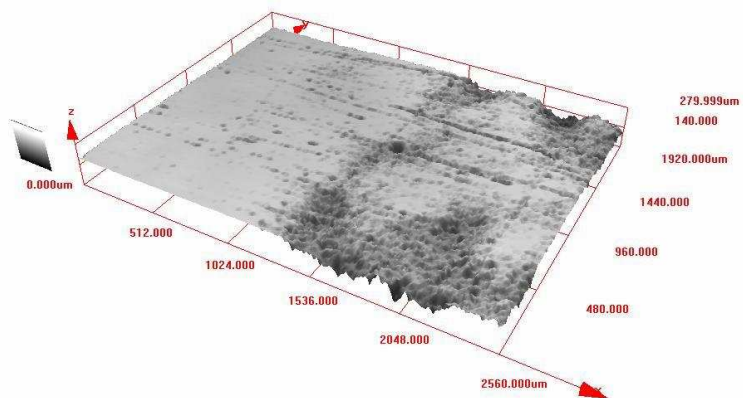
obr. 63 BL2-2D u vzorků s leštěným povrchem byl při stonásobném zvětšení patrný směr po broušení, vyskytují se zde různě orientované drobné rýhy a povrch je do jisté míry zvlněný. To vše vlivem ne zcela dokonalém ručním broušením. Na snímku jsou patrná karbidická zrna.



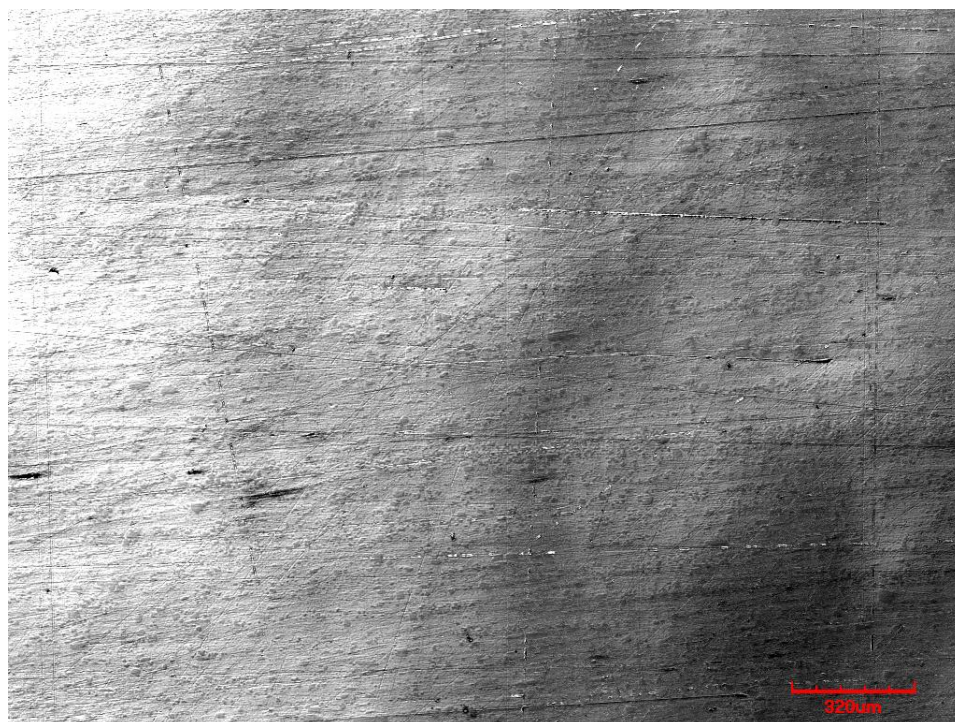
obr. 64 BL3 lomová plocha



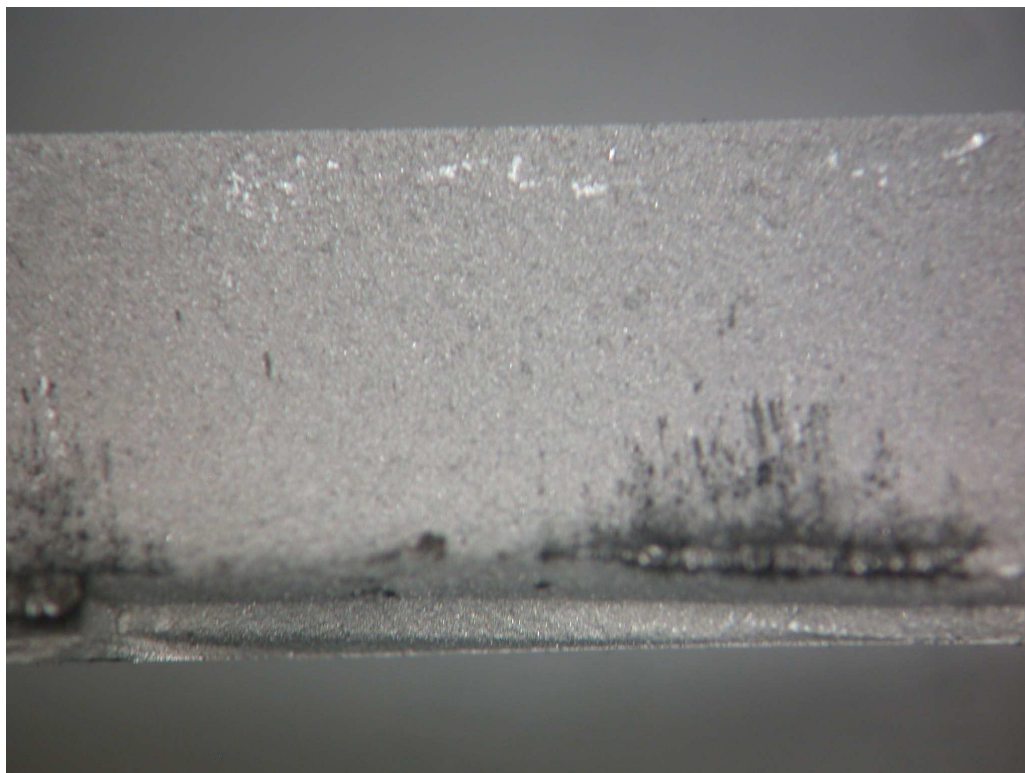
obr. 65 BL2-3D lokální zvlnění vlivem nedokonalého doleštění.



obr. 66 BL3-3D snímek



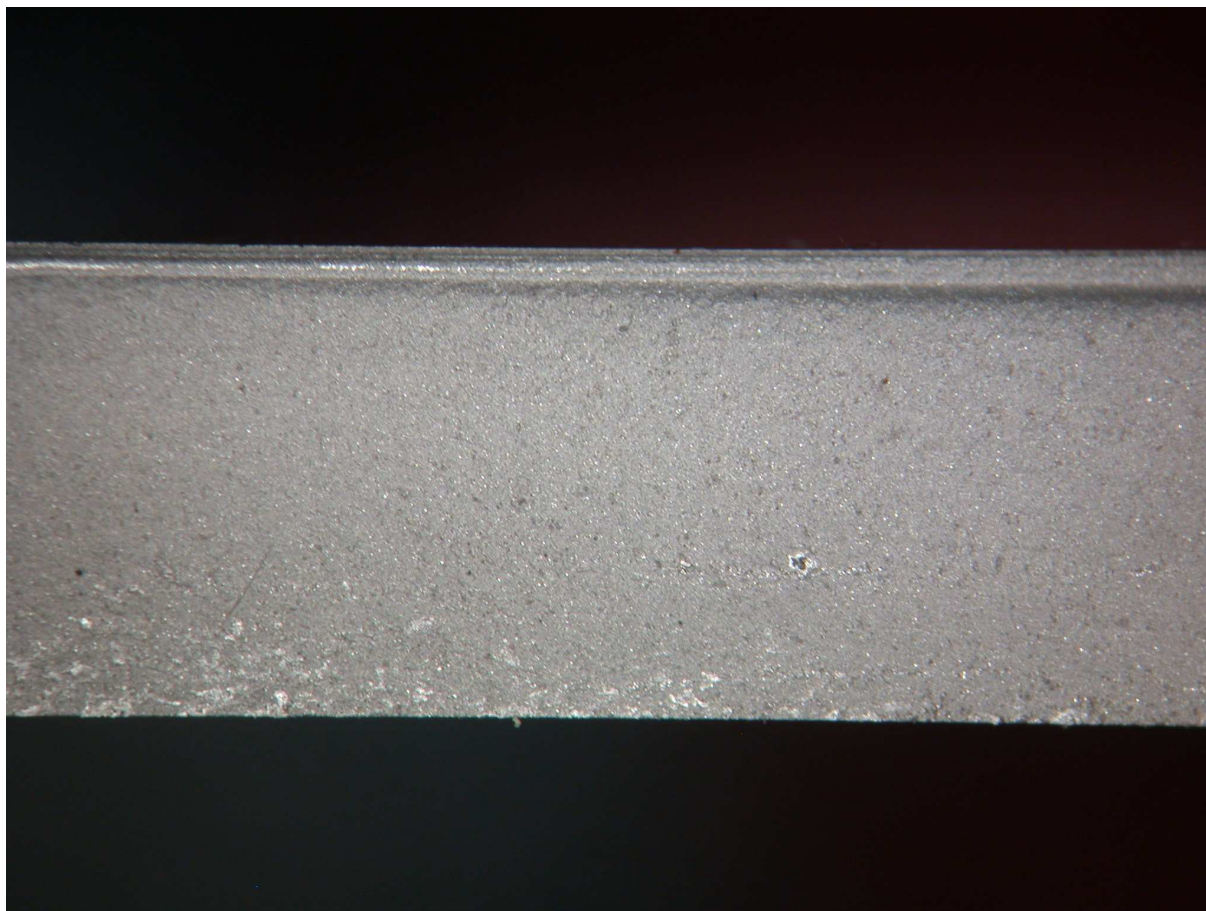
obr. 67 BL3-2D snímek



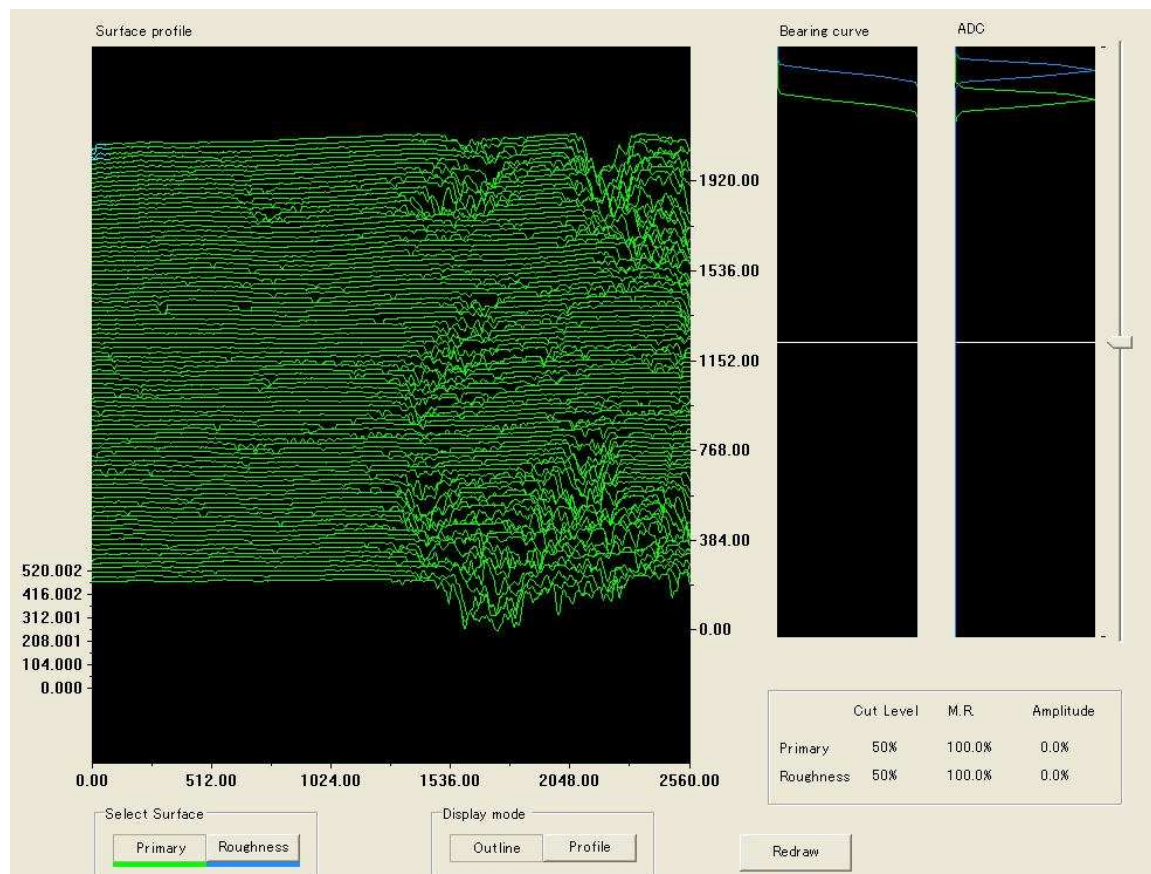
obr. 68 BL2 lomová plocha



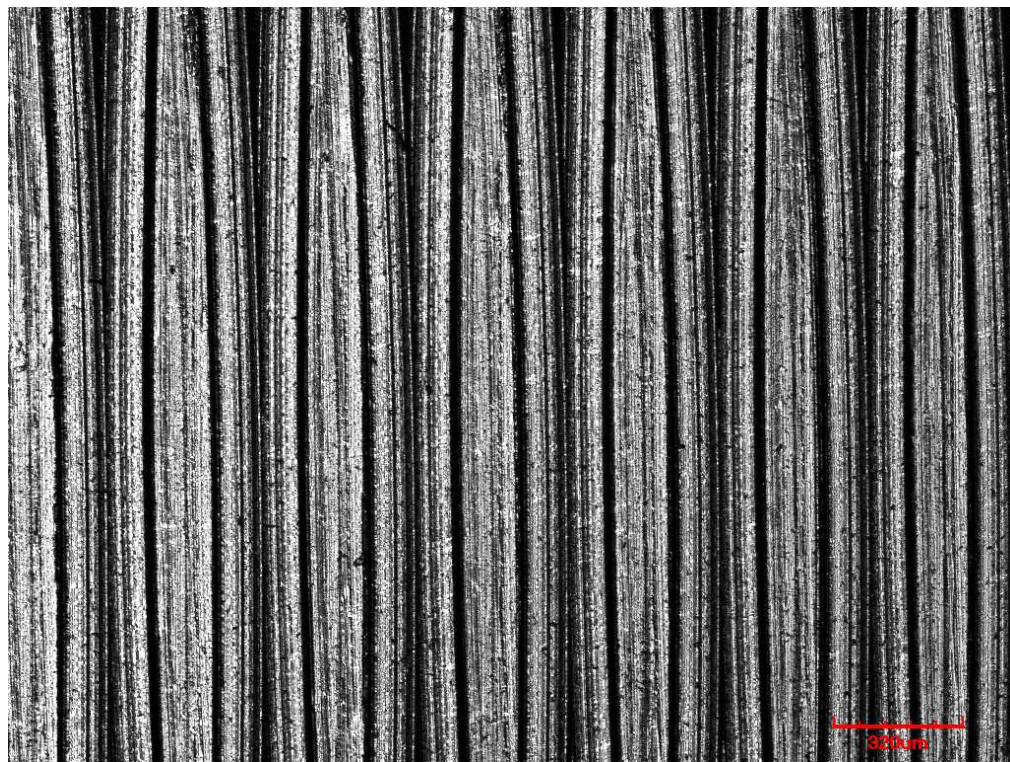
obr. 69 BL3 profil, patrné lokální prohlubně od rýh



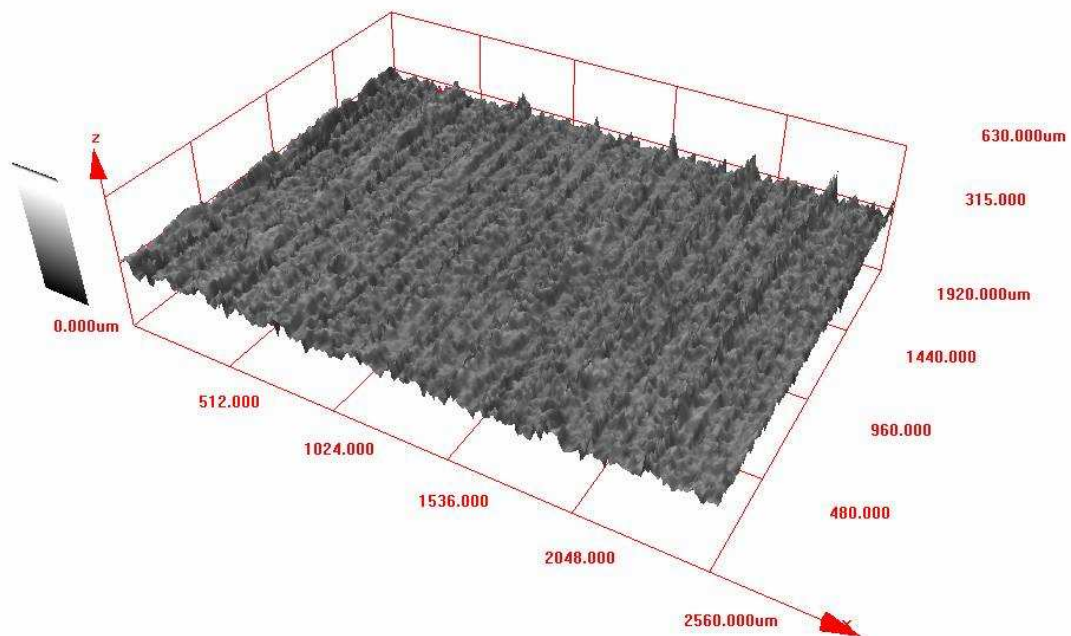
obr. 70 BL2 lomová plocha



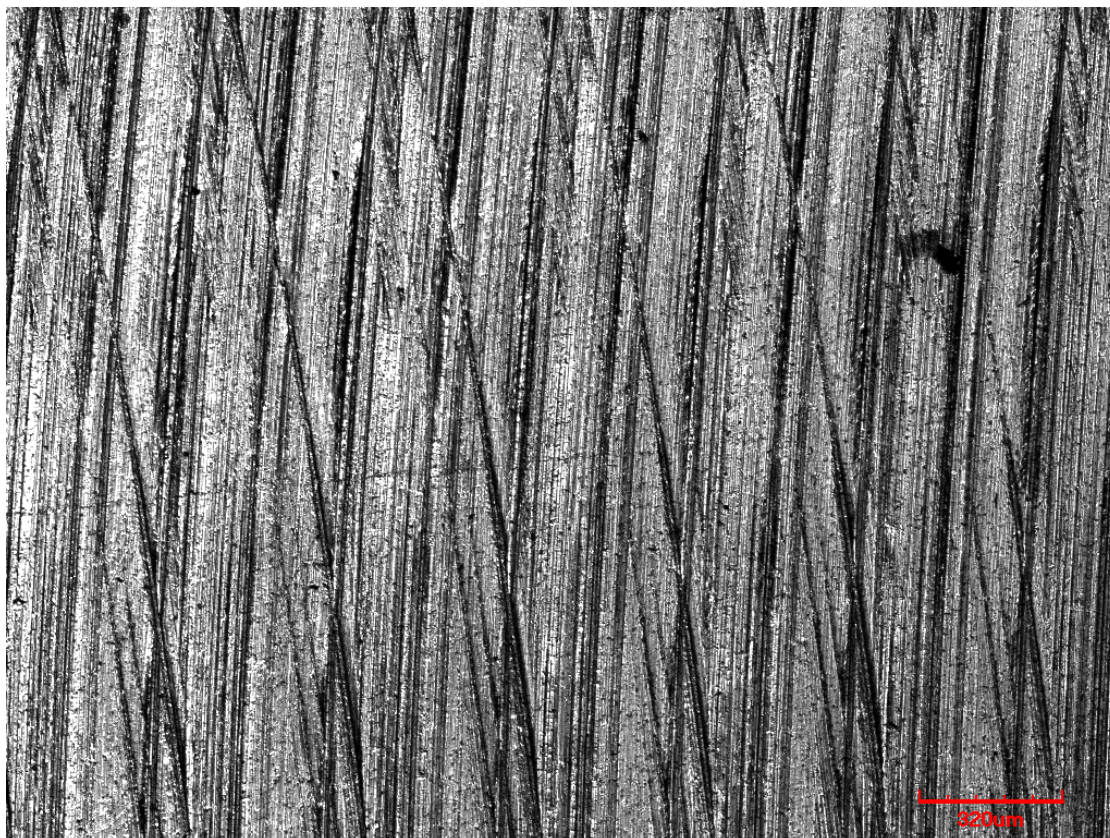
obr. 71 BL2-3D profil – zaměřeno na oblast lokálního zvlnění, ve všech případech směřují největší odchylky do materiálu pod střední čáru profilu



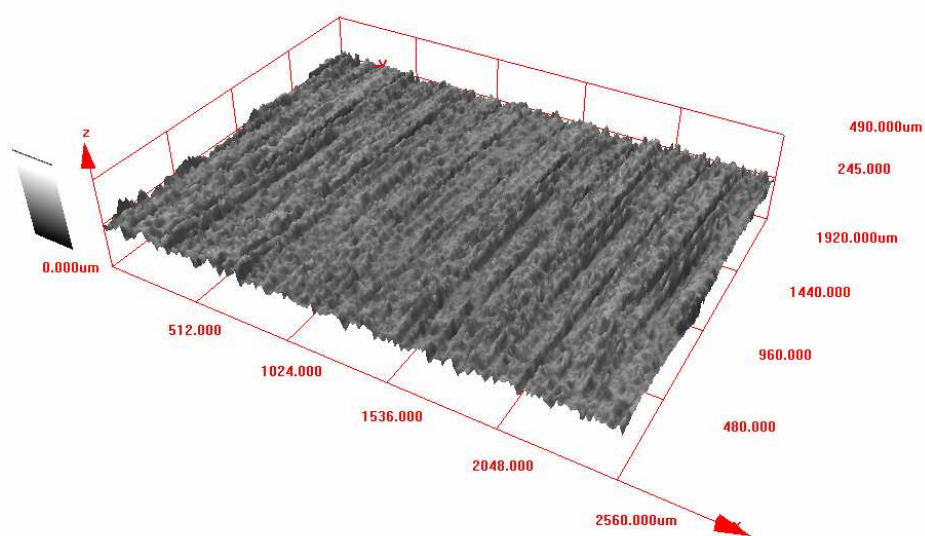
obr. 72 B1-2D snímek v místě křížení stop po nástroji



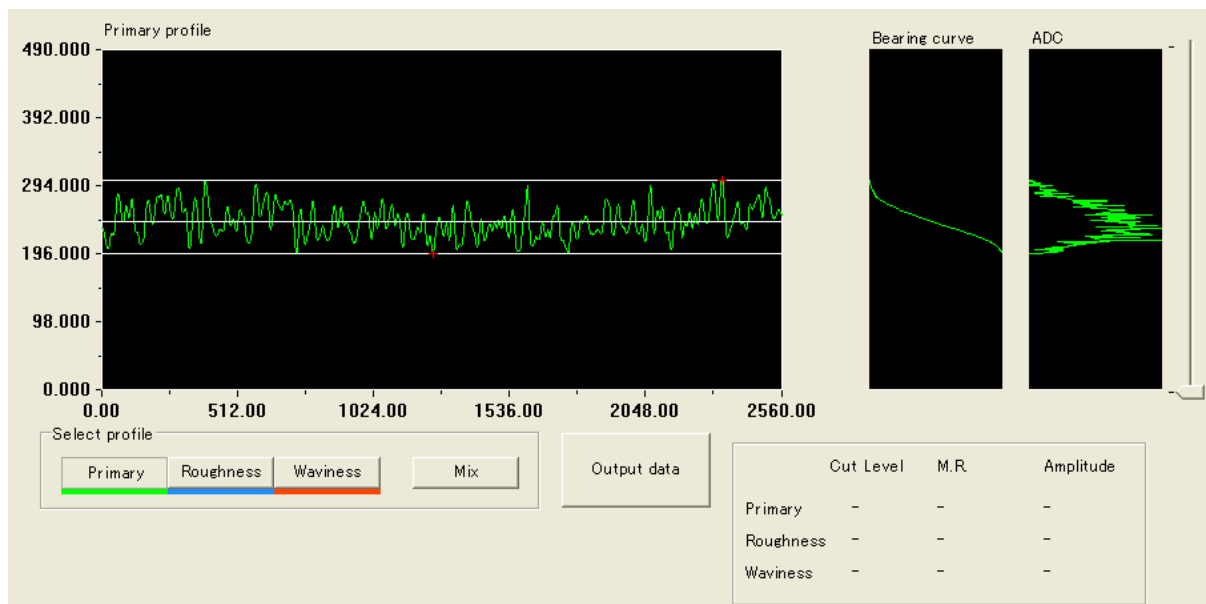
obr. 73 BF1-3D snímek



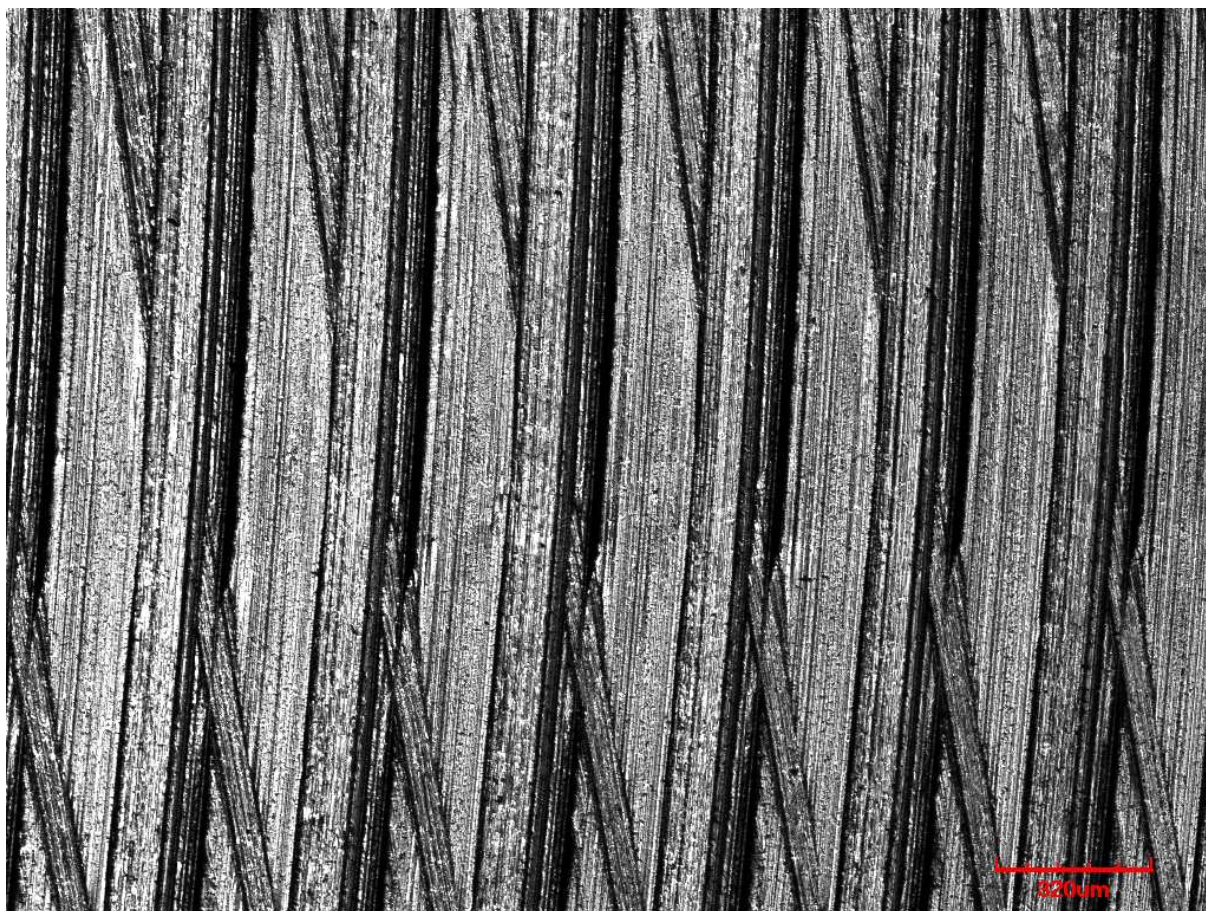
obr. 74 BF2-2D snímek oblasti, kde došlo ke křížení stop po nástroji



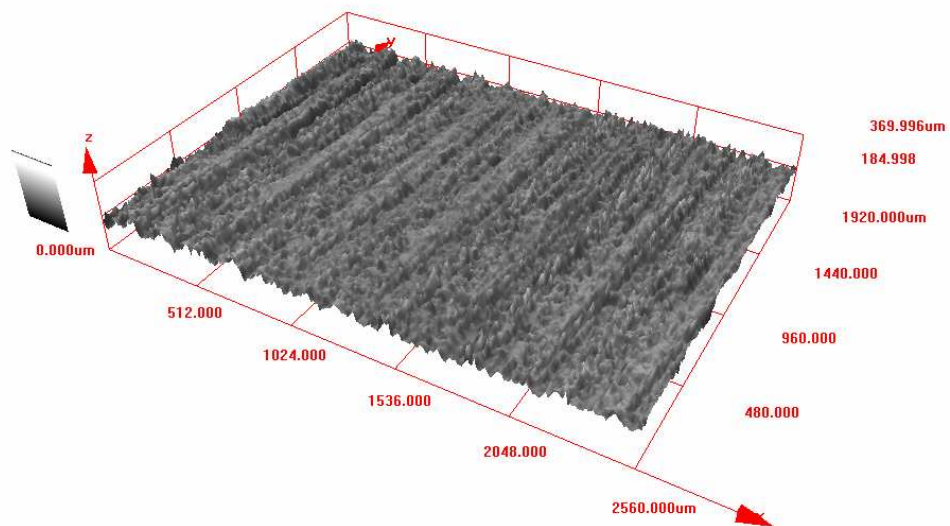
obr. 75BFL-3D símek



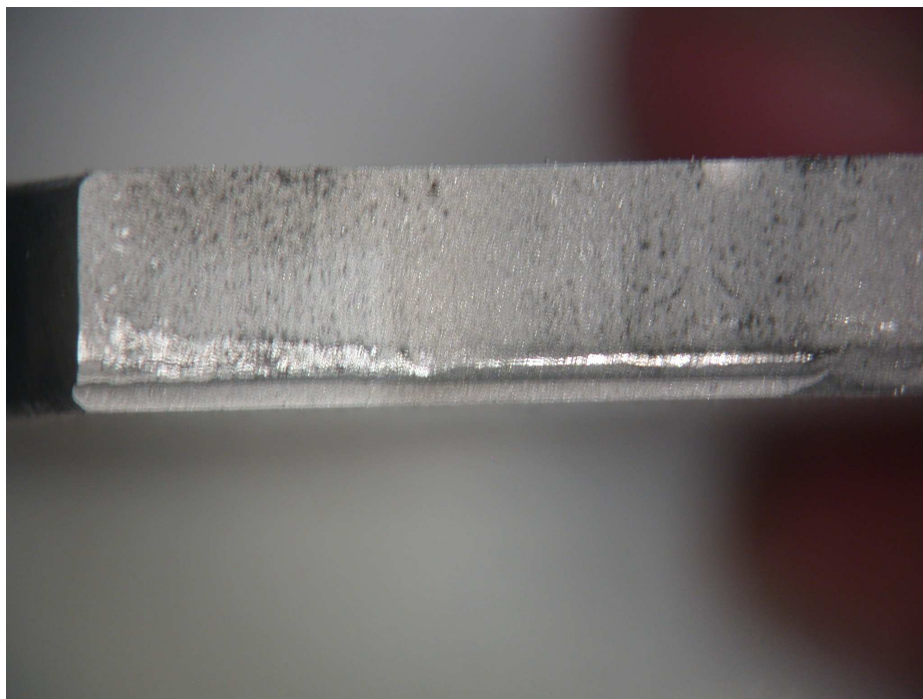
obr. 76BF2 – 2D profil – Tvar profilu napříč místem křížení stop po nástroji, nejsou patrné žádné ostré přechody, naměřená hodnota v tomto místě nevykazovala větší odchylky oproti místům s pravidelnou stopou po nástroji.



obr. 77 BF3-2D snímek



obr. 78 BF3-3D



obr. 79 BL1 lomová plocha