



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU A JEJÍ VLVIV NA ÚNAVOVOU ŽIVOTNOST

ASSESSMENT OF SURFACE ROUGHNESS AND ITS INFLUENCE ON FATIGUE LIFE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Dziubek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jana Horníková, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: Jan Dziubek
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: doc. Ing. Jana Horníková, Ph.D.
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Hodnocení drsnosti povrchu a její vliv na únavovou životnost

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rešerše literatury zabývající se parametry používanými pro kvantifikaci drsnosti povrchu a jejich charakterizace. Výpočet parametrů drsnosti u vzorků s různým opracováním povrchu a posouzení jejich vlivu na únavovou životnost.

Cíle bakalářské práce:

Výpočet parametrů drsnosti u vzorků s různým opracováním povrchu.

Sestavení Wöhlerovy křivky z výsledků víceosého únavového namáhání (ohyb za rotace) vzorků s různou drsností povrchu.

Stanovení souvislostí mezi drsností a tvarem Wöhlerovy křivky a únavovou životností.

Seznam doporučené literatury:

POKLUDA, J. a ŠANDERA, P.: Micromechanisms of Fracture and Fatigue, Springer, 2010, ISBN: 978-1-84996-266-7.

ASM Handbook, Volume 19: Fatigue and Fracture. ASM International, 1996, ISBN: 978-0-87170--85-9.

KLESNIL, M. a LUKÁŠ, P.: Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání, Academia Praha, 1975.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Bibliografická citace

DZIUBEK, Jan. *Hodnocení drsnosti povrchu a její vliv na únavovou životnost* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-26]. s.52. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125295>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Jana Horníková.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá vlivem drsnosti povrchu na únavovou životnost. V bakalářské práci je blíže specifikováno hodnocení povrchu profilovou metodou podle normy ČSN EN ISO 4287. V rámci práce byly zjištěny parametry drsnosti u vzorků s různým opracováním povrchu. Následně byly pro vzorky s různým opracováním povrchu sestrojeny a porovnány mezi sebou Wöhlerovy křivky.

Klíčová slova

drsnost, únava, Wöhlerova křivka, ohyb za rotace

Abstract

This thesis deals with influence of surface roughness on fatigue life. In the thesis, the evaluation of the surface roughness by the profile method according to the standard ČSN EN ISO 4287 is specified. Within the work, the roughness parameters of samples with different surface treatment were determined. Then, SN-curves were drawn for samples with different surface treatments and compared with each other.

Keywords

roughness, fatigue, S-N curve, rotation bending

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma *Hodnocení drsnosti povrchu a její vliv na únavovou životnost* vypracoval samostatně pod vedením doc Ing. Jany Horníkové Ph.D. a s použitím odborné literatury uvedené v na konci práce.

V Brně dne 24. 6. 2020

.....

Jan Dziubek

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí mé bakalářské práce doc. Ing. Janě Horníkové Ph.D. za trpělivost a cenné rady při vypracování bakalářské práce.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Drsnost povrchu	11
2.1	Normy zabývající se strukturou povrchu.....	11
2.2	Základní pojmy	13
2.2.1	Filtry profilu povrchu.....	13
2.2.2	Profily povrchu	14
2.3	Popis profilu.....	14
2.3.1	Parametry profilu drsnosti.....	15
2.3.2	Křivka materiálového poměru profilu [2].....	19
3	Únava materiálu	20
3.1	Stádia únavového procesu	20
3.1.1	Stádium změn mechanických vlastností	20
3.1.2	Stádium nukleace únavových trhlin.....	21
3.1.3	Stádium šíření trhlin.....	22
3.1.4	Únavový lom.....	22
3.2	Typy cyklického zatěžování	23
3.3	Wöhlerova křivka	24
3.4	Zkoušení ohybem za rotace	27
4	Výpočtová část.....	29
4.1	Parametry drsnosti vzorků	29
4.1.1	Profily drsnosti.....	29
4.1.2	Metodika určování drsnostních parametrů.....	29
4.1.3	Vypočítané parametry drsnosti povrchu	31
4.2	Vzorky	31
4.3	Zhodnocení únavového života.....	32
4.3.1	Wöhlerovy křivky	33

Závěr	37
Seznam použité literatury	38
Seznam obrázků	41
Seznam tabulek	42
Seznam zkratk a symbolů	43
Seznam příloh	45

1 Úvod

Porušení součástí vlivem únavových procesů je jedno z nejčastějších v technické praxi. Vyskytuje se tam, kde působí zatížení cyklicky a k porušení často dojde i přesto, že napětí v tělese nepřesáhlo mez kluzu. Proto je třeba uvažovat mez únavy. K jejímu určení v oblasti vysokocyklové únavy nám pomáhá Wöhlerova křivka, což je závislost amplitudy napětí na počtu cyklů do lomu. Mez únavy se stanovuje v laboratořích na testovacích vzorcích. Testovací vzorky jsou hladká leštěná tělesa normou stanovených rozměrech. V praxi ale máme součásti různých tvarů, velikostí. Mez únavy se proto přepočítává na korigovanou mez únavy. Mezi vlivy ovlivňující mez únavy patří například i drsnost povrchu.

2 Drsnost povrchu

Při určování nepravidelností povrchu je třeba rozlišovat nedokonalost povrchu a strukturu neboli texturu povrchu. Mezi nedokonalosti se řadí trhliny, rýhy, póry apod., které byly způsobeny náhodně. Vzniknout mohly během výroby, skladování nebo při funkci součásti. Naproti tomu textura povrchu jsou opakované nebo náhodné úchyly od ideálního povrchu, což je povrch bez jakýchkoli nerovností. [1]

2.1 Normy zabývající se strukturou povrchu

Normy z oblasti struktury povrchu, vydávané českým normalizačním úřadem, uvádějí způsoby hodnocení povrchu a parametry, díky kterým můžeme povrch popisovat. Existuje mnohem více norem zabývajících se strukturou povrchu, které dále rozšiřují tyto zmíněné normy profilové metody či zavádí nové způsoby popisu povrchu, jako jsou plošné či prostorové metody popisu povrchu.

V této práci využijeme především normy ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288 využívající profilovou metodu popisu povrchu. Zde je výpis nejzákladnějších norem popisujících profilovou metodu popisu povrchu. Všechny zmíněné normy jsou k aktuálnímu datu platné.

- **ČSN EN ISO 4287: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – termíny, definice a parametry struktury povrchu.**

Norma stanovuje základní definice a parametry ke stanovení struktury povrchu profilovou metodou. Jsou zde uvedeny základní postupy stanovování parametrů. [2]

- **ČSN EN ISO 4288: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu**

Norma udává pravidla pro porovnávání naměřených hodnot s tolerančními mezemi, které byly stanoveny pro parametry textury povrchu podle ISO 4287 [3]

- **ČSN EN ISO 12 085: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda – Parametry metody motif**

Tato norma využívá metodu motif. Definuje tedy nové parametry a pojmy, které se používají k určování struktury povrchu. [4]

- **ČSN EN ISO 13 565-1 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda, povrchy mající stratifikované funkční vlastnosti – Část 1: Filtrace a všeobecné podmínky měření**

Norma se zabývá problémem filtrace a vyhodnocováním měření. Bere do úvahy směr snímání, vyhodnocovanou délku l_n , proces filtrace, mezní vlnovou délku cut-off λ_c . Norma pokrývá problematiku povrchů s jemně dokončenými ploškami a hlubokými prohlubněmi. [5]

- **ČSN EN ISO 13 565-2 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda, povrchy mající stratifikované funkční vlastnosti – Část 2: Výškové charakteristiky využívající křivku lineárního materiálového poměru**

Parametry, které mimo jiné popisuje tato norma dále rozvíjejí a popisují nosnou křivku materiálového poměru, která je definovaná normou ČSN EN ISO 4287 [6].

- **ČSN EN ISO 13 565-3 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda; povrchy mající stratifikované funkční vlastnosti – Část 3: Výškové charakteristiky využívající pravděpodobnostní křivku materiálu**

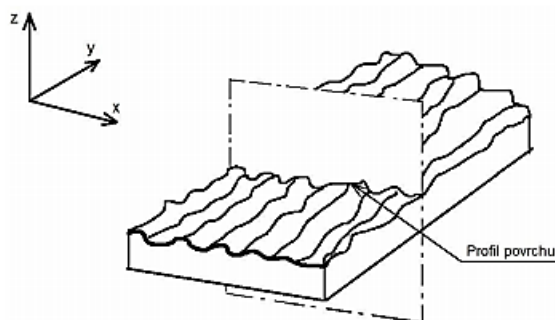
Norma zavádí pravděpodobnostní křivku materiálu a nové parametry, které se k ní vztahují. Zabývá se povrchy, které byly obrobena dvěma po sobě následujícími operacemi, například hrubováním a následně broušením [7].

- **ČSN EN ISO 3274: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda – Jmenovité charakteristiky dotkových (hrotových) přístrojů**

Norma stanovuje, jakým způsobem se měří struktura povrchu dotkovými (hrotovými) přístroji [8].

2.2 Základní pojmy

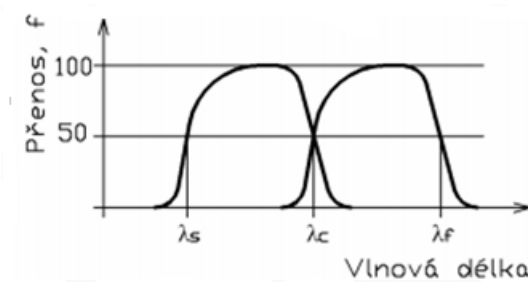
Skutečný profil je povrch, který odděluje těleso od okolního prostředí. Když skutečným profilem provedeme kolmý řez, vznikne nám profil povrchu, viz obrázek 1. [2] Je to již jen 2D křivka rozdělující materiál a okolí. Tato křivka se rozdělí pomocí filtrů na jednotlivé profily.



Obrázek 1 - Profil povrchu [2]

2.2.1 Filtry profilu povrchu

Filtry povrch rozdělují na profily dlouhovlnné a krátkovlnné podle mezní vlnové délky *cut-off*. Velikost mezní vlnové délky *cut-off* se určuje v závislosti na drsnosti dané plochy. Přenosové charakteristiky profilu vlnitosti a drsnosti musí mít na hodnotě mezní vlnové délky 50% přenos, viz obrázek 2 [2].



Obrázek 2 - filtrace povrchu [2]

Filtrací získáme rozdělení na profil drsnosti (R-profil), profil vlnitosti (W-profil) a na základní profil (P-profil). U každého profilu pak zkoumáme principiálně stejné parametry. Ke kterému profilu parametry patří, rozlišujeme podle počátečního písmena. Filtry jsou blíže specifikované v normě ČSN ISO 16610-21 [9], která nahradila původní normu ČSN EN ISO 11562.

λ_s **filtr**: definuje rozhraní mezi drsností a kratšími vlnovými délkami na povrchu [2]

λ_c **filtr**: definuje rozhraní mezi složkou drsnosti a vlnitosti [2]

λ_f **filtr**: stanovuje rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln [2]

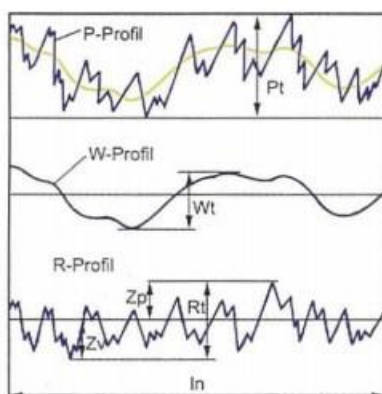
2.2.2 Profily povrchu

Profil drsnosti (R-profil) je odvozený ze základního profilu tím, že se u něj potlačí dlouhovlnné složky filtrem λ_c . Z tohoto profilu se vyhodnocují parametry profilu drsnosti, tzv. R-parametry [2].

Profil vlnitosti (W-profil) je také odvozen ze základního profilu a sice postupnou aplikací filtrů λ_f a λ_c . [2]

Základní profil (P-profil) dostaneme, když potlačíme krátkovlnné složky profilu povrchu filtrem λ_s [2].

Profily povrchu jsou na obrázku 3.



Obrázek 3 - jednotlivé profily povrchu [2]

2.3 Popis profilu

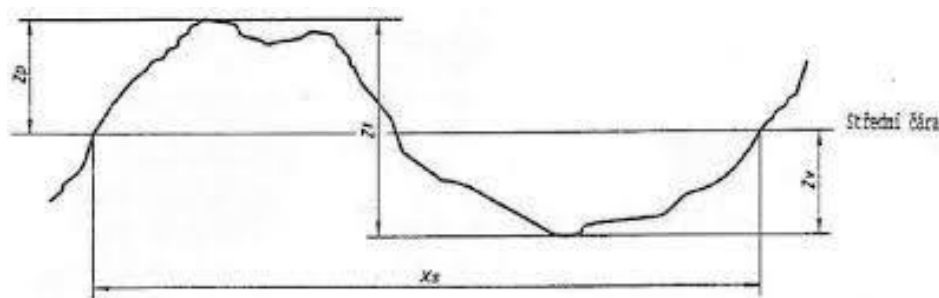
Pojmy a definice uvedené v této pasáži vychází z normy ČSN EN ISO 4287 [2], není-li uvedeno jinak.

Střední čára profilu je střední hodnota profilu, od které se dále určují jednotlivé geometrické parametry profilu. Získává se aproximací středních hodnot metodou nejmenších čtverců [2]. **Výstupek profilu** je ven z materiálu směřující část posuzovaného profilu mezi dvěma průsečíky se střední čarou posuzovaného profilu, tedy mezi dvěma prohlubněmi profilu, kde **prohlubeň profilu** je dovnitř do materiálu směřující část posuzovaného profilu [2].

Délka ve směru osy x , používaná pro posouzení celého vyhodnocovaného profilu se nazývá **vyhodnocovaná délka** a značí se ln . Vyhodnocovaná délka pro parametr drsnosti obsahuje zpravidla 5 základních délek, v případě jiného počtu základních délek se tato informace musí předepsat. **Základní délka l** je délka ve směru osy x [2]. Pro profil drsnosti se přidává písmeno “ r “, značí se tedy lr . Základní délka pro P-parametry lp , je stejná s vyhodnocovací délkou ln [2]. S vyšším počtem základních délek roste spolehlivost naměřených parametrů. Standardně se jich v rozsahu vyhodnocované délky volí pět [2].

Prvek profilu je souhrnné označení pro výstupek i prohlubeň povrchu. Prvek můžeme dále popisovat různými geometrickými charakteristikami [2]. Například **hodnota pořadnice $Z(x)$** vyjadřuje v jakékoli hodnotě souřadnice x výšku profilu v daném místě [2]. **Místní sklon dZ/dX** je pak derivací pořadnice podle x [2].

Výška prvku profilu Z_t je součet výšky výstupku profilu a hloubky prohlubně profilu, kde **výška výstupku profilu Z_p** je vzdálenost mezi střední čarou profilu a největší hodnotou výstupku profilu a **hloubka prohlubně profilu Z_v** je vzdálenost mezi střední čarou profilu a největší hodnotou prohlubně profilu [2]. **Šířka prvku profilu X_s** je vzdálenost na ose x každého prvku profilu [2]. Grafická interpretace těchto parametrů je na obrázku 4.



Obrázek 4 – Grafické vyjádření Z_t , Z_p , Z_v a X_s [2]

Materiálová délka profilu $MI(c)$ udává součet délek materiálu nacházejících se na úsečce, která protíná křivku profilu v určité výšce c nad osou x [2].

2.3.1 Parametry profilu drsnosti

V následující tabulce 1 jsou uvedeny R-parametry. Jedná se o nejčastěji užívané parametry pro posuzování profilu drsnosti. Definice platí také pro profil vlnitosti a tedy W-parametry, či pro základní profil, a tedy pro P-parametry. Například, kdybychom chtěli zapsat největší výšku výstupku profilu vlnitosti, značil by se tento parametr Wp ,

apod. Výpočtové vztahy zde platí také, jen je třeba změnit parametry drsnosti za příslušné parametry zkoumaného profilu.

Tabulka 1 – Parametry profilu drsnosti [2; 10]

Název parametru	Parametr drsnosti	Definice parametru	Vzorec pro výpočet parametru
Výškové parametry			Rovnice (1-5)
Největší výška výstupku profilu	Rp	Výška Zp nejvyššího výstupku profilu na základní délce [2]	$Max(Zp_i)$
Největší hloubka prohlubně profilu	Rv	Hloubka Zv u nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky [2]	$Max(Zv_i)$
Největší výška profilu	Rz	Součet výšky největšího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky [2]	$ Rv + Rp$
Průměrná výška profilu	Rc	Průměrná hodnota výšek Zt prvků profilu v rozsahu základní délky [2]	$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Zt_i$
Celková výška profilu	Rt	Součet výšky největšího výstupku a hloubky nejnižší prohlubně v rozsahu vyhodnocované délky [2]	$Rv + Rp$ ($Rt > Rz$)
Parametry výškové s průměrnými hodnotami pořadnic			Rovnice (6-9)
Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	Ra	Aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ na základní délce [2]	$\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z(x) dx$
Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu	Rq	Počítá s kvadratickým průměrem z pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky [2]	$\sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^2(x) dx}$
Šikmost posuzovaného profilu (<i>skewness</i>)	Rsk	Vyjadřuje míru symetrie a hustotu pravděpodobnosti pořadnic $Z(x)$ [2]	$\frac{1}{Rq^3} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^3(x) dx \right]$
Špičatost posuzovaného profilu (<i>kurtosis</i>)	Rku	Vyjadřuje míru špičatosti hustoty pravděpodobnosti pořadnic [2]	$\frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^4(x) dx \right]$

Parametry délkové			(10)
Průměrná šířka prvků profilu	RSm	Aritmetický průměr šířek prvků v rozsahu základní délky [2]	$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{Si}$
Parametry tvarové			
Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu	RΔq (Rdq)	Kvadratický průměr sklonů pořadnic dZ/dx v rozsahu základní délky [2]	
Parametry vztahující se k nosné křivce			Rovnice (11-12)
Materiálový poměr profilu (nosný podíl)	Rmr(c)	Poměr délky materiálu prvků profilu $Ml(c)$ na dané úrovni c vztahený k vyhodnocované délce [2]	$\frac{Ml(c)}{ln}$
Rozdíl výšky úseku profilu	Rδc (Rdc)	Vzdálenost mezi úrovněmi dvou úseků daného materiálového poměru [2]	$C(Rmr1) - C(Rmr2)$
Vzájemný materiálový poměr	Rmr	Materiálový poměr určený na úrovni části profilu $Rδc$, vztahený k úrovni $C0$ [2]	

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu: Ra [2]

Stále se jedná o nejpoužívanější parametr na popis profilu drsnosti. Je to stabilní a opakovatelný parametr, který je vhodný především na neperiodické profily. Nerozlišuje ovšem mezi výstupky a prohlubněmi, proto například dva povrchy se stejnou hodnotou Ra se mohou chovat odlišně z hlediska životnosti součásti nebo funkčnosti. Proto je potřeba znát i další parametry zkoumaného povrchu. Grafická interpretace Ra je na obrázku 5.

V této práci byly použity statistické vzorečky namísto integrálních, jež jsou uvedené v tabulce 1. **Statistická metoda k určení Ra :**

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i| \quad (\mu m) \quad (13)$$

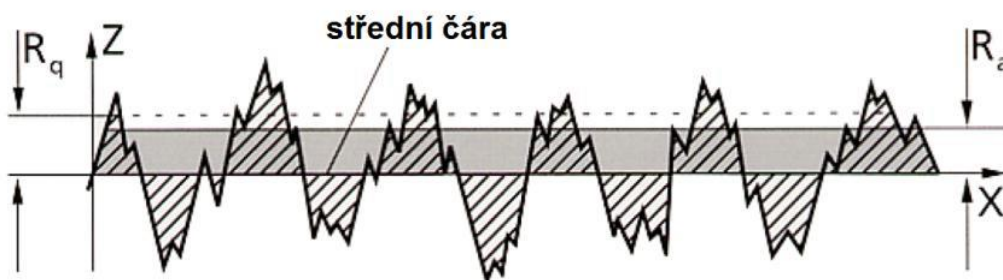


Obrázek 5 - Grafická interpretace R_a [11; 10]

Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu: R_q

Tento parametr je podobný parametru R_a , je ale citlivější na prvky profilu z důvodu výskytu druhé mocniny pořadnice [2]. Grafické znázornění R_q a srovnání s R_a je na obrázku 6. **Statistická metoda k určení R_q :**

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i^2|} \quad (\mu m) \quad (14)$$



Obrázek 6 – Grafická porovnání parametru R_q a R_a [10]

Šikmost posuzovaného profilu (skewness) R_{sk}

je to podíl průměrných hodnot třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny R_q na základní délce, také vyjadřuje míru symetrie a hustotu pravděpodobnosti pořadnic $Z(x)$ (viz. Rovnice 8 a 15) [2]. Vyjde-li tento parametr kladný, znamená to, že plocha prohlubní je větší než plocha výstupků, viz obr. 7. **Statistická rovnice pro určení R_{sk} :**

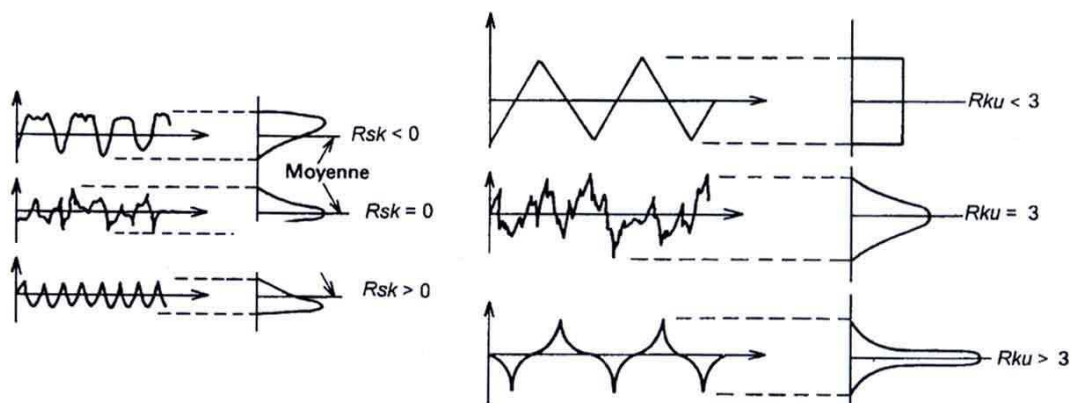
$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i^3| \right] \quad (15)$$

Špičatost profilu (kurtosis) R_{ku}

je podíl průměru čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty R_q na základní délce, viz rovnice 9 a 16. Vyjadřuje míru špičatosti hustoty pravděpodobnosti

pořadnic [2]. Parametr špičatosti profilu a hustota pravděpodobnosti pořadnic je znázorněna na obrázku 7. **Statistická rovnice k určení Rku :**

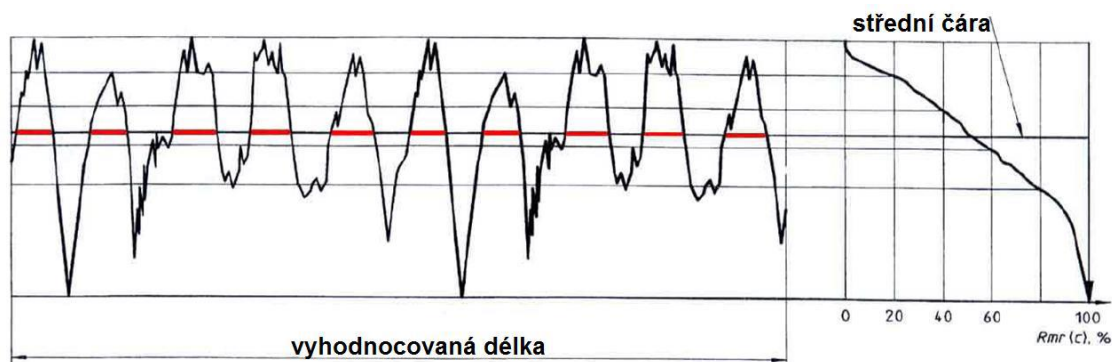
$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i^4| \right] \quad (16)$$



Obrázek 7 – Znáznornění parametru Rsk , Rku a grafů hustoty pravděpodobnosti pořadnic [11]

2.3.2 Křivka materiálového poměru profilu [2]

Křivka materiálového poměru profilu vyjadřuje materiálový poměr, který se mění po výšce, viz obrázek 8. Tato křivka se též nazývá Abbott-Firestoneova křivka nebo křivka nosného podílu. Na této křivce určujeme parametry z normy ČSN EN ISO 4287 $Rmr(c)$, $R\delta c$, Rmr [2]. Křivku materiálového podílu dále popisuje a o další parametry doplňuje norma ČSN EN ISO 13 565-2.



Obrázek 8 – Stanovování křivky materiálového poměru (vpravo) z drsnostní křivky (vlevo) [10; 11]

3 Únava materiálu

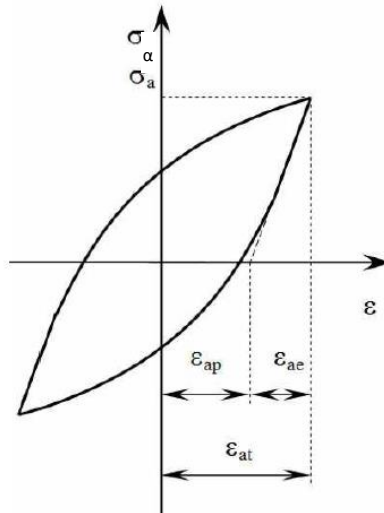
U strojních součástí, které jsou zatěžovány cyklicky je potřeba zjistit, jestli u takto zatěžovaných součástí nehrozí vznik únavového poškození, a to i tehdy, je-li amplituda napětí pod mezí kluzu. Cyklické zatěžování totiž vede ke kumulaci mikroplastických deformací a ty mohou mít za následek vznik trhlin a později i únavový lom. Právě proces kumulace deformací při cyklickém zatěžování se nazývá únava. Únavové poškození se zpravidla projevuje až po dlouhodobém působení, to závisí na velikosti amplitudy napětí. Používá se rozdělení na nízkocyklovou únavu, kdy součást vydrží jen nízký počet cyklů do lomu N_f , a to když počet cyklů do lomu N_f je menší než 10^4 a vysokocyklovou únavu ($N_f > 10^5$) [12].

3.1 Stádia únavového procesu

Celý únavový život můžeme rozdělit na tři částečně se překrývající a časově na sobě navazující stádia [12] a případný následný lom.

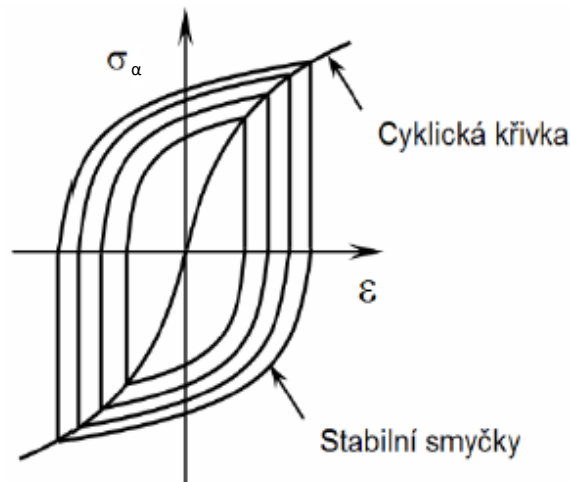
3.1.1 Stádium změn mechanických vlastností

V celém objemu cyklicky zatěžované součásti se mění hustota a vlastnosti mřížky kovu, a tedy i mechanické vlastnosti materiálu. Toto stádium netrvá vzhledem k celé životnosti součásti po příliš dlouhou dobu. Změny mechanických vlastností součásti se mohou projevit tzv. zpevnováním nebo změkčováním materiálu. Po určitém počtu cyklů tyto změny ustanou a materiál se dostane do saturovaného neboli ustáleného stavu. V grafu závislosti napětí na deformaci se to projeví tzv. hysterezní smyčkou (obrázek 9). Plocha smyčky odpovídá množství tepla vydaného systémem za jeden cyklus. Celková disipovaná energie do lomu se dá vyjádřit jako součin počtu cyklů do lomu a velikosti plochy saturované hysterezní smyčky [12].



Obrázek 9 Hysterezní smyčka [13]

Když propojíme vrcholy několika saturovaných smyček pro různé amplitudy napětí, vznikne nám tzv. cyklická deformační křivka, viz obrázek 10. Cyklická deformační křivka je významná materiálová charakteristika, která slouží k popisu únavového chování daného materiálu. [14; 15]



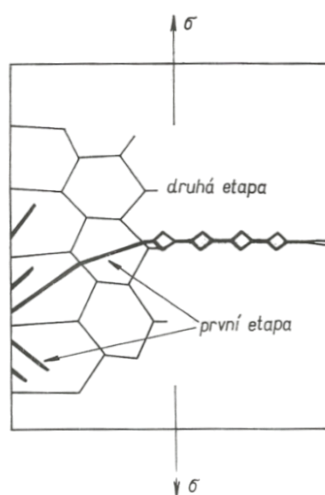
Obrázek 10 - Cyklická křivka napětí [13]

3.1.2 Stádium nukleace únavových trhlin

Toto stádium se projevuje na povrchových vrstvách [12]. Je způsobeno nehomogenní a neizotropní strukturou materiálů. Tam, kde je napětí vyšší, jsou místa nukleace únavových trhlin. Místa, kde dochází ke zvýšení napětí, jsou konstrukční a technologické vruby. Jako koncentrátoři napětí slouží i prvky profilu drsnosti, prohlubně profilu [16; 17] Vznikem povrchových mikrotrhlin končí nukleační stádium [12].

3.1.3 Stádium šíření trhlin

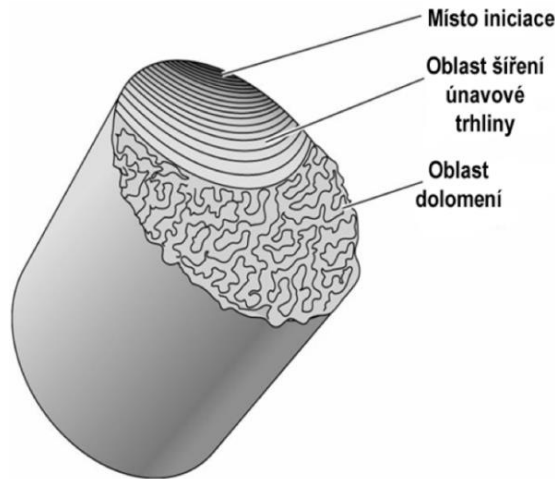
Mikrotrhliny leží podél skluzových rovin a dál se šíří ty, které mají nejpříznivější úhel k směru zatěžování a sice 45° , kdy je maximální smykové napětí. Většina mikrotrhlin se zastaví a nedojde dál než do vzdálenosti několika mikrometrů. Při dalším cyklování se trhliny propojují. Postupně se natáčejí tak, že jsou kolmé k působícímu napětí, jak je vidět na obrázku 11. Tento jev se označuje jako přechod z krystalografického šíření trhliny do nekrytalografického šíření. V nekrytalografickém šíření je již zpravidla jen jedna trhlina. K tomuto přechodu dojde v závislosti na materiálu a amplitudě napětí zpravidla v hloubce do několika desetin milimetru [12]. Z důvodu vysoké koncentrace napětí na čele trhliny se zde vyskytuje plastická oblast.



Obrázek 11 – šíření únavové trhliny [12]

3.1.4 Únavový lom

Lom je konečné stádium únavového procesu. Lomové plochy jsou kolmé na směr zatěžování a vyskytují se na nich tzv. striace. Jsou to brázdy a žlaby, které mapují šíření čela trhliny [18]. Závěrečné dolomení je vzhledově podobné křehkému lomu [19]. Je náhlé, úplné, a tedy i nebezpečné [19]. Příklad lomové plochy je na obrázku 12.



Obrázek 12 – lomová plocha po únavovém lomu [15; 20]

3.2 Typy cyklického zatěžování

Reálný průběh napětí je často nepravidelný a nahodilý. V laboratořích je nepravidelný průběh napětí obtížné simulovat, proto se popis zjednodušuje. Nejčastěji se popisuje sinusovým průběhem amplitudy napětí.

Amplituda napětí se dá určit rovnicí (17). Je rovna polovině z rozdílu horního a dolního napětí,

$$\sigma_a = \frac{\sigma_h - \sigma_n}{2} \quad (17)$$

kde horní napětí σ_h je maximální napětí cyklu a σ_n je minimální napětí cyklu. Jejich průměr je střední napětí σ_m neboli statická složka zatěžovaného cyklu, viz rovnice (18).

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h + \sigma_n}{2} \quad (18)$$

Celkový rozsah cyklu udává rozkmit $\Delta\sigma$, který je roven dvojnásobku amplitudy cyklu. Parametr asymetrie R určuje, jestli bude zátěžný cyklus v tahu nebo v tlaku, viz rovnice (19). Polohu zátěžného cyklu vyjadřuje také amplitudový parametr P , viz rovnice (20).

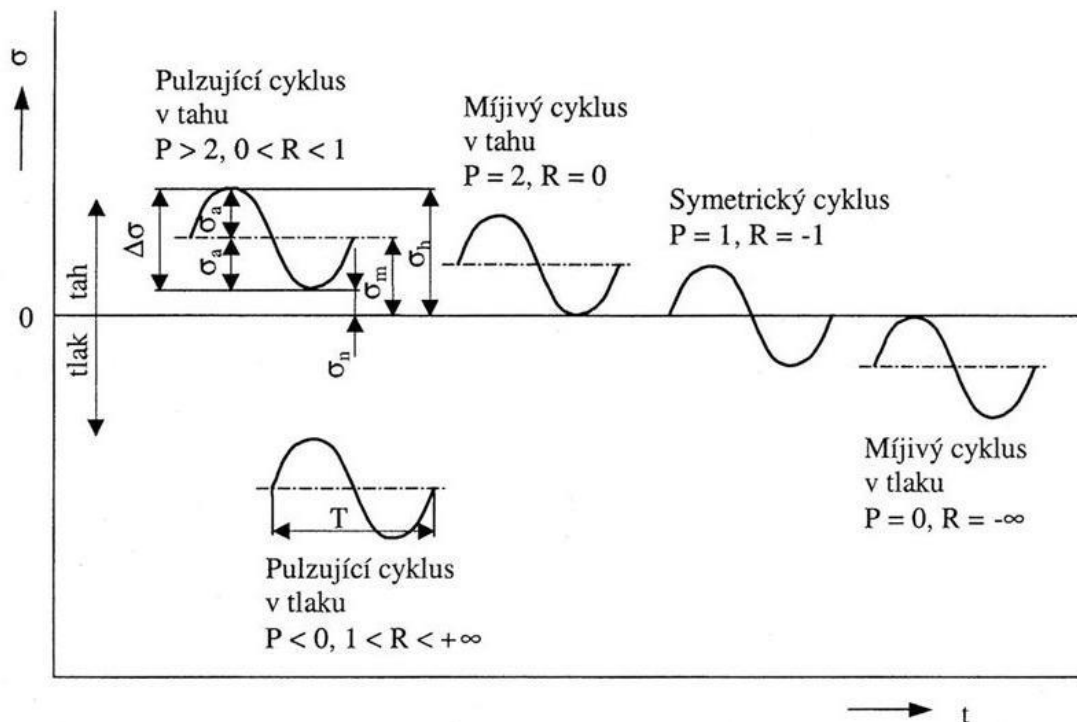
$$R = \frac{\sigma_n}{\sigma_h} \quad (19)$$

$$P = \frac{\sigma_h}{\sigma_a} \quad (20)$$

Parametry mají mezi sebou závislost:

$$P = \frac{2}{1 - R} \quad (21)$$

Je-li $\sigma_m = 0$, jedná se o tzv. symetrický cyklus. V případě že $\sigma_a = \sigma_m$, jde o cyklus mívivý v tahu, viz obrázek 13. Na obrázku 13 jsou vidět i další polohy cyklů a příslušné hodnoty P a R .



Obrázek 13 – cykly s různým středním napětím [21]

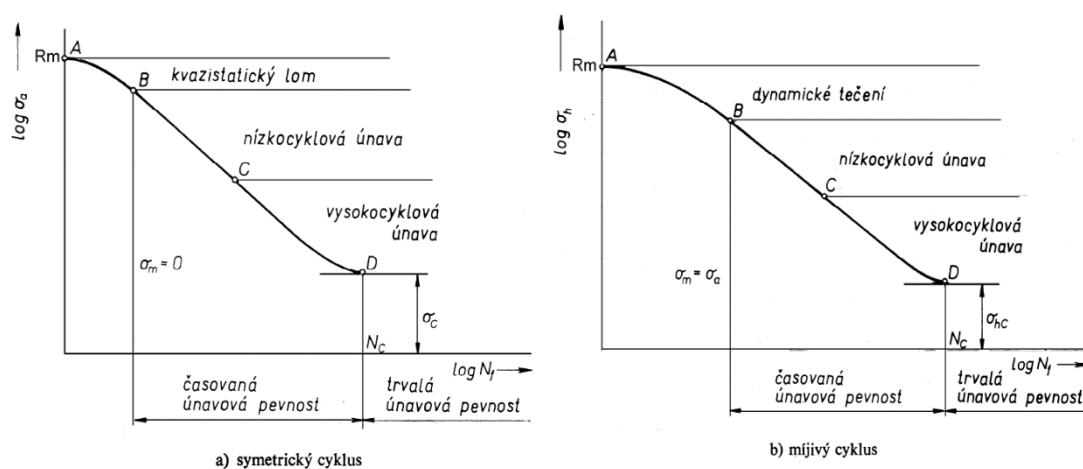
3.3 Wöhlerova křivka

Wöhlerova křivka, v anglické literatuře označovaná jako S-N diagram [19] (SN-curve), je dodnes jednou ze základních únavových charakteristik [12; 15], udává závislosti amplitudy napětí σ_a na počtu cyklů do lomu N_f . Popisuje chování materiálu ve vysokocyklové oblasti. Pro popis únavového procesu v nízkocyklové oblasti se používá Manson-Coffinova křivka.

Amplituda, při které už nedojde k únavovému porušení ani po 10^7 cyklech, se nazývá mez únavy a označuje se σ_c . Mez únavy je považována za materiálovou charakteristiku jenom tehdy, je-li zkušební vzorek bez vrubů s normalizovanými rozměry a dokonale opracován [22]. Mez únavy se vyskytuje především u ocelí a u jiných intersticiálních slitin. Některé kovy a slitiny nevykazují mez únavy. Jedná se zejména o slitiny hliníku, hořčíku či mědi. V takovém případě se stanovuje takzvaná časovaná mez únavy σ_{Nc} . Je to smluvně stanovená mez, kdy nedojde k porušení ani při předem stanoveném počtu cyklů, např. $N_c = 10^7$ cyklů [16].

Pro sestavení Wöhlerovy křivky je potřeba velké množství vzorků, které se periodicky zatěžují s různými amplitudami a do grafu se zaznačí, po kolika cyklech došlo k lomu. Křivka se sestojí z těchto bodů. Režim zatížení se většinou volí míjivý nebo symetrický, na obrázku 14 je srovnání dvou Wöhlerových křivek s různým středním napětím. Wöhlerova křivka se obvykle rozděluje na čtyři oblasti [12]:

- oblast kvazistatického lomu
- oblast cyklického tečení
- oblast nízkocyklové únavy
- oblast vysokocyklové únavy [12]



Obrázek 14 - Wöhlerovy křivky u symetrického cyklu a u míjivého cyklu [15; 24]

Wöhlerova křivka se nejčastěji zobrazuje v logaritmické stupnici. Na obrázku 15 je srovnání Wöhlerových křivek v lineárním a v logaritmickém měřítku. Při vykreslení závislosti v logaritmickém měřítku se hodnoty odečítají lépe. V takovém případě je křivka popsána mocninnou závislostí, která byla navržena Wöhlerem [16], viz rovnice (22),

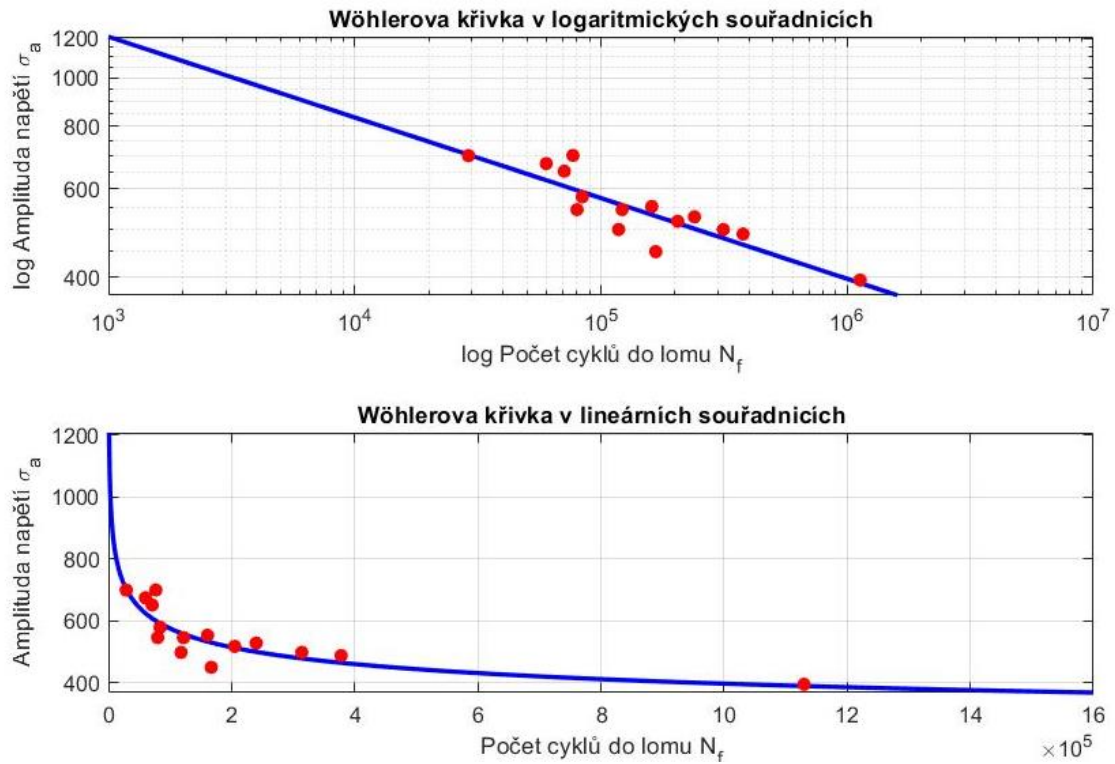
$$\sigma_a = A \cdot N_f^B \tag{22}$$

kde jednotlivými parametry jsou:

σ_a	amplituda napětí	[MPa]
A	Wöhlerův součinitel	[MPa]
N_f	počet cyklů do lomu	
B	Wöhlerův exponent	

Při aproximaci do semilogaritmického měřítka, kdy amplituda napětí je v lineárním měřítku a počet cyklů do lomu v logaritmickém měřítku, použijeme rovnici (23) [16], výslednou křivkou bude v semilogaritmickém měřítku přímka.

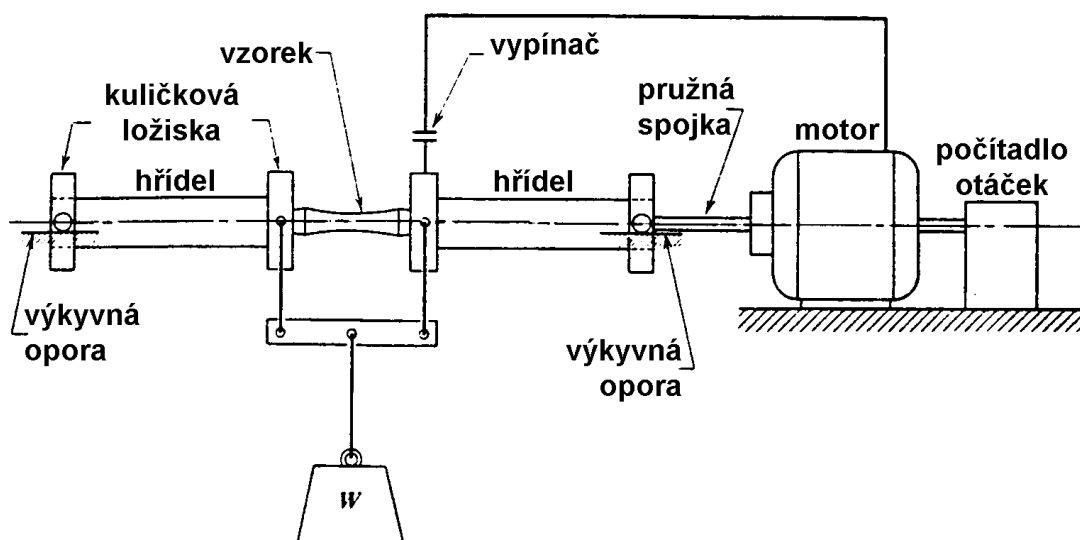
$$\sigma_a = C + D \cdot \log N_f \quad (23)$$



Obrázek 15 – Srovnání stejné Wöhlerovy křivky v prvním případě v logaritmické stupnici a v druhém případě v lineární. Vytvořeno pomocí aplikace MATLAB R2019b

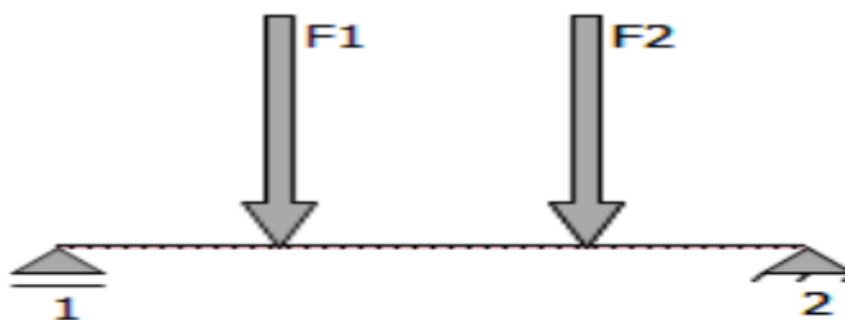
3.4 Zkoušení ohybem za rotace

Jedním z prvních, kdo prováděl únavové zkoušky ohybem za rotace (rotating beam fatigue test), byl v letech 1852–1870 August Wöhler [12]. Mezi nejrozšířenější stroje na zkoušení materiálu na únavu, je zkušební stroj, který navrhl R. R. Moore, viz obrázek 16. Tento stroj pracuje na principu ohybu za rotace a zkušební vzorek je zde namáhán prostým ohybem bez smykového napětí [19]. Jedná se o střídavě souměrný cyklus, to znamená, že střední napětí je zde nulové a $R = -1$.

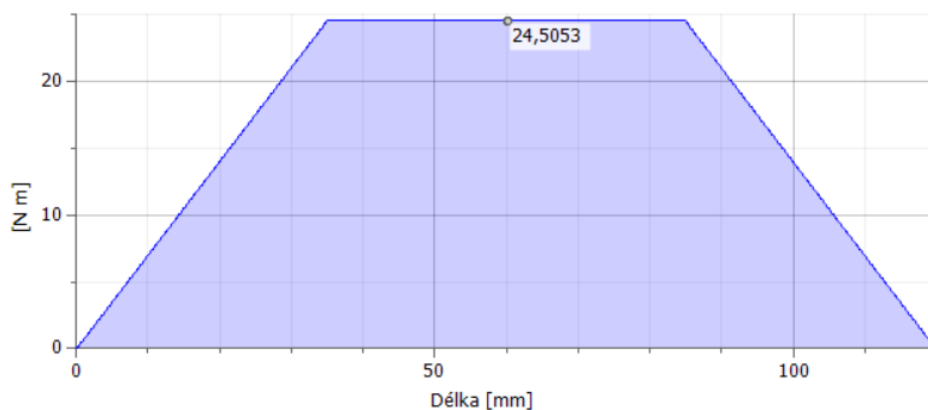


Obrázek 16 - Schéma zkušebního stroje pro čtyřbodový ohyb za rotace [14; 17; 16]

Zjednodušený model zatížení, které nastává při této zkoušce je na obrázku 17. Namáhání ohybem za rotace způsobí konstantní ohybový moment v části testovaného vzorku, viz obrázek 18.

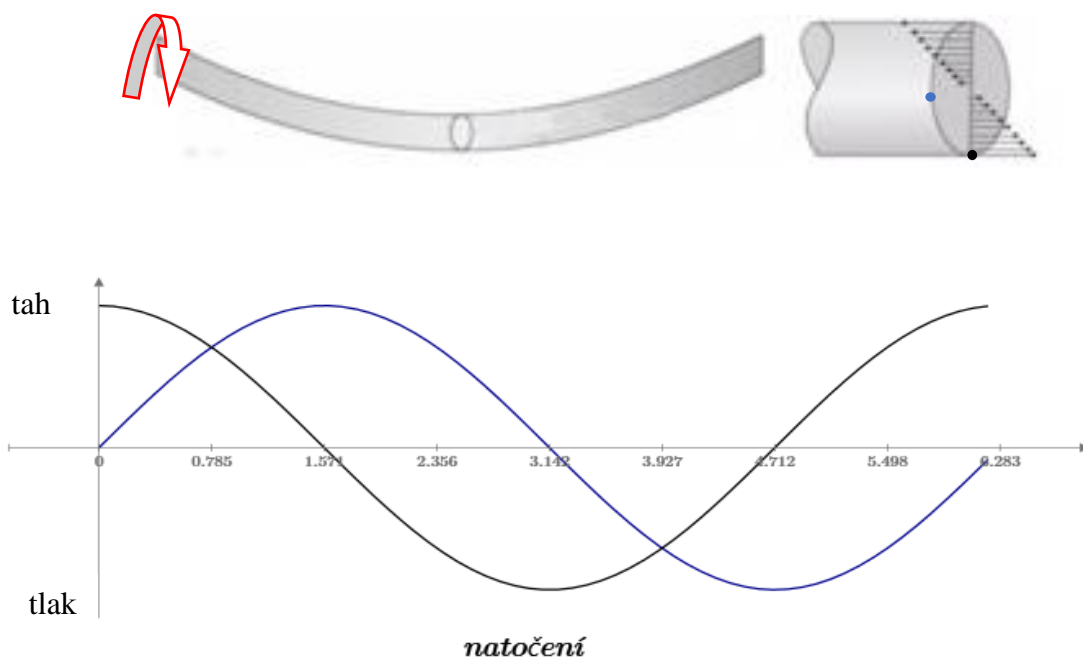


Obrázek 17 – Zjednodušený náčrt zatížení vzorku. Vytvořeno pomocí programu Autodesk Inventor.



Obrázek 18 – Rozložení ohybového momentu na hřídeli a vzorku při čtyřbodovém ohybu za rotace, Vytvořeno pomocí aplikace Autodesk Inventor

Ohybový moment vyvolává tahové a tlakové napětí ve vzorku. Když se vzorek otáčí, směrnice vektoru ohybového momentu zůstává stále stejně orientovaná vzhledem k pozorovateli, tím pádem jsou na tah a tlak namáhána jiná místa na vzorku. Na povrchu vzorku, viz obrázek 19, jsou vyznačené dva body a v grafu je zobrazeno, jak body přechází cyklicky z tahového napětí do tlakového.



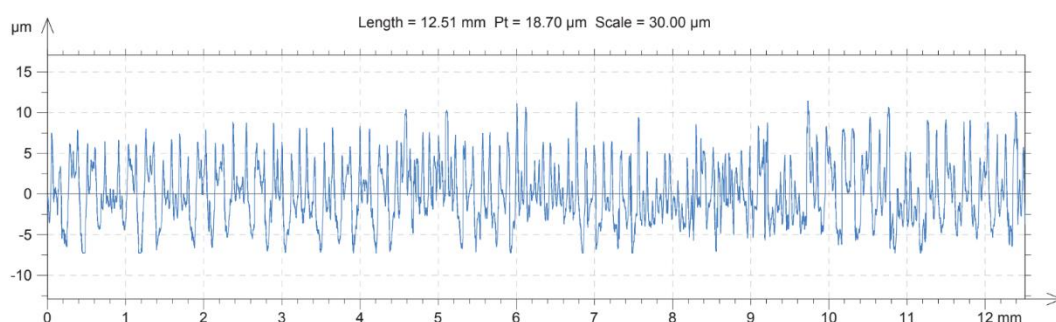
Obrázek 19 – Rozložení napětí v ohýbané rotující tyči a graf popisující přechod bodů z tahu do tlaku v závislosti na natočení tyče. Obrázek: (<http://xtremeonez.blogspot.com/2016/08/fluctuating-stress-easy-understand.html>). graf vytvořen v aplikaci PTC MathCad.

4 Výpočtová část

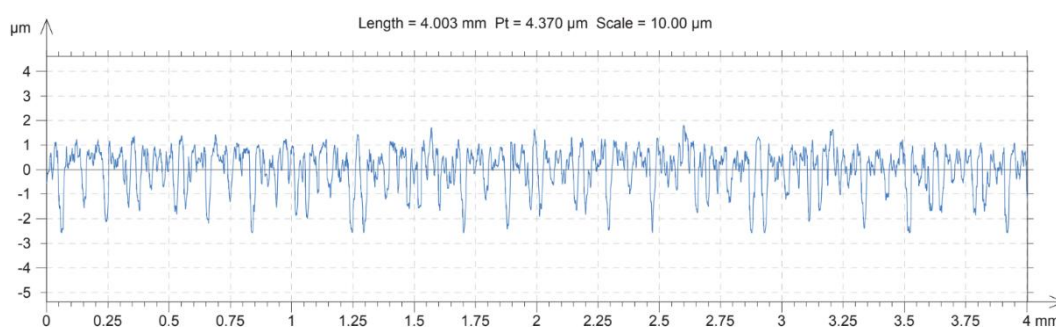
4.1 Parametry drsnosti vzorků

4.1.1 Profily drsnosti

Na následujícím obrázku 20 a obrázku 21 je možné vidět profily drsnosti, z nichž byly vypisovány hodnoty výšek a šířek prvků profilu a velikosti pořadnic $Z(x)$ pro výpočet parametrů drsnosti profilu uvedených v tabulka 1.



Obrázek 20 - Naměřený profil drsnosti drsného vzorku



Obrázek 21 - Naměřený profil drsnosti hladkého vzorku

4.1.2 Metodika určování drsnostních parametrů

Profily drsnosti byly rozděleny do pěti základních délek. Výpis hodnot Z_v , Z_p a pořadnic $Z(x)$ je řazen do pěti sloupců, v každém sloupci jsou hodnoty pouze dané základní délky.

Výpočet parametrů R_p , R_v , R_z a R_t

Pro určení parametru R_p byla nalezena maximální hodnota Z_p v rozsahu základní délky pro každý ze vzorků, viz tabulka 2. Byla použita rovnice (1). Základních délek bylo k dispozici pět a na každou základní délku připadl jeden parametr R_p . Výsledná hodnota

parametru R_p , uvedena v tabulce 3, byla získána jako jejich průměr. K určení parametru R_v byly nalezeny maximální absolutní hodnoty Z_v v rozsahu základní délky, viz rovnice (2). Na každou z pěti základních délek připadl jeden parametr R_v , viz tabulka 2 a výsledná hodnota parametru R_v , viz tabulka 3, byla spočítána jako průměr těchto hodnot.

V tabulce 2 je také zaznačen součet maximálních hodnot Z_p a Z_v v dané základní délce, který je dále použitý k výpočtu parametru R_z pomocí rovnice (3). Tučně jsou zde zaznačeny hodnoty, z nichž byl spočítán parametr R_t pro každý ze vzorků pomocí rovnice (5).

Tabulka 2 – Maximální hodnoty Z_p a Z_v pro výpočet parametrů R_p a R_v

	l_{r1}	l_{r2}	l_{r3}	l_{r4}	l_{r5}
Maximální hodnoty Z_p v dané základní délce pro výpočet R_p					
Drsný vzorek	8,7	10,45	11,375	11,373	10,6
Broušený vzorek	1,42	1,7	1,64	1,81	1,63
Maximální absolutní hodnoty Z_v v dané základní délce pro výpočet R_v					
Drsný vzorek	7	7,1	7,3	7,1	7,3
Broušený vzorek	2,57	2,56	2,57	2,57	2,58
Součet R_p a R_v v dané základní délce pro výpočet R_z					
Drsný vzorek	15,7	17,55	18,675	18,473	17,9
Broušený vzorek	3,99	4,26	4,21	4,38	4,21

Výpočet parametru R_c

Pro výpočet parametru R_c byly z profilů drsnosti odečteny výšky prvků profilu Z_t v rozsahu základní délky, viz příloha 1 - Tabulka 9 pro drsný vzorek a příloha 2 - Tabulka 10 pro vzorek broušený. Parametr byl spočítán pomocí rovnice (4).

Výpočet parametrů R_a , R_q , R_{sk} a R_{ku}

Pro výpočet parametrů drsnosti R_a , R_q , R_{sk} , R_{ku} byly použity rovnice (13-16).

Vyhodnocovaná délka u drsného povrchu byla 12,5 mm. Základní délka se volí jako jedna pětina vyhodnocované délky, byla tedy zvolena 2,5 mm. V rozsahu vyhodnocované délky bylo zvoleno celkem 290 pořadnic, které byly od sebe vzdáleny o stejnou hodnotu, a sice o 43,5 μm . Naměřené hodnoty pořadnic drsného vzorku jsou v příloze 3 - Tabulka 11.

Vyhodnocovaná délka u broušeného povrchu byla 4 mm a základní délka byla zvolena jako jedna pětina z vyhodnocované délky, tedy 0,8 mm. Celkově bylo v rozsahu vyhodnocované délky naměřeno 530 pořadnic. Jednotlivé pořadnice byly od sebe vzdáleny 7,55 μm . Veškeré naměřené hodnoty pořadnic broušeného vzorku jsou v příloze 4 - Tabulka 12.

Výpočet parametru *Rsm*

Z profilů drsnosti bylo třeba odečíst hodnoty šířek prvků profilu *Xs* pro stanovení průměrné šířky prvků profilu *Rsm*. Veškeré šířky prvků profilu *Xs* drsného vzorku se nachází v příloze 5 - Tabulka 13 a šířky prvků profilu drsnosti *Xs* broušeného vzorku v příloze 6 - Tabulka 14.

4.1.3 Vypočítané parametry drsnosti povrchu

Výsledné hodnoty parametrů drsnosti z normy ČSN EN ISO 4287 jsou v tabulce 3.

Tabulka 3 – parametry drsnosti povrchu vzorků

Parametr drsnosti	Drsný vzorek	Broušený vzorek
<i>Rp</i>	10,5	1,64
<i>Rv</i>	7,16	2,57
<i>Rz</i>	17,66	4,21
<i>Rc</i>	9,25	1,845
<i>Rt</i>	18,675	4,39
<i>Ra</i>	3,387	0,735
<i>Rq</i>	3,952	0,915
<i>Rsk</i>	1,432	1,701
<i>Rku</i>	2,347	3,655
<i>Rsm</i>	94,48	34,04

4.2 Vzorky

Vzorky, které byly podrobeny únavovým zkouškám, jsou vyrobené z legované vysokopevnostní oceli 31CrMoV9. Chemické složení oceli je uvedeno v tabulce 4. Materiálové charakteristiky pak v tabulce 5. Byly testovány dvě sady vzorků. První sada byla broušena a druhá nikoli. Lišily se tedy pouze drsností povrchu.

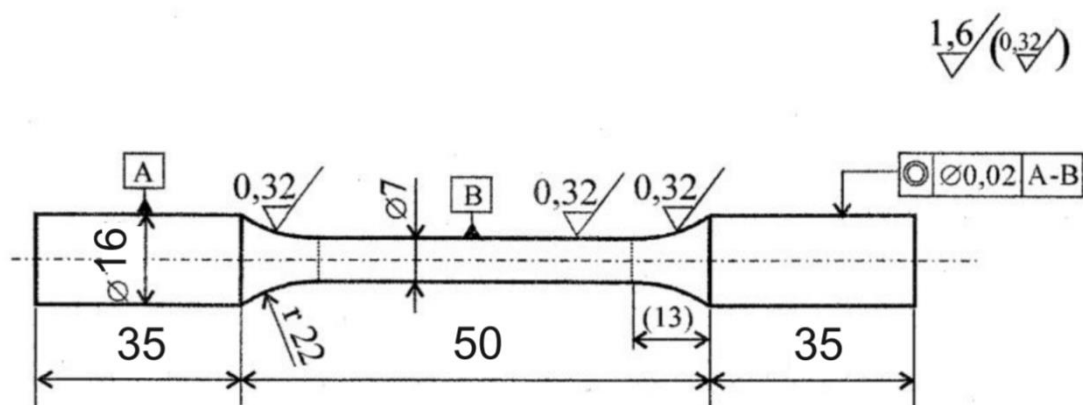
Tabulka 4 – chemické složení vzorků, obsah prvků v procentech

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0,32	0,26	0,62	0,01	0,03	2,54	0,24	0,184

Tabulka 5 – mechanické vlastnosti vzorků

Materiálová konstanta	Značení	Hodnota	Jednotka
Mez kluzu	$R_{p0,2}$	980	[MPa]
Mez pevnosti	R_m	1085	[MPa]
Tažnost	A5	17	[%]
Kontrakce	Z	62	[%]
Vrubová houževnatost	Charpy	102	[J]

Geometrie zkušebních vzorků je vyznačena na obrázku 22. Drsnostní parametry těchto vzorků jsou uvedeny v tabulce 3.



Obrázek 22 – Geometrie a kóty zkušebního vzorku

4.3 Zhodnocení únavového života

Únavové zkoušky probíhaly ohybem za rotace až do úplného lomu vzorku, anebo do chvíle, kdy celkový počet cyklů do lomu dosáhl hodnoty 10^7 cyklů, v takovém případě byl experiment přerušen. V tabulce 6 jsou hodnoty amplitudy napětí a hodnoty počtu cyklů do lomu, které byly při únavové zkoušce ohybem za rotace získány. Z těchto hodnot byly sestrojeny dvě Wöhlerovy křivky v logaritmicím měřítku, pomocí lineární regresní analýzy. Křivky byly popsány Wöhlerovou mocninou funkcí. U posledních pěti drsných

vzorků nedošlo k lomu ani po 10^7 cyklech, tato měření nebyla brána v úvahu, jelikož skutečný počet cyklů do lomu mohl být daleko větší.

Tabulka 6 - data z únavových zkoušek

č. vzorku	Drsný vzorek		Broušený vzorek	
	σ_a	N_f	σ_a	N_f
1.	699,83	7,70E+04	873,08	8,00E+03
2.	699,35	2,90E+04	819,62	1,80E+04
3.	674,29	6,00E+04	801,81	2,80E+04
4.	651,25	7,10E+04	837,44	3,00E+04
5.	579,19	8,40E+04	783,99	3,40E+04
6.	545,74	8,00E+04	757,26	5,40E+04
7.	545,75	1,22E+05	712,72	6,20E+04
8.	553,47	1,61E+05	668,17	8,70E+04
9.	517,4	2,05E+05	650,35	9,50E+04
10.	527,95	2,40E+05	623,63	1,21E+05
11.	498	3,14E+05	614,72	1,64E+05
12.	487,73	3,78E+05	579,08	1,68E+05
13.	498,06	1,18E+05	587,99	1,81E+05
14.	449,9	1,67E+05	570,17	2,57E+05
15.	394,77	1,13E+06	596,9	3,00E+05
16.	494,22	1,00E+07	605,81	3,17E+05
17.	485,54	1,00E+07	601,36	3,36E+05
18.	440,99	1,00E+07	583,54	3,74E+05
19.	423,18	1,00E+07	561,26	6,76E+05
20.	360,81	1,00E+07	-	-

4.3.1 Wöhlerovy křivky

Pro zakreslení do grafu do logaritmického měřítka použijeme vztah (22), a sice Wöhlerovu mocninnou rovnici [16].

$$\sigma_a = A \cdot N_f^B$$

Mocninnou funkci můžeme převést na lineární, když celou funkci zlogaritmujeme a logaritmus konstanty A nahradíme konstantou E . Následně pomocí lineární regresní analýzy, metodou nejmenších čtverců, spočítáme konstanty E a B pro každou z křivek [23]. Zde je upravená Wöhlerova rovnice (24)

$$\log(\sigma_a) = E + B \cdot \log(N_f) \quad (24)$$

Určování konstant B a E [23]

$$G = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n \log(Nf_i) \\ \sum_{i=1}^n \log(Nf_i) & \sum_{i=1}^n (\log(Nf_i))^2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

G je matice soustavy rovnic.

$$B = \frac{\left(n \cdot \sum_{i=1}^n (\log(Nf_i) \cdot \log(\sigma_{a_i})) \right) - \left(\sum_{i=1}^n \log(Nf_i) \cdot \sum_{i=1}^n \log(\sigma_{a_i}) \right)}{\det(G)} \quad (26)$$

$$E = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\log(\sigma_{a_i})) - B \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\log(Nf_i)) \quad (27)$$

Výpočet koeficientu determinace R^2 [23]

Koeficient determinace udává míru kvality zvoleného regresního modelu, může nabývat hodnoty maximálně 1, což znamená dokonalou předpověď hodnot.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\log(Nf_i) \cdot \log(\sigma_{a_i})) - n \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\log(Nf_i)) \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\log(\sigma_{a_i}))}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (\log(Nf_i))^2 - n \cdot \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \log(Nf_i) \right)^2 \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n (\log(\sigma_{a_i}))^2 - n \cdot \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\log(\sigma_{a_i})) \right)^2 \right)}} \right)^2 \quad (28)$$

Výpočet rozptylu a odchylky [23]

Minimální hodnota reziduálního součtu čtverců S_{min}^* se spočítá rovnicí

$$S_{min}^* = \sum_{i=1}^n (\log(\sigma_{a_i}))^2 - E \cdot \sum_{i=1}^n (\log(\sigma_{a_i})) - B \cdot \sum_{i=1}^n (\log(Nf_i) \cdot \log(\sigma_{a_i})) \quad (29)$$

Bodový odhad rozptylu s^2 je spočítán rovnicí:

$$s^2 = \frac{S_{min}^*}{n - m} \quad (30)$$

n počet vzorků

m počet koeficientů hledané rovnice.¹

Směrodatnou odchylku s spočítáme jako odmocninu z rozptylu, viz rovnice

¹ U lineární regresní analýzy $m = 2$.

$$s = \sqrt{s^2} \quad (31)$$

Nyní máme spočítané lineární koeficienty rovnice (24) a potřebujeme je přepočítat zpátky na koeficienty Wöhlerovy rovnice. Hodnota B se přepočítávat nemusí. Hodnotu A získáme rovnicí

$$A = 10^E \quad (32)$$

Výsledné hodnoty pro obě sady vzorků se nachází v tabulce 7.

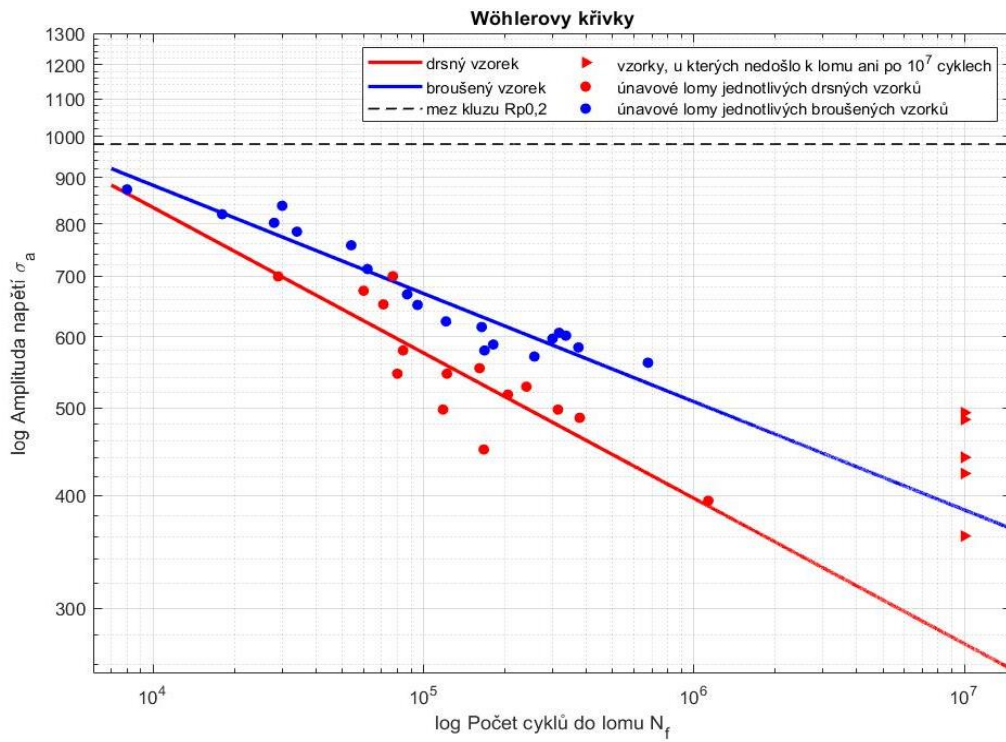
Tabulka 7 – Výsledné hodnoty výpočtů funkcí popisující únavový život vzorků

		Drsný vzorek	Broušený vzorek
Hodnota konstanty	A	3672,29	2659,42
Hodnota exponentu	B	-0,161	-0,12
Koeficient determinace	R²	0,758	0,912
Rozptyl	s²	0,0013	0,00039
Směrodatná odchylka	s	0,036	0,0198

Výsledné koeficienty A a exponenty B byly dosazeny do rovnice (22). Dostali jsme konkrétní rovnici drsného vzorku (33) a rovnici broušeného vzorku (34), viz tabulka 8. Závislosti amplitudy napětí na počtu cyklů do lomu podle těchto rovnic jsou v grafu na obrázku 23. Obrázek 5

Tabulka 8 – Výsledné rovnice v mocninném tvaru popisující Wöhlerovy křivky životnosti

$\sigma_a = A \cdot N_f^B$		
Drsný vzorek:	$\sigma_a = 3672,29 \cdot N_f^{-0,161}$	(33)
Broušený vzorek:	$\sigma_a = 2659,42 \cdot N_f^{-0,12}$	(34)



Obrázek 23 - Wöhlerovy křivky pro drsný a pro hladký vzorek s rovnicemi v mocném tvaru v log-log měřítku. Vytvořeno s pomocí aplikace MATLAB R2019b

Závěr

Na základě měření drsnostních charakteristik vzorků, které byly následně podrobeny únavové zkoušce ohybem za rotace, lze vyvodit tyto závěry.

Hodnota průměrné aritmetické úchylky profilu drsnosti Ra broušeného vzorku je $0,735 \mu\text{m}$.

Hodnota průměrné aritmetické úchylky profilu drsnosti Ra drsného vzorku je $3,387 \mu\text{m}$.

Byly vykresleny závislosti Wöhlerovy křivky životnosti popsané mocninnou funkcí

$$\sigma_a = 3672,29 \cdot (N_f)^{-0,161}, \text{ koeficient determinace } R^2 = 0,758$$

$$\sigma_a = 2659,42 \cdot (N_f)^{-0,12}, \text{ koeficient determinace } R^2 = 0,912.$$

Bylo zjištěno, že broušený vzorek odolává únavovému poškození lépe než nebroušený.

Seznam použité literatury

- [1] SVOBODA, P. BRANDEJS, J a DVOŘÁČEK, J. *Základy konstruování*. Brno: CERN, 2016. ISBN 978-80-7204-921-9.
- [2] ČSN EN ISO 4287: *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – termíny, definice a parametry struktury povrchu*. 1999.
- [3] ČSN EN ISO 4288: *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. 1999.
- [4] ČSN EN ISO 12 085: *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Parametry metody motif*. 1999.
- [5] ČSN EN ISO 13565-1: *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda, povrchy mající stratifikované funkční vlastnosti - Část 1: Filtrace a všeobecné podmínky měření*. 1999.
- [6] ČSN EN ISO 13565-2: *Geometrické požadavky na výrobu (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda; povrchy mající stratifikované funkční vlastnosti - Část 2: Výškové charakteristiky využívající křivku lineárního materiálového poměru*. 1999.
- [7] ČSN EN ISO 13565-3. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda; povrchy mající stratifikované funkční vlastnosti - Část 3: Výškové charakteristiky využívající pravděpodobnostní křivku materiálu*. 2001.
- [8] ČSN EN ISO 3274: *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda – Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů*. 1999.
- [9] ČSN EN ISO 16610-21: *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Filtrace - Část 21: Lineární profilové filtry: Gaussovy filtry*. 2012.

- [10] METELKOVÁ, J. *Bakalářská práce: Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu*. Brno: Vysoké učení technické, 2014. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [11] KARRER, J, M. *La mesure des états de surface*. [Online] 2005. [Citace: 2020-06-26] Dostupné z: <<http://jm.karrer.free.fr/documents/ES1.pdf>>
- [12] KLESNIL, M a LUKÁŠ, P. *Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání*. [editor] Ladislav Hrdina. Praha: ACADEMIA, 1975. str. 224.
- [13] LAUSCHMANN, H. *Mezní stavy I*. 2. vyd. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03671-6.
- [14] PANTĚLEJEV, L. *Únava materiálu. Ústav materiálových věd a inženýrství*. [Online] VUT. [Citace: 2020-06-26] Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/mezni_stavy/prednasky/09_6MS_unava.pdf>.
- [15] PROVAZNÍKOVÁ, A. *Diplomová práce: Únavové vlastnosti hořčikové slitiny AZ61*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2010. Vedoucí diplomové práce Ing. Libor Pantělejev, Ph.D.
- [16] VLACH, B. *Únava materiálu - úvod. Ústav materiálových věd a inženýrství*. [Online] VUT. [Citace: 2020-06-26] Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/mezni_stavy/podklady/08a%20-%20unava1.pdf>.
- [17] DOWNING, N. E. *Mechanical behaviour of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. s.l. : Upper Saddle River : Prentice Hall, 1993. ISBN 0-13-186312-6.
- [18] VLK, M., FLORIAN, Z. *Mezní stavy a spolehlivost. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky*. [Online] VUT, 11 2007. [Citace: 2020-06-26] Dostupné z: <<http://www.zam.fme.vutbr.cz/~vlk/meznistavy.pdf>>.
- [19] SHIGLEY, J. E., MISCHKE, C. R., BUDYNAS, R.G. *Konstruování strojních součástí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.

- [20] ASKELAND, D. a PHULÉ, P. *The science and Engineering of Materials*. 5th Edition. Toronto : Thompson, 2006. ISBN 0-534-55396-6.
- [21] VĚCHET, S., BORŮVKA, O., KOHOUT, J.. *Únavové vlastnosti tvárné litiny*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita, 2001. ISBN 80-7100-910-5..
- [22] ONDRÁČEK, E. *Mechanika těles: pružnost pevnost II*. Brno : Akademické nakladatelství CERM , 2006. str. 262 s. ISBN 80-214-3260-8.
- [23] KARPÍŠEK, Z. *Matematika IV, Statistika a pravděpodobnost*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2014. ISBN 978-80-214-4858-2.
- [24] VELES, P. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. Bratislava: Alfa, 1985.

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Profil povrchu	13
Obrázek 2 - Filtrace povrchu	13
Obrázek 3 - Jednotlivé profily povrchu	14
Obrázek 4 - Grafické vyjádření Z_t , Z_p , Z_v a X_s	15
Obrázek 5 - Grafická interpretace R_a	18
Obrázek 6 - Grafická porovnání parametru R_q a R_a	18
Obrázek 7 - Znázornění parametru R_{sk} , R_{ku} a grafů hustoty pravděpodobnosti pořadnic	19
Obrázek 8 - Stanovování křivky materiálového poměru z drsnostní křivky	19
Obrázek 9 - Hysterezní smyčka	21
Obrázek 10 - Cyklická křivka napětí	21
Obrázek 11 - Šíření únavové trhliny	22
Obrázek 12 - lomová plocha po únavovém lomu	23
Obrázek 13 - cykly s různým středním napětím	24
Obrázek 14 - Wöhlerovy křivky u symetrického cyklu a u míjivého cyklu.....	25
Obrázek 15 - Srovnání stejné Wöhlerovy křivky v prvním případě v logaritmické stupnici a v druhém případě v lineární	26
Obrázek 16 - Schéma zkušebního stroje pro čtyřbodový ohyb za rotace	27
Obrázek 17 - Zjednodušený nákres zatížení vzorku.....	27
Obrázek 18 - Rozložení ohybového momentu na hřídeli a vzorku při čtyřbodovém ohybu za rotace.....	28
Obrázek 19 - Rozložení napětí v ohýbané rotující tyči a graf popisující přechod bodů z tahu do tlaku v závislosti na natočení tyče	28
Obrázek 20 - Naměřený profil drsnosti drsného vzorku	29
Obrázek 21 - Naměřený profil drsnosti hladkého vzorku	29
Obrázek 22 - Geometrie a kóty zkušebního vzorku	32
Obrázek 23 - Wöhlerovy křivky pro drsný a pro hladký vzorek s rovnicemi v mocninném tvaru v log-log měřítku	36

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Parametry profilu drsnosti	16
Tabulka 2 - Maximální hodnoty Z_p a Z_v pro výpočet parametrů R_p a R_v	30
Tabulka 3 - Parametry drsnosti povrchu vzorků.....	31
Tabulka 4 - Chemické složení vzorků, obsah prvků v procentech	32
Tabulka 5 - Mechanické vlastnosti vzorků.....	32
Tabulka 6 - Data z únavových zkoušek.....	33
Tabulka 7 - Výsledné hodnoty výpočtů f_c popisující únavový život vzorků....	35
Tabulka 8 - Výsledné rovnice v mocninném tvaru popisující wöhlerovy křivky životnosti	35
Tabulka 9 - Výšky prvků profilu drsnosti Z_t drsného vzorku	46
Tabulka 10 - Výšky prvků profilu drsnosti Z_t broušeného vzorku.....	47
Tabulka 11 - Hodnoty pořadnic $Z(x)$ u drsného vzorku	48
Tabulka 12 - Hodnoty pořadnic $Z(x)$ broušeného vzorku	49
Tabulka 13 - Šířky prvků profilu drsnosti X_s drsného vzorku	51
Tabulka 14 - Šířky prvků profilu drsnosti X_s broušeného vzorku	52

Seznam zkratek a symbolů

λ_s	filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími vlnovými délkami na povrchu
λ_c	filtr definující rozhraní mezi složkou drsnosti a vlnitosti
λ_f	filtr oddělující profilu vlnitosti od složek s většími vlnovými délkami
l_n	vyhodnocovaná délka
l_r	základní délka profilu drsnosti
$Z(x)$	hodnota pořadnice
dZ/dx	místní sklon profilu
Z_t	výška prvku profilu
Z_p	hloubka prohlubně profilu
Z_v	výška výstupku profilu
X_s	šířka prvku profilu
$l(c)$	materiálová délka profilu
R_p	největší výška výstupku profilu drsnosti
R_v	největší hloubka prohlubně profilu drsnosti
R_z	největší výška prvku profilu drsnosti v rozsahu základní délky
R_c	průměrná výška prvků profilu drsnosti
R_t	největší výška prvku profilu drsnosti na vyhodnocované délce
R_a	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu drsnosti
R_q	průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu drsnosti
R_{sk}	šikmost posuzovaného profilu drsnosti
R_{ku}	špičatost posuzovaného profilu drsnosti
R_{sm}	průměrná šířka prvku profilu drsnosti
$R_{\Delta q}$	průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu
$R_{mr}(c)$	materiálový poměr profilu (nosný podíl)
$R_{\delta c}$	rozdíl výšky úseku profilu
R_{mr}	vzájemný materiálový poměr
n	počet prvků
m	počet hledaných koeficientů rovnice
σ_a	amplituda napětí
σ_h	horní napětí

σ_n	dolní napětí
σ_m	střední napětí
$\Delta\sigma$	rozkmít napětí
R	parametr asymetrie
P	amplitudový parametr
Nf	počet cyklů do lomu
σ_c	mez únavy
σ_{Nc}	časovaná mez únavy
N_c	počet cyklů odpovídající časované mezi únavy
A	součinitel Wöhlerovy rovnice
B	exponent Wöhlerovy rovnice
C	koeficient lineárního vyjádření Wöhlerovy rovnice
D	koeficient lineárního vyjádření Wöhlerovy rovnice
E	koeficient lineárního vyjádření Wöhlerovy rovnice
C	uhlík
Si	křemík
Mn	mangan
P	fosfor
S	síra
Cr	chrom
Mo	molybden
V	vanad
Rp0,2	smluvní mez kluzu
Rm	mez pevnosti
A5	tažnost
Z	Zúžení
R2	koeficient determinace
S_{min}^*	minimální hodnota reziduálního součtu čtverců
s2	rozptyl
s	směrodatná odchylka
G	matice soustavy rovnic pro výpočet koeficientů při použití lineární regresní analýzy

Seznam příloh

Příloha 1	Tabulka výšek prvků profilu drsnosti Z_t drsného vzorku
Příloha 2	Tabulka výšek prvků profilu drsnosti Z_t broušeného vzorku
Příloha 3	Tabulka s hodnotami pořadnic $Z(x)$ drsného vzorku
Příloha 4	Tabulka s hodnotami pořadnic $Z(x)$ broušeného vzorku
Příloha 5	Tabulka šířek prvků profilu drsnosti X_s drsného vzorku
Příloha 6	Tabulka šířek prvků profilu drsnosti X_s broušeného vzorku

Přílohy

Příloha 1

Tabulka 9 – výšky prvků profilu drsnosti Z_t drsného vzorku

lr_1 Z_t	lr_2 Z_t	lr_3 Z_t	lr_4 Z_t	lr_5 Z_t
8,125	14,4	8,8	13,1	14,7
3,3	13,4	10,5	4,2	14,4
10,1	9,1	6,4	9,1	5,2
15,7	5,3	14,5	4,3	13,9
10,65	13,75	8,5	3,5	10,8
8	8,125	13,1	7	5
3,2	11,65	10,6	8,2	18,1
2,45	11,1	13,8	6,1	4,7
11,4	11,7	8,5	9,7	9,3
13,75	8,3	15	9,3	9,4
15,45	5,2	14,2	10,5	8,2
5,54	14,15	4,2	11,2	9,7
2,4	5,6	13,8	13,4	5,4
10,2	13,4	1,9	8,9	13
9,7	9,6	5,5	5,2	9,9
11,4	3,1	5,8	6,5	8,7
6,7	15,2	9,7	6,2	9,5
14,6	7,5	8	8	13
12,1	13,25	5,3	4,3	10,34
9,6	9,9	4,7	11,5	8,7
2,8	10,6	4,5	7,25	10
3,2	10,68	8,6	6,1	14,9
-	5,3	4,7	14,4	5,2
-	6,8	18,5	14,2	14,4
-	10,2	9,9	2,3	10,1
-	9,3	13,45	6,4	2,6
-	5,4	9,1	9	13,8
-	-	14,9	8,2	13,7
-	-	12,4	4,4	4,3
-	-	-	5	-
-	-	-	13,6	-
-	-	-	12,5	-

Příloha 2

Tabulka 10 – výšky prvků profilu drsnosti Z_t broušeného vzorku

lr_1 Z_t	lr_2 Z_t	lr_3 Z_t	lr_4 Z_t	lr_5 Z_t
1,1	3,43	0,7	1,47	1,9
3,7	1,6	1,2	3,4	1,9
2,8	1,5	1,13	1,47	1,08
3,32	2,16	3,8	1,16	0,9
1,7	0,9	1,05	1	0,48
1,9	1,8	2,25	0,65	0,95
2,97	2,8	0,9	1,4	3,45
1	0,9	3,3	1,95	0,8
1,66	2,65	1,15	2,9	0,58
1,026	2	1,14	1	0,93
1,53	2,4	1,6	2,6	1,67
0,96	1,5	1,9	1	0,66
2,85	3,2	3,5	1,35	0,7
2,93	3,99	1,7	2,2	3,62
1,05	0,46	1,37	0,76	1,05
1,13	0,9	3,05	0,75	0,82
3,07	1,1	3,23	0,47	1,72
1,59	1,84	0,89	3,36	1,82
2,3	2,12	3,75	3,94	2,9
1,4	2,5	1,2	1,59	1,6
-	1,45	2,17	0,7	1,4
-	1,9	-	1,8	2,7
-	1,6	-	1,8	2,8
-	1,96	-	3	1,4
-	2,5	-	1,2	0,5
-	-	-	2,3	3,48
-	-	-	1,67	1,42

Příloha 3

Tabulka 11 – hodnoty pořadnic $Z(x)$ u drsného vzorku

lr_1 $Z(x)$	lr_2 $Z(x)$	lr_3 $Z(x)$	lr_4 $Z(x)$	lr_5 $Z(x)$
7,475	1,3	3,1	3,2	6,4
0,2	6,9	4,2	2,5	4,6
1,25	2,5	1,7	5,1	2,1
1,875	4,8	9,8	4,1	4,5
5,1	5,6	0,3	2,4	5,2
3,75	3,3	1,5	3,2	8
5	1,5	4,1	2,1	1,3
2,5	4,8	3,8	3,8	1,2
6,875	3,2	6,3	3,6	7,4
4,9	2,2	2,7	1,7	5,5
6,8	1,4	0,2	1,1	3,2
5	1	2,75	2,8	1,5
2,5	3,6	7,1	2	4,1
3,75	6,4	2,4	1,8	9,3
3,125	4,4	4,2	1,7	5
3,75	2,7	2,1	4,2	1,8
1,25	2,6	3,2	2,1	4,1
0,6	5,5	3,75	1,5	2,1
0,7	2,6	4,3	1,3	6,5
1,3	1,9	2,6	1,1	4,1
0,5	1,4	0,4	2,8	5,2
1,8	1,4	1,4	4,8	3,1
3,75	1,2	6,4	1,4	2,5
1,8	5	6,1	1,3	3,2
4,3	4,4	3,1	3,4	2
0,6	0,7	1,1	3,8	3,5
1,9	1,6	0,7	2,1	3,8
6,8	2,5	8,8	3,5	3,2
1	3,2	2,1	0,8	6,9
3,7	6,4	0,7	2,1	3,9
3,8	4,2	1,8	1,4	2,7
5,7	1,4	2,6	0,2	2
6,4	3,7	1,8	5,1	1,8
4,6	4,8	2,8	1,2	7,6
3,2	4,4	2,4	4,6	3,2
0,8	6,3	1,4	1,3	3,9
1,4	2,3	2,4	2	8,4
1,9	1,4	1,7	7,4	3,9
2,1	5,2	1,1	3,8	1,2
6,3	3,8	2,6	5,1	5
1,2	6,4	6,5	6,1	2,1
1,42	4,2	0,8	3,1	2
3,9	1,8	1,8	4,7	0,8
5,8	1,8	6,2	2,2	7
2,65	7	6,2	2,3	3,4
2,6	3,2	1,5	0	4,2
1,9	4,2	3	3,8	2,1
4,4	2,4	0,6	2,8	1,9
1,95	2,4	4,2	1,3	2,9
5,7	9,7	5,1	2,1	0,5
2,4	2,7	3,1	4,9	4,9
3,3	4,3	2,7	4	1,9
6,3	3,8	0,8	9,1	2,2
4,5	2,1	4,8	4,1	1,3
1,8	5,6	4,2	1,5	7
8,2	2,2	6,4	5,1	5,5
1,4	7,1	5	3,1	4,1
0,2	1,3	1,4	2,8	10

Příloha 4

Tabulka 12 - hodnoty pořadnic $Z(x)$ broušeného vzorku

lr_1 $Z(x)$	lr_2 $Z(x)$	lr_3 $Z(x)$	lr_4 $Z(x)$	lr_5 $Z(x)$
0,1	0,7	0,7	0,3	0,6
0,6	0,8	1,5	0,4	1,5
0,3	0,8	0,3	0,8	1,6
0,9	0,7	0,5	1,1	0,3
1	1,8	0,1	0,6	0,1
0,2	2,5	0,4	0,3	0,4
1,5	1,5	0,7	0,4	0,8
2,5	0,8	0,4	0,3	0,3
1,4	1	0,2	0,8	0,6
0,1	0,4	0,4	0,2	0,2
0,2	0,2	0,1	2	0,1
0,3	0,4	0,5	1,4	0,6
0,4	0,2	0,9	0,4	0,2
0,5	0,4	1	1,3	0,6
0,5	0,1	2,5	0,7	0,1
0,7	0,2	2	0,1	0,4
0,55	0,2	0,4	0,8	0,8
0,7	0,3	0,5	0,2	0,7
0,2	1,5	0,6	0,3	1,3
1,4	0,6	0,5	0,6	2,1
1,2	0,4	0,1	0,5	2
0,7	0,3	0,3	0,1	0,3
0,6	1,1	0,7	0,5	0,5
0,6	1,1	0,4	0,4	0,1
0,3	0,9	0,7	0,2	0,2
0,6	0,3	0,3	1	0,2
0,9	0,7	1,2	0,3	0,7
1,1	0,9	0,9	1,7	0,6
0,7	1,4	0,4	1,5	0,4
0,5	1,7	0,8	1,4	0,2
0,6	0,3	0,1	0,4	0
2,1	0,2	0,3	0,8	1,2
1,8	0,4	0,2	1	1,1
1,1	0,6	0,2	0,8	0,2
0,3	1,9	0,9	1,4	0,6
0,5	1,6	0,9	1,3	0,2
0,3	0,6	0,5	0,3	0,1
0,3	0,6	1	0,3	0,2
0,5	0,7	2,4	0,6	0,4
0,8	0,4	1,8	0,8	1,1
0,6	0,2	1,1	1,3	1
0,5	0,4	0,4	1	0,6
0,3	0,8	1	0,5	0,8
1,4	1	0,2	0,7	2,5
0,6	1,1	0,2	0,1	2,6
1,1	1	0,2	0,4	0,6
1,2	0,6	1	0,6	0,2
0,7	0,6	0,7	0,3	0,2
1	1	0,6	0,4	0,2
1,5	4	0,3	0,4	0,6
0,3	0,8	0,8	0,9	0,4
0,9	0,4	1,5	1	0,6
0,7	0,6	1,1	1,3	0,9
0,2	0,2	1,5	0,6	0,8
0,6	0,2	0,6	0,2	0,1
0,6	0,2	0,8	0,4	1,6
0,6	0,2	1,5	0,4	1,6
0,8	0,5	0,8	0,2	0,8
0,6	0,6	0,7	0,2	0,9
0,1	2,2	0,6	0,4	0,8
0,9	2,5	0,3	0,1	0,8
0,6	1,2	0,2	0,6	1,6
0,6	0,4	0,4	0,5	0,8
0,4	1,4	0,6	1,2	0,6

0,6	0,4	0,4	2,5	0,6
0,01	1,1	0,4	2	0,4
0,5	2,2	0,4	0,6	0,4
0,7	2,1	0,6	1,2	0,5
1	1	0,5	1,3	0,4
1,6	0,4	0,3	0,6	0,4
1	0,5	0,2	1	0,4
1,1	0,2	0,2	2,5	0,7
1,3	0,3	0,6	2,2	0,2
1	0,3	1,3	0,2	0,5
1,3	0,4	0,6	0,6	0,6
1,2	0,3	1,4	0,5	0,3
0,3	0,5	1,3	0,3	0,5
0,4	0,2	0,5	0,4	0,8
0,8	1,1	1	0,3	0,6
0,9	0,8	1,1	0,5	1,7
0,5	0,2	1,2	0,5	1,7
0,3	1,1	1,3	0,3	0,4
0,4	1	0,1	0,4	0,8
0,6	1	0,6	1	0,8
0,2	0,8	0,7	1	1,3
0,8	0,8	0,5	0,5	1,5
1,8	0,7	0,3	0,9	0,5
2,1	0,7	0,2	0,2	0,6
0,6	0,6	0,2	0,7	0,6
0,6	0,8	0,4	0	0,5
1	1,5	1	0,6	0,1
1,3	1,4	1,1	0,6	0,4
0,6	0,5	2	0,4	0,1
0,4	0,2	2,4	0,2	0,3
0,3	0	0,6	0,7	0,2
0,4	0,3	0,8	1,7	0,8
0,7	1,5	1,1	1,3	1,9
0,8	1,5	0,8	0,9	2,6
0,6	0,9	0,7	0	0,6
1	1,1	0,4	0,2	0,6
0	0,1	0,7	0,6	0,8
0,8	0,2	0,1	1,7	1,1
0,8	1	1	1,2	0,3
1	1,5	0,4	0,8	0,1
0,5	0,4	0,9	0,8	0,2
0,1	0,2	0,4	0,6	0,8

Příloha 5

Tabulka 13 – šířky prvků profilu drsnosti X_s drsného vzorku

lr_1 X_{Si}	lr_2 X_{Si}	lr_3 X_{Si}	lr_4 X_{Si}	lr_5 X_{Si}
56,55	113,1	121,8	17,4	208,8
34,8	100,05	53,505	87	243,6
139,2	143,55	65,25	78,3	34,8
247,95	43,5	113,1	39,15	178,35
221,85	52,2	82,65	126,15	78,3
78,3	130,5	165,3	95,7	47,85
36,975	100,05	87	65,25	134,85
53,505	91,35	130,5	104,4	91,35
130,5	104,4	100,05	121,8	60,9
221,85	126,15	126,15	78,3	100,05
240,12	73,95	69,6	21,75	121,8
60,9	26,1	47,85	69,6	60,9
34,8	126,15	78,3	134,85	52,2
108,75	34,8	56,55	87	117,45
113,1	187,05	73,95	73,95	108,75
117,45	39,15	60,9	39,15	134,85
74,82	78,3	95,7	47,85	65,25
152,25	134,85	73,95	26,1	139,2
208,8	113,1	60,9	52,2	47,85
56,55	108,75	78,3	52,2	178,35
45,675	56,55	73,95	13,05	65,25
73,95	95,7	56,55	113,1	56,55
-	78,3	52,2	60,9	104,4
-	30,45	126,15	65,25	87
-	56,55	95,7	104,4	78,3
-	91,35	130,5	139,2	-
-	56,55	130,5	60,9	-
-	43,5	113,1	56,55	-
-	-	-	69,6	-
-	-	-	60,9	-
-	-	-	165,3	-
-	-	-	117,45	-
-	-	-	113,1	-

Příloha 6

Tabulka 14 – šířky prvků profilu drsnosti X_s broušeného vzorku

lr_1 X_{Si}	lr_2 X_{Si}	lr_3 X_{Si}	lr_4 X_{Si}	lr_5 X_{Si}
22,65	60,4	30,2	61,91	30,955
45,3	22,65	24,16	37,75	22,65
86,825	30,2	9,815	28,69	15,1
90,6	37,75	30,2	17,365	21,14
67,95	11,325	15,1	14,345	15,855
30,2	31,71	45,3	22,65	22,65
45,3	37,75	35,485	47,565	42,28
24,16	17,365	52,85	37,75	15,855
26,425	28,69	89,09	15,1	15,1
15,1	37,75	13,59	24,16	28,69
37,75	34,73	22,65	41,525	32,465
15,1	11,325	31,71	55,87	25,67
45,3	43,79	21,895	24,16	64,93
45,3	45,3	40,015	13,59	12,08
15,1	7,55	43,79	7,55	28,69
16,61	11,325	45,3	46,055	24,16
58,89	24,16	49,075	50,585	22,65
49,075	45,3	51,34	37,75	43,035
33,22	40,015	21,895	6,04	43,79
37,75	48,32	56,625	43,79	37,75
-	15,855	51,34	39,26	52,85
-	27,935	31,71	46,055	51,34
-	24,16	-	48,32	30,2
-	-	-	24,16	17,365
-	-	-	-	35,485
-	-	-	-	28,69
-	-	-	-	9,06