

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Hodnocení postupných změn mechanických vlastností na povrchu únavových vzorků s růstem únavového namáhání

Autor: **Aleš PROCHÁZKA**

Vedoucí práce: **RNDr. Ivo ŠTĚPÁNEK**

Akademický rok 2015/2016

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Aleš PROCHÁZKA**
Osobní číslo: **S13B0474P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**
Název tématu: **Hodnocení postupných změn mechanických vlastností na povrchu únavových vzorků s růstem únavového namáhání**
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování:

1. Únava materiálu
2. Metody zkoušení únavy materiálu
3. Metody hodnocení povrchových materiálů
4. Hodnocení povrchových vlastností zkoušeného materiálu před únavovým zatížením
5. Hodnocení postupných změn povrchových mechanických vlastností s růstem únavového namáhání
6. Diskuse výsledků
7. Závěr

Rozsah grafických prací: fotodokumentace, obrázky

Rozsah kvalifikační práce: 50-60 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- Štěpánek, I.; Bláhová, O.; Kolega, M.: Tenké vrstvy - vytváření, vlastnosti. Skripta ZČU v Plzni, 1994
- Nanoindentation Reference Manual. CSM Instruments
- Schijve, J.: Fatigue of Structures and Materials. Kluwer Academic Publisher, 2004
- Odborné články v oblasti hodnocení povrchových mechanických vlastností a v oblasti hodnocení únavového chování

Vedoucí bakalářské práce: **RNDr. Ivo Štěpánek**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Dana Lisová**
Rizzo Associates Czech, a. s.

Datum zadání bakalářské práce: **21. září 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2016**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Doc. Dr. Ing. Antonín Kříž
vedoucí katedry

V Plzni dne 21. září 2015

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 práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Procházka	Jméno Aleš		
STUDIJNÍ OBOR	„Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) RNDr. Štěpánek	Jméno Ivo		
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KKS			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Hodnocení postupných změn mechanických vlastností na povrchu únavových vzorků s růstem únavového namáhání			

FAKULTA	strojí	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2016
----------------	--------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	65	TEXTOVÁ ČÁST	65	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p style="text-align: center;">ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Cílem práce je zmapování změn mechanických vlastností na povrchu únavových tyčí v závislosti na narůstajícím únavovém namáhání s využitím citlivých metod pro analýzy mechanických vlastností a chování povrchových vrstev zejména nanoindentace a vrypové indentace. Výsledky této práce budou sloužit pro Ústav termomechaniky AV ČR k dalšímu výzkumu v oblasti únavového zkoušení.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Únava materiálu, nanoindentace, vrypová zkouška, hodnocení mechanických vlastností a chování povrchu, kohezivní chování</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Procházka	Name Aleš	
FIELD OF STUDY	“Department of Material Science and Technology“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) RNDr. Štěpánek	Name Ivo	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Evaluation of gradual changes of mechanical properties on surface of fatigue samples with increasing fatigue stress		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2016
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	65	TEXT PART	65	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The goal is mapping of changes of mechanical properties on surface of samples for fatigue tests in dependence on increasing fatigue stress with using sensitive methods for analysis of mechanical properties and behaviour of surface layers namely nanoindentation and scratch indentation. The results will be used by Institute of Thermomechanics AS CR for next research in the range fatigue tests.
KEY WORDS	Fatigue tests, nanoindentation, scratch indentation, evaluation of mechanical properties and behaviour of surface, cohesive behaviour

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu této bakalářské práce panu RNDr. Ivu Štěpánkovi především za obětavý přístup, odborné rady a pomoc při řešení dané problematiky a následné tvorbě této bakalářské práce.

Zvláštní poděkování patří také mé rodině, která mě podporovala během celého mého studia.

Použité zkratky a jednotky

Zkratky

Obr. – obrázek

Tab. – tabulka

Max. – maximální, maximálně

Min. – minimální, minimálně

Jednotky

° - stupeň

°C – stupeň Celsia

nm – nanometr

μm – mikrometr

mm – milimetr

s – sekunda

min - minuta

N – newton

mN – milinewton

kN - kilonewotn

g – gram

kg - kilogram

Pa – pascal

kPa – kilopascal

HB – Tvrdost dle Brinella

HR – Tvrdost dle Rockwella

HV – Tvrdost dle Vickerse

'' – palec

Osnova

Úvod	3
1. Únava materiálu	4
2. Zkoušky únavy	5
2.1. Wöhlerova křivka	5
2.2. Mez únavy	6
2.3. Únavový lom	6
2.4. Průběh napětí	8
2.4.1. Kmit napětí	8
2.4.2. Základní vztahy kmitu	9
2.5. Smithův diagram	10
2.6. Hysterézní smyčka	11
2.7. Rozdělení zkoušek únavy:	13
3. Zařízení pro zkoušení únavy materiálu	14
3.1. Frekvenční srovnání	17
4. Zkušební tělesa	18
5. Fyzikální vlastnosti povrchu	19
6. Měření tvrdosti	19
6.1. Vrypové zkoušky	20
6.2. Vnikací zkoušky	20
6.2.1. Tvrdost podle Brinella (HB)	21
6.2.2. Tvrdost podle Rockwella (HR)	22
6.2.3. Tvrdost podle Vickerse (HV)	22
6.2.4. Knoopova zkouška	23
6.2.5. Měření mikrotvrdosti	24
6.2.6. Nanoindentace	24
6.3. Rázové zkoušky	27
6.3.1. Poldi kladívko	27
6.3.2. Baumannovo kladívko	28
6.4. Odrazové zkoušky	28
6.4.1. Shoreho skleroskop	28
6.4.2. Shoreho duroskop	29
7. Měřicí přístroje	29
7.1. Nanoindentor Shimadzu DUH 202	30
7.2. Scratch tester (přístroj scratch tester CSEM REVETEST)	31

7.3. Únavový stroj INSTRON 8502	33
8. Zkušební vzorek pro experiment	34
9. Experiment	35
10. Diskuze výsledků	60
11. Závěr.....	61
12. Seznam obrázků	62
13. Seznam grafů.....	63
14. Použitá literatura	65

Úvod

Únava materiálu je úskalím většiny namáhaných strojních součástí. Vlivem únavy dochází k nežádoucím změnám mechanických vlastností, které vedou až k náhlé destrukci součásti, aniž by byla překročena mez kluzu. Z toho důvodu se provádí finančně i časově náročné zkoušky, které končí destrukcí zkušebního vzorku.

Cílem této práce je pokusit se zkoumat změny mechanických vlastností na povrchu zkušebních vzorků s využitím citlivých analytických metod určených zejména pro hodnocení vlastností a chování povrchových vrstev materiálů a systémů tenká vrstva – základní materiál především s využitím nanoindentační metody a vrypové indentace. Zkoušeným materiálem je ocel 11 523.1, při navyšování cyklů únavového zatížení a při rozdílné velikosti amplitudy namáhání. Naměřená data budou sloužit jako podklad pro Ústav termomechaniky AV ČR, k následnému zkoumání vzájemných závislostí průběhu změn mechanických vlastností a chování povrchu vzorku se zvyšujícím se únavovým zatížením a tím vyvolání postupných změn mechanických vlastností před vznikem trhlin před únavovým porušením. To by mohlo vést k doplnění únavových křivek o zachycení postupných změn v materiálu před vznikem trhlin a únavového lomu.

Pro analýzu tvrdostních charakteristik a hodnocení změn poměrů plastických a elastických deformací bude použit nanoindentor Shimadzu DUH 202, který je schopen měřit s využitím různých modů jednoduchých i cyklických a s různou velikostí maximálního normálového zatížení. Díky těmto možnostem získáme komplexnější analýzu měřených vlastností a chování povrchových vrstev vzorků.

Dalším používaným měřicím přístrojem bude scratch tester CSEM REVETEST. S tímto přístrojem lze hodnotit kohezivní chování materiálu s využitím různých normálových sil a také umožňuje celou řadu možností pro realizaci vnímacích zkoušek při použití různých geometrií vnikacích těles.

Posledním předpokládaným použitým měřicím přístrojem bude únavový stroj INSTRON 8502. Tento přístroj umožňuje simulaci únavového namáhání. Také lze nastavit velikost a rychlost zatěžování i počáteční zatížení, okolo kterého bude probíhat kmitání. Na tomto přístroji bude provedena tahová zkouška a cyklování zkušebních vzorků.

1. Únava materiálu

Je určitý proces postupného kumulování vad materiálu, způsobený mechanickým, tepelným nebo mechanicko-tepelným zatěžováním kmitavého charakteru, které postupně vede přes změny struktury a mechanických vlastností až k nukleaci zárodků a postupnému růstu trhlin. [1], [2]

Probíhá v každé dynamicky namáhané součásti. Únava vzniká mechanickým namáháním tahem, krutem nebo ohybem, dále hovoříme o únavě kontaktní, opakovaným rázem, akustické či tepelné únavě. [1], [2]

Strojní součásti využívané v provozu s opakujícími se časově proměnlivými silami, které vyvolávají příslušné napětí, často podléhají defektům už při napětích výrazně nižších než je mez pevnosti (R_m) a v drtivé většině toto napětí nedosahuje ani meze kluzu (R_e) příslušného materiálu. Mluvíme zde o porušení únavou materiálu, které označujeme jako únavový lom. [1], [2]

Závisí na mnoha faktorech například:

- Typ materiálu (houževnatý, křehký)
- Inkluze v materiálu (velikost necelistvosti materiálu, která již ovlivňuje mez únavy je $55\mu\text{m}$ u nízkouhlíkových ocelí a $4\mu\text{m}$ u zušlechťených ocelí)
- Mez pevnosti v tahu
- Velikost zrna (s velikostí mez únavy klesá)
- Tvar součásti (vruby, zápichy, ostré přechody)
- Jakost povrchu (čím je drsnost povrchu nižší, tím mez únavy roste)
- Povrchová koroze (korozní důlky mají stejný účinek jako vrub)
- Teplota
- Tepelné zpracování (stav/podoba mikrostruktury)
- Pracovní prostředí (vlhkost, teplotní proměnlivost)
- Typ namáhání (rázové, mívivé, kmitavé, náhodné)
- Charakter namáhání (tah, ohyb, krut, složené)
- Povrchové úpravy (cementace, nitridace)
- Povrchové zpevňování mechanickým způsobem (jedna z nejúčinnějších metod pro zvýšení únavové pevnosti)
- Frekvence (zvýšováním frekvence kmitů mez únavy narůstá)
- Velikost pozorované součásti (při zvětšujícím se průřezu součásti mez únavy klesá)
- Vnitřní úpravy materiálu (prokování, žíhání)

A další. [2]



Obr. 1 - Únavové porušení válcové pružiny [9]

Zjištění meze kluzu a pevnosti můžeme zjistit základní statickou zkouškou tahem, kterou lze provádět například na univerzálním trhacím stroji.

Praxí bylo zjištěno, že 80% až 90% veškerých lomů strojních součástí v provozu vzniká právě únavou. Proto má význam věnovat zvýšenou pozornost zákonitostem únavového porušování, ze kterého lze určovat příslušné materiálové charakteristiky. [1], [2]

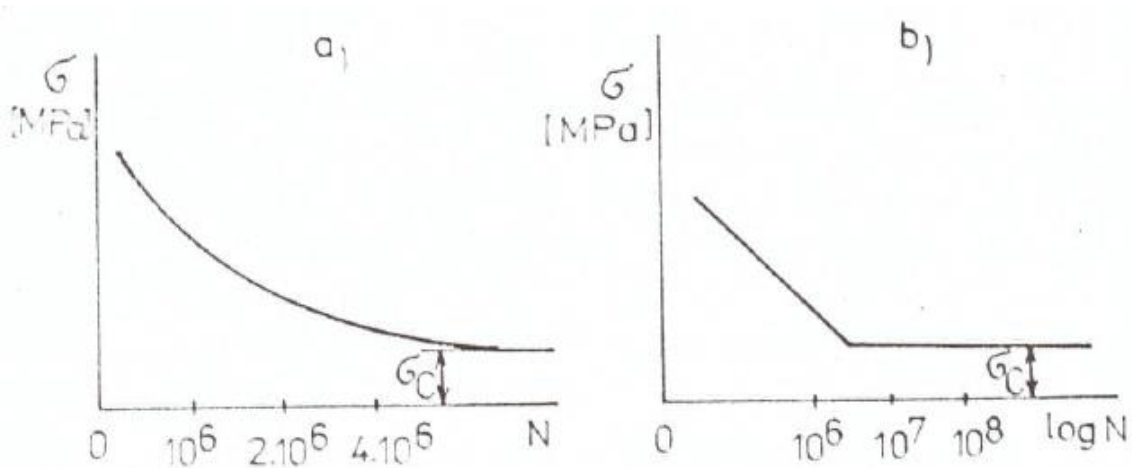
2. Zkoušky únavy

Probíhají na principu cyklického namáhání kmitáním zkoušeného vzorku, ve kterém se lokálně kumulují vady materiálu. Dochází zde k velkému vnitřnímu napětí, což způsobuje nukleaci mikroskopické trhliny, která se následně šíří, čímž se zmenšuje namáhaný průřez. Ve chvíli kdy průřez nedokáže přenést dané namáhání, dojde k dolomení součásti. Při naměření dostatečného počtu vzorků (minimálně 6-8 zkušebních těles) s různou hodnotou zatěžujícího kmitavého napětí lze body (tvořenými z výsledků jednotlivých vzorků) proložit křivku, kterou nazýváme dle autora Wöhlerova křivka. [1], [2]

2.1. Wöhlerova křivka

Je grafické znázornění závislosti amplitudy napětí na počtu cyklů. Nezohledňuje základní statické zatěžující napětí, okolo kterého kmitáme, též známého jako střední napětí kmitu σ_m , jelikož má při zkoumání únavových vlastností až druhotný význam.

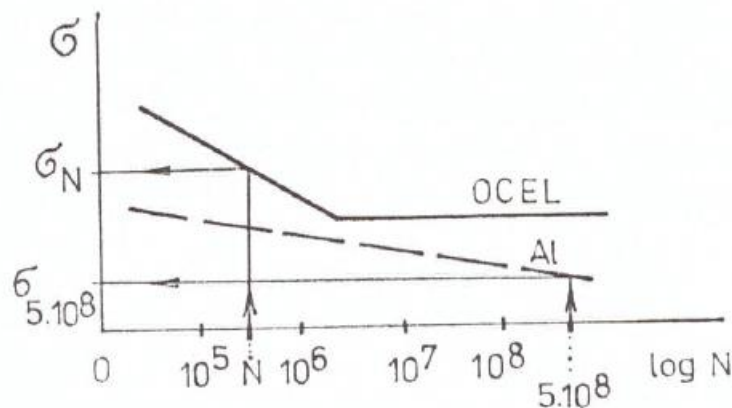
Nejčastěji se používají dva typy zobrazení. První je použití klasické lineární stupnice pro obě osy a druhý typ se liší použitím logaritmické stupnice na ose počtu kmitů. [1] [2]



Obr. 2 - Wöhlerovy křivky a) lineární stupnice b) logaritmická stupnice [2] str. 82

2.2. Mez únavy

Pro každý materiál existuje takové napětí, které vydrží při teoreticky nekonečném počtu kmitů. V praxi, z hlediska únavy materiálu, je pojem nekonečno nahrazen konečným počtem kmitů označovaným N_c , který není jednotný pro všechny materiály. Pro ocel, litinu, měď a její slitiny bereme $N_c = 10^7$, pro lehké kovy a jejich slitiny uvažujeme s číslem o řád vyšší $N_c = 10^8$ kmitu. Začala se používat i tzv. časová mez únavy, což je nejvyšší napětí, které materiál vydrží pro určený počet kmitů. [1], [2]



Obr. 3 - Wöhlerova křivka – meze únavy [2] str. 82

2.3. Únavový lom

Nukleace únavové trhliny se vždy nachází na povrchu s výjimkou strojních součástí s nitrídační nebo cementační povrchovou úpravou. Výjimku též tvoří součásti s výraznými vnitřními vadami. [2]

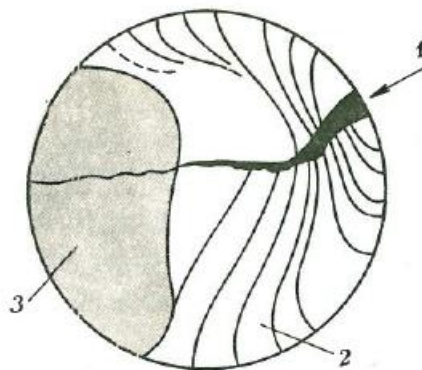
Průběh porušení materiálu vlivem únavy je velmi náročný proces, kdy nejdříve dochází ke změně mechanických vlastností, následně ke vzniku trhlin a pak k jejich rozrůstání. Obecně porušování rozdělujeme do dvou fází. První fází je průběh od začátku zatěžování až po vznik zárodku únavové trhliny za druhou fází považujeme její šíření. [1]

V první fázi únavového procesu je nukleace trhliny spjata s lokálními rozdíly v deformační schopnosti materiálu. Po dosažení určité hodnoty mezního napětí vznikají ve vhodně orientovaných zrnech materiálu kluzné pásy s nadměrným výskytem dislokací. Rozměry těchto pásových oblastí postupně vzrůstají s počtem zatěžovacích cyklů. [1]



Obr. 4 - Únavový lom drážkovaného hřídele [9]

Jelikož deformace zrn je přímo úměrná zpevnění, tak při zvyšování lokálních deformací značně roste i rozdíl pevností v postižených místech oproti zbytku materiálu. Na rozhraní těchto mechanických vlastností se při dalším nárůstu počtu zatěžovacích cyklů začnou objevovat trhliny mikroskopické velikosti. Oblasti se sníženou deformační schopností, což jsou místa s nejvyšší koncentrací napětí (vměstky, hranice fází atd.), mají procentuálně nejvyšší pravděpodobnost vzniku trhliny a následného šíření únavového lomu. [1]



Obr. 5 - Schématické znázornění únavového lomu [1] - str. 204

Popis obr.5:

- 1) Oblast východiska lomu a následně trhliny
- 2) Oblast postupně narůstajícího únavového lomu
- 3) Zbytkový statický lom (často matný vzhled)

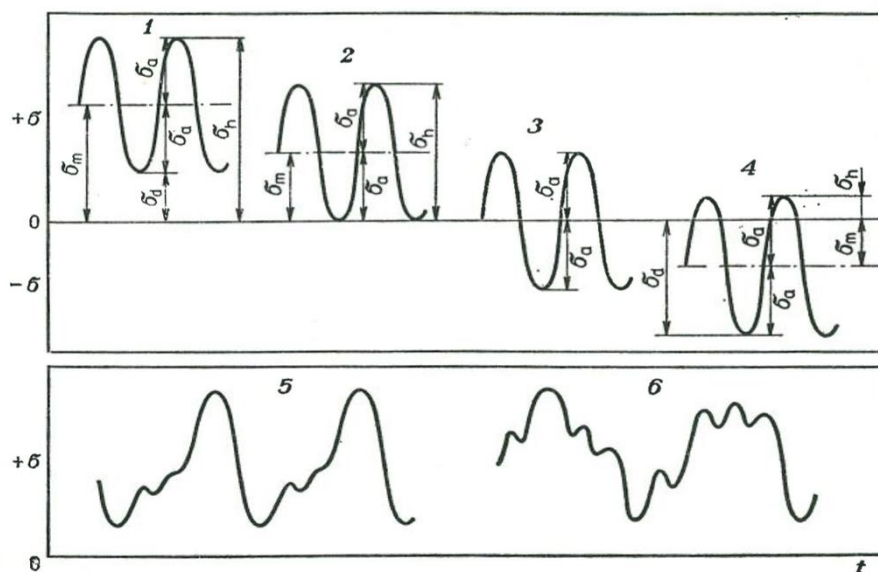
2.4. Průběh napětí

Při únavových zkouškách se převážně používá pravidelné (např. sinusové) namáhání kmitáním napětí kolem určitého stálého napětí σ_m , pro přesnější napodobení daného průběhu namáhání v praxi lze provádět zkoušku i s náhodným kmitáním, ale nasimulovat takové namáhání je velice obtížné. [1] [2]

2.4.1. Kmit napětí

Důležitými parametry u kmitu napětí jsou:

- T - perioda (doba jednoho kmitu)
- f - frekvence (počet kmitů za jednotku času)
- σ_h - horní napětí kmitu
- σ_n - dolní napětí kmitu
- σ_m - střední napětí kmitu
- σ_a - amplituda napětí (polovina algebraického rozdílu horního a dolního napětí kmitu)



Obr. 6 - Typy průběhu napětí [1] - str. 206

Popis obr. 6:

- 1) pulzující
- 2) mívivé
- 3) souměrně střídavé
- 4) nesouměrně střídavé
- 5) nepravidelně opakující se
- 6) náhodné

2.4.2. Základní vztahy kmitu

Perioda T , též nazývaná dobou kmitu, je časový úsek kdy proběhne jeden celý kmit, který se u pravidelného cyklického namáhání neustále opakuje. Vyjadřuje se jednotkou času. Pojmem frekvence f rozumíme převrácenou hodnotu periody a vyjadřujeme ji počtem cyklů za jednotku času, proto platí. [3]

$$f=1/T \quad (1)$$

Horní napětí σ_h je algebraicky maximální napětí v cyklu, naopak dolní napětí σ_d dosahuje minimální hodnotě. Z těchto veličin snadno určíme střední napětí σ_m , neboť se rovná jejich průměrné hodnotě. [3]

$$\sigma_m = (\sigma_h + \sigma_d)/2 \quad (2)$$

Výkmit neboli amplituda napětí σ_a je maximální vychýlení napětí od střední hodnoty[3]

$$\sigma_a = (\sigma_h - \sigma_d)/2 \quad (3)$$

Účinek středního napětí na únavovou pevnost:

Prokázalo se, že tahové pulzující ($\sigma_m > 0$) zatěžování má nižší únavovou odolnost, při předpokladu použití stejné amplitudy napětí, než napětí symetricky střídavého kmitu ($\sigma_m = 0$). [5]

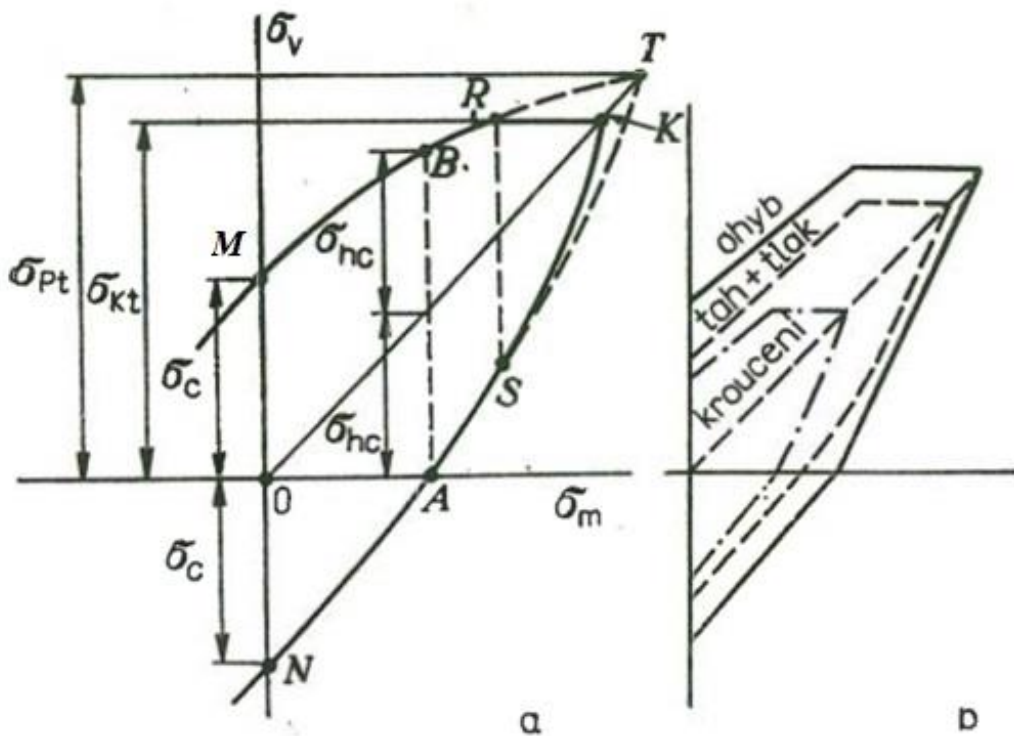
Je důležité rozlišovat dva základní typy cyklického zatěžování vzorků:

1. Měkké zatěžování (tím rozumíme zatěžování s řízenou amplitudou napětí)
2. Tvrdé zatěžování (tím rozumíme zatěžování s řízenou amplitudou poměrné deformace) [5]

Je experimentálně ověřeno a používáno mnoho výpočetních vztahů, při předpokladu měkkého zatěžování znázorňující účinek středního napětí σ_m na mezní amplitudě namáhání σ_a . Grafické znázornění odolnosti proti porušení při opakovaném (únavovém) namáhání s ohledem na statickém středním předpětí σ_m získáme sestavením Shmithova diagramu. Musíme však akceptovat dané podmínky pro správné sestavení. Tou hlavní je použití hodnot napětí, které vedlo k únavovému lomu při stejném počtu zatěžujících cyklů $N = \text{konst.}$ [5]

V případě tvrdého zatěžování věnujeme největší pozornost jednosměrné statické poměrné předdeformaci značenou ϵ_m , okolo které se uzavírá cyklická hysterezní smyčka. Bylo zjištěno, že u pozorování běžných materiálů při normálních teplotách je působení složky poměrné deformace ϵ_m v poměru s účinkem středního napětí extrémně malé, zvláště pro oblast vyšších životností, tedy pro většinu běžných strojních součástí. Často bývá pro zjednodušení její účinek zanedbáván. Naopak velikost středního statického napětí zanedbat nelze. [1], [5]

2.5. Smithův diagram



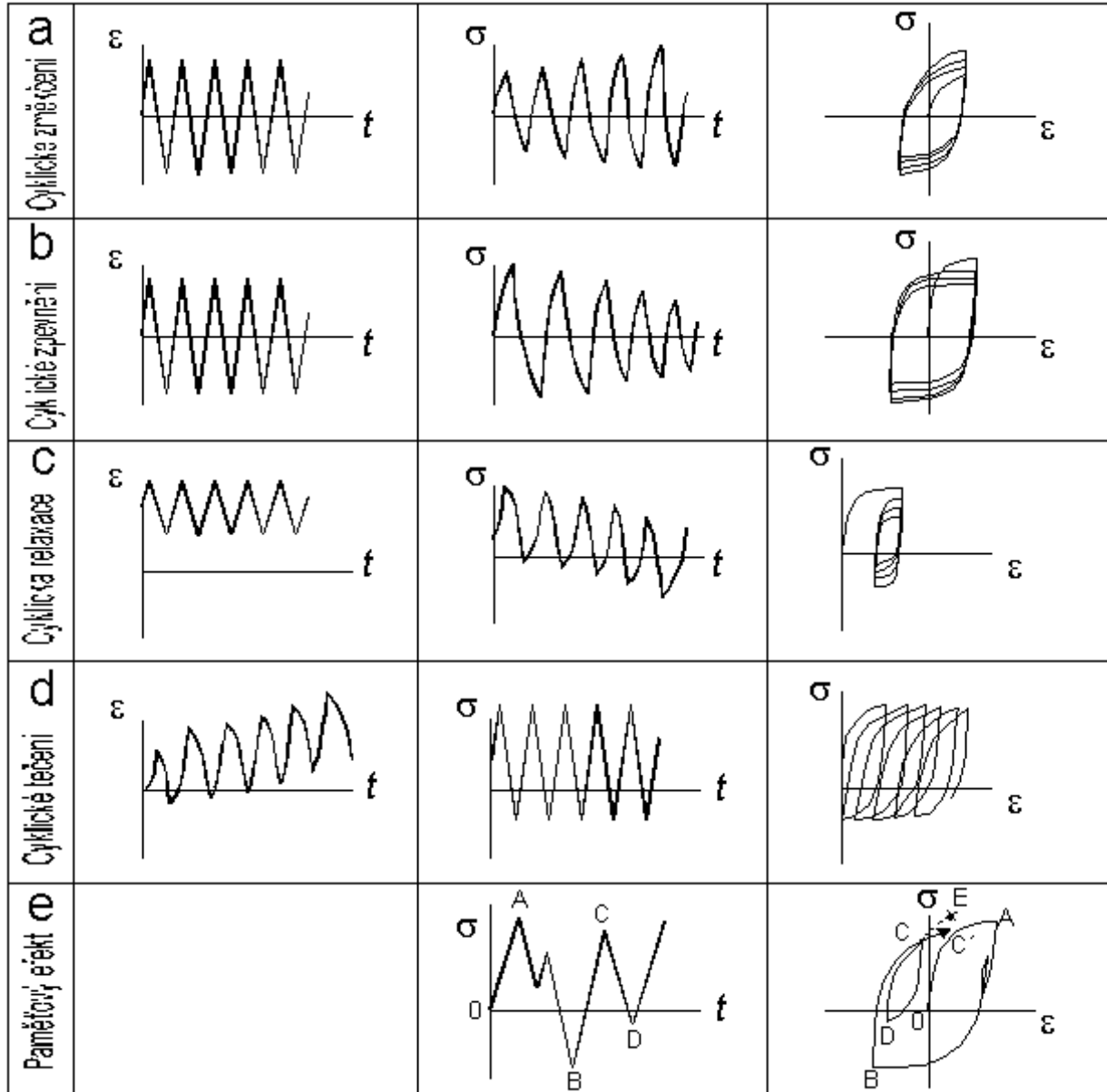
Obr. 7 - Smithův diagram [1] str. 208

Na vodorovnou úsečku zakresluje trvalá napětí σ_m , na svislou souřadnici výsledné celkové napětí σ_v , které lze spočítat součtem těchto dvou napětí. [5]

$$\sigma_v = \sigma_m + \sigma_a \quad (4)$$

2.6. Hysterézní smyčka

Zaznamenává průběh deformace v závislosti na zatěžujícím napětí.



Obr. 8 - Časové změny cyklické odezvy materiálu znázorněné v průběhu cyklických deformačních křivek [5]

1) Cyklické zpevnění nebo změkčování materiálu

Průběh způsobu řízení zatěžování při zkoušce mění tvar hysterézní smyčky. U značné části materiálů se po určitém počtu cyklů (řádově desítky) ustálí cyklické vlastnosti. To znamená, že při dalším navyšování počtu cyklů vzniká stále stejná hysterézní smyčka, kterou nazýváme saturovanou a lze ji použít jako reprezentativní pro popis cyklického chování. [5]

Cyklické zpevňování

Zpevnění můžeme vidět na obr. 8a. Cyklické zpevňování vykazují zejména žíhané materiály a materiály s poměrem meze pevnosti k mezi kluzu minimálně 1,4. [5]

$$\frac{R_m}{R_e} \geq 1,4 \quad (5)$$

Cyklické změkčování

Znázorněno na obr. 8b. Tomuto procesu obvykle podléhají materiály o vyšší pevnosti (např. oceli deformačně nebo precipitačně zpevněné s martenzitickou strukturou). Poměr meze pevnosti k mezi kluzu nepřesahuje 1,2. [5]

$$\frac{R_m}{R_e} < 1,2 \quad (6)$$

1. Cyklická relaxace

Zobrazena na obr. 8c. Vzniká u tvrdého nesymetrického zatěžování při středním napětí tahového charakteru ($\sigma_m > 0$), kdy příčinou střídavé plastické deformace je účinek σ_m potlačován a cyklus se postupně stává symetrický. Z toho důvodu je vliv středního napětí u nízkocyklové únavy méně důležitý než u vysokocyklové. [5]

2. Cyklické tečení

Na obr. 8d. Vzniká při měkkém zatěžování tahovou složkou středního napětí. Nejčastěji je snižována amplituda plastické deformace, což je vyrovnáváno nárůstem její střední složky. V závislosti velikosti předpětí a vlastností materiálu může vznikat saturovaná smyčka nebo dochází k nárůstu jednosměrné deformace až do vyčerpání tažnosti vzorku, což vede k jeho lomu. [5]

3. Paměťový efekt

Viz obr. 8e. Hlavní myšlenkou paměťového efektu je skutečnost, že okamžitý stav napětí a poměrné deformace v určeném místě vzorku je ovlivněn předchozím zatěžováním. Přestože značně komplikuje schopnost určení okamžitého stavu napětí a deformace zvláště při časově složitém průběhu zatížení, jeho zanedbání může velmi ovlivnit výsledky únavových zkoušek. [5]

2.7. Rozdělení zkoušek únavy:

Dle způsobu zatěžování:

- Tahem
- Krutem
- Ohybem
- Kombinací předchozích

[1]

druh zatížení	vysoké zatížení		nízké zatížení	
	hladký povrch	vrub	hladký povrch	vrub
tah				
jednoduchý ohyb				
aboustranný ohyb				
ohyb za rotace				
krut			průběh lomu jako při vysokém zatížení	

Obr. 9 - Schématický přehled základních typů únavových lomů a podmínek jejich vzniku [1] str. 205

Dle počtu cyklů:

Kvazistatické zatěžování / Opakované statické přetěžování

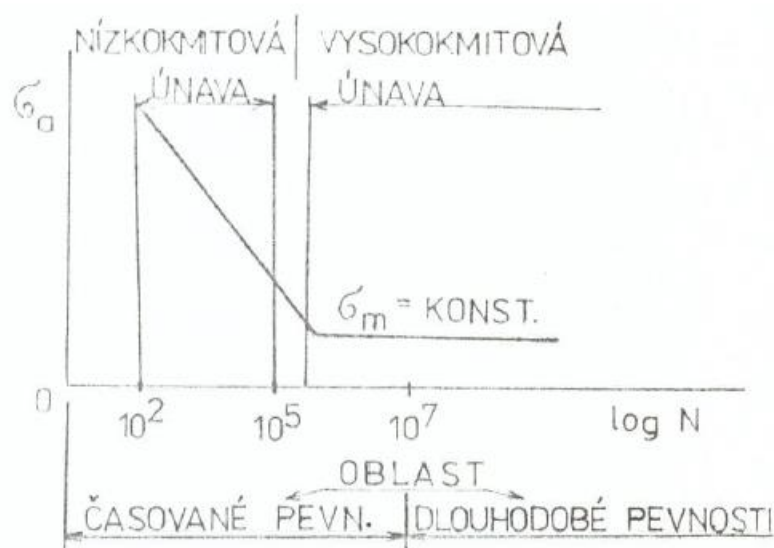
Jedná se o zatěžování do 10^2 cyklů. Používají se zatěžující síly, které vyvodí napětí blízké mezní pevnosti zkoušeného materiálu. [2]

Nízkocyklová / Nízkokmitová

Je namáhání probíhající obvykle pod 10^4 cyklu (v některých literaturách 10^5 cyklu). Provádí se při opakovaném namáhání nad mezí kluzu. Dochází zde opakovaně k výrazným plastickým makroskopickým deformacím. Rozhodujícím znakem pro životnost součásti je rychlost šíření únavové trhliny. [1] [2]

Vysokocyklová / Vysokokmitová

Jedná se o životnosti nad 10^7 cyklu. Převážně vzniká v oblasti elastických deformací. Celkovým napětím se pohybujeme vždy pod mezí kluzu. Pro životnost je zde, oproti nízkocyklové únavě, rozhodující úsek předcházející změnám mechanických vlastností. Čas šíření únavové trhliny je podstatně kratší než její nukleace. [1] [2]

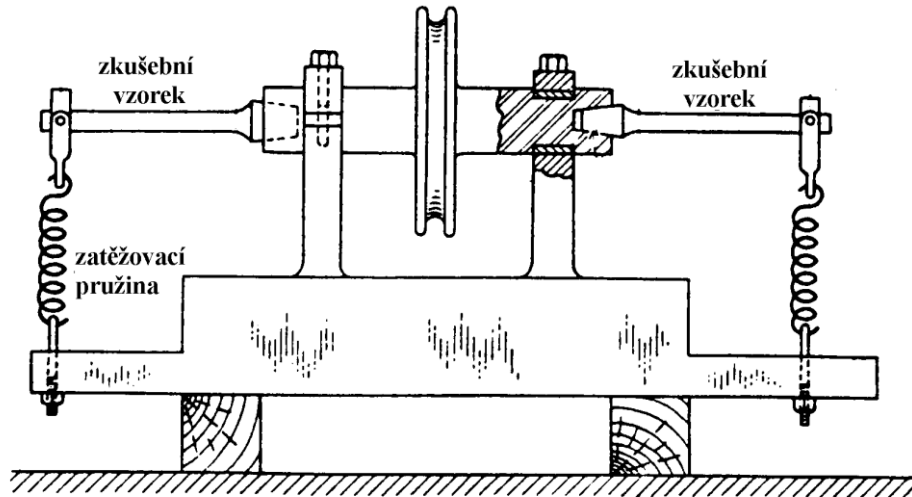


Obr. 10 - Rozdělení únavy podle počtu kmitů [2] str. 85

3. Zařízení pro zkoušení únavy materiálu

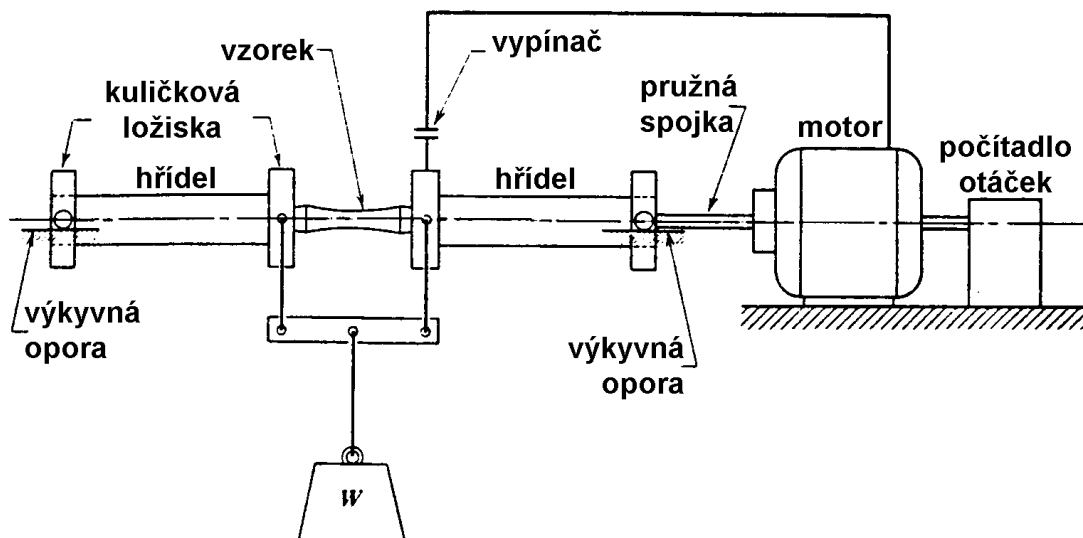
Zkušebních zařízení s postupem a vývojem nových technologií přibývá. Existují i univerzální stroje, na kterém lze provádět různé zkoušky únavy. Při výběru hraje nezanedbatelnou roli cena přístroje, která je u těchto strojů z mnoha důvodů vysoká a rozdílná u univerzálních a jednoúčelových přístrojů. [6]

Jedno ze starších zařízení používané pro únavové zkoušky, které používal Wöhler je schématicky znázorněné na obr. 11. Umožňuje vzorky namáhat na ohyb za rotace. Namáhání lze zvyšovat utahováním šroubů v rámu stroje nebo změnou pružin za tužší, ovšem vždy se bude jednat o zkoušku se středním napětí rovno nule. [6]



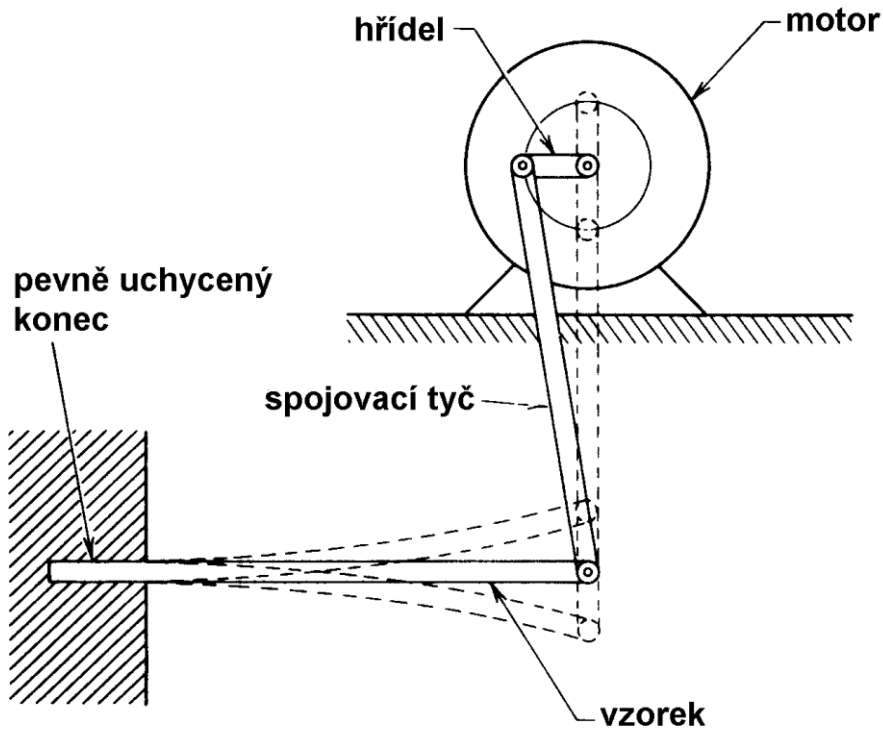
Obr. 11 - Únavový stroj pro ohyb za rotace [6]

Na obr. 12 je schématicky vyobrazen novější typ únavového zařízení, které lze dodnes vidět v provozu. Vyrovnává čtyřbodový ohyb za rotace. Opět je zde možné vyvodit pouze souměrné střídavé napětí. [6]



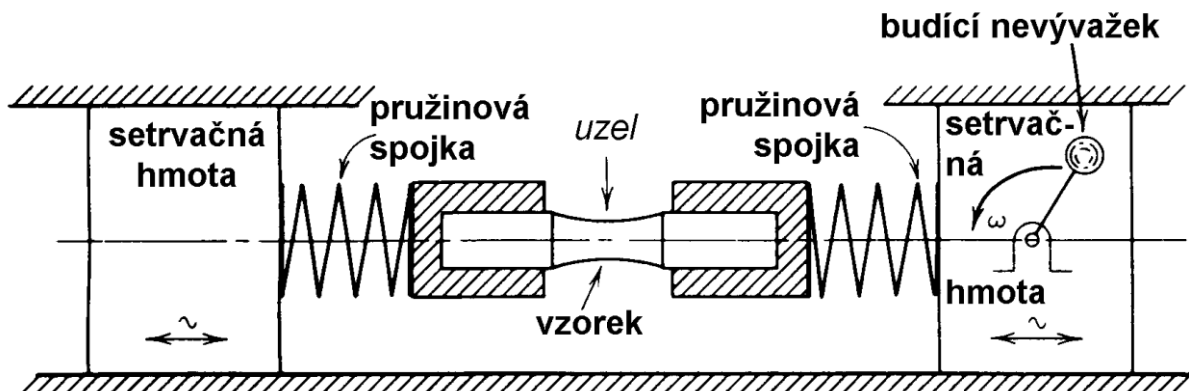
Obr. 12 - Únavový stroj pro ohyb za rotace čtyřbodový ohyb [6]

Pro vyvození nenulové hodnoty středního napětí u střídavého ohybu lze využít rotující páky. Schéma viditelné na obr. 13. Amplitudu i střední napětí je možné měnit pomocí délky hřídele a spojovací tyče.



Obr. 13 - Únavový stroj pro ohyb s využitím rotující páky [6]

Další možnost provedení únavové zkoušky je dána rezonančními pulsátory. Používají se pro vysokocyklovou únavu. Obr. 14 znázorňuje schématický náčrt pulsátoru s mechanickým buzením. Jednotlivé pulsy jsou vyvolány rotujícím nevyvážením s vhodnou rezonanční frekvencí. [6]



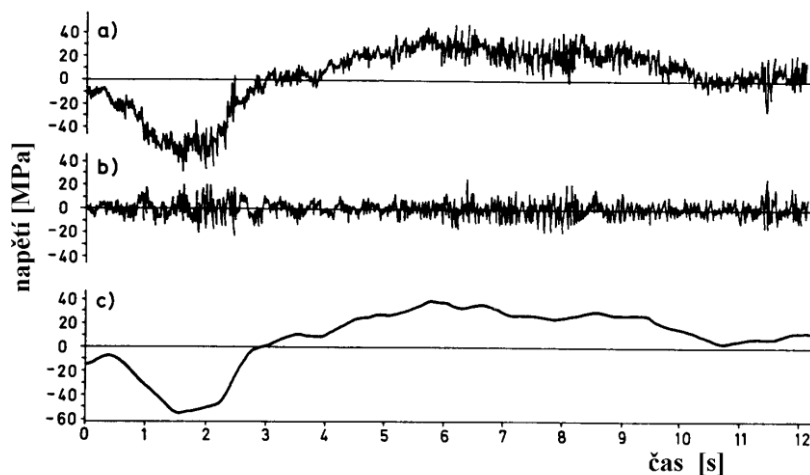
Obr. 14 - Mechanický rezonanční pulsátor [6]

V současnosti jsou vyráběny pulsátory umožňující nejen nastavení středního napětí, ale i jinému způsobu zatěžování než je tah-tlak popřípadě ohyb. Kromě mechanického vibračního buzení jsou stroje s elektromagnetickým buzením nebo dokonce piezoelektrické. [6]

3.1. Frekvenční srovnání

- Mechanické systémy ≈ 40 Hz
- Elektromagnetické systémy ≈ 100 Hz
- Piezoelektrické systémy – pro speciální vysokofrekvenční únavu (je nutné vzorky chladit, aby nedošlo k jejich přehřátí)

Vývojem jednoduchých mechanismů vznikly zdokonalené, které umožňují zkoušky v krutu, kombinaci ohybu a torze, biaxiální ohyb atd. Většina zkoušek probíhá s konstantní amplitudou napětí a s konstantní frekvencí cyklu. Postupný vývoj elektroniky ve zkušebních zařízeních umožňuje provádět zkoušky pozvolnou změnou amplitudy i středního napětí, pro přesnější napodobení namáhání v provozu. [6]



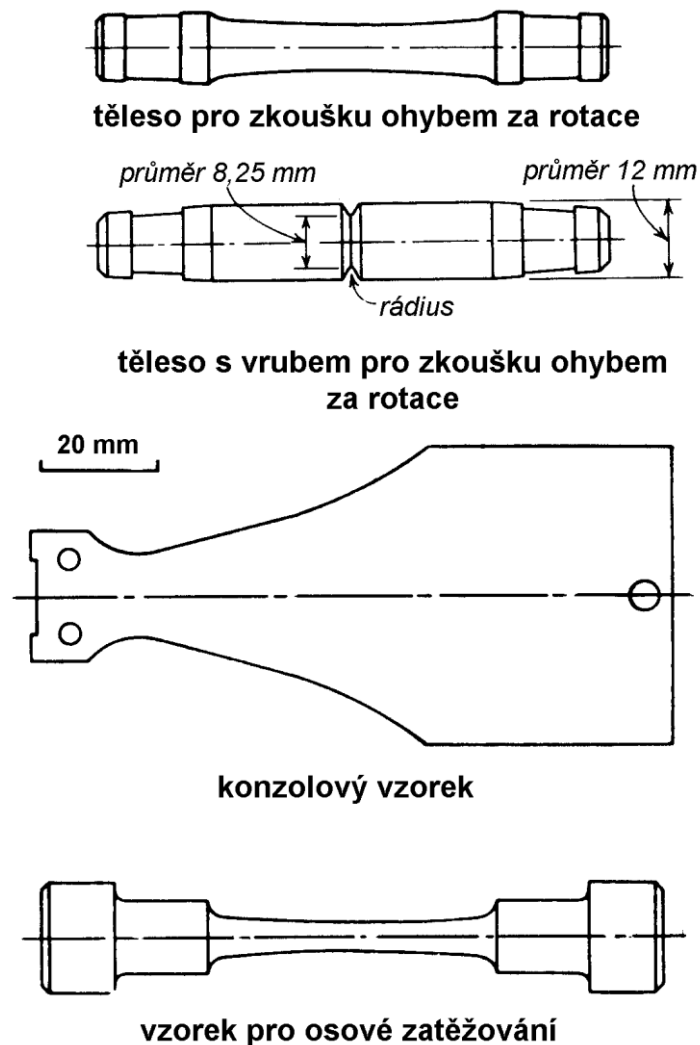
Obr. 15 - Záznam napětí působícího v čepu řízení motorového vozidla [6]

V současnosti je známo mnoho způsobů pro získání dat průběhu napětí zkoumané součásti v provozu. Na obr. 15a je takový záznam zakreslen do grafu. V záznamu na obr. 15b je z kompletního záznamu zaznamenán pouze průběh napětí vyvolaný nerovnostmi vozovky a záznam na obr. 15c představuje záznam napětí způsobený manévrováním pozorovaného vozidla. [6]

V neposlední řadě se pro únavové zkoušky využívají servohydraulické zkušební stroje se zpětnou vazbou. Nevýhodou těchto strojů je velmi vysoká pořizovací cena i následné provozní náklady. Nespornou výhodou elektronických zkušebních strojů se zpětnou vazbou je umožnění provádět zkoušky s řízenou silou, deformací i přemístěním. Řadí se mezi univerzální únavové stroje, na kterých lze provádět zkoušky nízkocyklové i vysokocyklové. Umožňují napodobení nepravidelných zatěžovacích cyklů získaných z provozu. Příklad na obr. 15. [6]

4. Zkušební tělesa

Zkušební vzorky mají různé tvary, jsou vytvářeny tak, aby co možná nejlépe vystihly daný problém. Některé z nich můžeme vidět na obr. 16. Je důležité, aby při vytváření dané zkoušky byly používány vzorky s určitou výrobní přesností pro možnost následného srovnávání průběhů zkoušek jednotlivých vzorků. [6]



Obr. 16 - Zkušební vzorky pro únavové zkoušky [6]

Důležitým prvkem zkušebních těles jsou upínací části, které musí být správně navrženy pro stroj, na kterém bude zkouška prováděna. V upínací části nesmí dojít k porušení vzorku. Zkouška by pak byla považována za nekorektní, dokonce by mohlo dojít k porušení upínacích čelistí stroje, které by znemožnilo pokračování zkoušky s novým vzorkem. [6]

Vzorky se mohou rozdělit na nevrubovaná a s vrubem. Nevrubovaná, také označovaná jako hladké, patří mezi nejjednodušší. Mnohdy mohou tvarem připomínat zkušební tělesa používané pro základní statickou zkoušku tahem. Tělesa s vrubem, který má úlohu koncentrátoru napětí, jsou využívány pro hodnocení senzibility materiálu na vruby při únavovém namáhání. K popisu

chování a porovnávání citlivosti vůči vrubům s jinými materiály se používá součinitel koncentrace napětí (k_f). [6]

Zkoušky únavy jsou prováděny nejen u zkušebních těles, ale i šroubové nebo svarové spoje. V některých případech, dle potřeby a přání zákazníka, jsou zkoušena i samotné součásti jednotlivých strojů nebo zařízení. [6]

5. Fyzikální vlastnosti povrchu

Předpokládáme homogenní materiál, který nebyl vystaven žádné povrchové úpravě, ani nebyla nanášena na povrch jiná vrstva materiálu. I přes to můžeme obecně říci, že se vlastnosti povrchu liší od zbytku objemu materiálu. Vysvětlením příčiny tohoto jevu je odlišné okolí povrchových atomů. U povrchových atomů je nižší zastoupení nejbližších sousedních atomů, které můžeme popsat koordinačním číslem. Přerušením atomárních vazeb při nukleaci povrchu a absencí poměrné části sousedních atomů lze ve výsledku chápat jako plošnou poruchu krystalové mřížky daného materiálu. Rozdíly vlastností jsou značně závislé na mnoha faktorech, například na krystalografickém uspořádání povrchových atomů. [7]

6. Měření tvrdosti

Tvrdost je označení jedné z mechanických vlastností materiálu. Rozumíme tím odolnost materiálu proti vzniku lokální deformaci. Zkoušky tvrdosti jsou v praxi technických oborů velmi oblíbené, z důvodu jednoduchého a rychlého provedení. I z toho důvodu v minulosti vzniklo mnoho metod pro určování nebo porovnávání jednotlivých tvrdostí různých materiálů. Poskytují nám hodnoty plastických i elastických vlastností měřených vzorků v měřených místech. Ve většině případů není nutné pro zkoušky tvrdosti zvlášť vyrábět vzorky, neboť je v řadě případů možné využít použité vzorky daného materiálu z jiných zkoušek nebo dokonce odměřit tvrdost přímo na součásti. Vše závisí na dané situaci a zvolené metodě měření. [2], [4]

Nevýhodou těchto zkoušek je absence fyzikálního významu naměřených hodnot, neboť jsou značně ovlivněny mnoha faktory, například geometrie indentoru, rychlost provádění zkoušky, materiál indentoru, teplota, tření mezi vnikacím tělesem a zkoušeným materiálem, deformační zpevnění, vibrace at' už zkoušecího stroje nebo způsobené vnějšími vlivy, ovlivnění lidským faktorem třeba nesprávným odečtením ze stupnice, špatné posouzení vtisku, nesprávné vybrání okrajů vtisku, použití jiného zatížení atd. [2], [4]

Rozdělení

U zkoušek tvrdosti provádíme dělení podle mnoha hledisek, lze ho provést dle samotného principu zkoušky na:

- Vrypové
- Vnikací
- Rázové
- Odrazové

Dle rychlosti zatěžující síly:

- Statické (patří sem zkoušky vrypové a vnikací)
- Dynamické (sem patří zkoušky plastické nárazové a elastické odrazové)

Dle účelu měření:

- Makrotvrdosti
- Mikrotvrdosti (metoda Vickers při zatížení do 4,9N)
- Nanotvrdosti

[2]

6.1. Vrypové zkoušky

Patří mezi statické zkoušky. Opírá se o princip Mohsovy stupnice tvrdosti minerálů, která je pro hodnocení kovů nepřiměřeně hrubá. [2]

Průběh zkoušky vypadá tak, že přejíždíme po vyhlazeném povrchu materiálu indentorem, čímž je diamantový kužel o vrcholovém úhlu 90° a poloměrem zaoblení špičky 0,2mm, který zatěžujeme proměnnou normálovou silou. Vytvoří se vryp s nekonstantní šířkou. Velikostí tvrdosti je tak velké zatížení jaké vytvoří vryp široký 0,01mm. U zkoušky může být také za konstantní brána zatěžující síla a hodnocena šířka vrypu. Vrypová zkouška se v současné praxi používá jen ojediněle. [2], [4]

Touto metodou lze také hodnotit kohezivní, v případě tenkých vrstev adhezivní chování dokonce i míru zpevnění povrchu zkoušeného materiálu. Tyto problematiky řešíme na zkušebních přístrojích vybavených piezoelektrickými snímači zaznamenávající akustickou emisi. Ta se projeví při tvorbě trhlin nebo odštípnutí povrchu materiálu na okraji vrypu. Což je projevem uvolňováním energie při vzniklém napětí. [4]

Při hodnocení naměřených hodnot je třeba vzít na vědomí veškeré vlivy, které danou zkoušku ovlivnili např.:

- rychlost zatěžování indentoru
- rychlost posuvu vzorku
- geometrii hrotu
- opotřebení indentoru
- prostředí

[4]

6.2. Vnikací zkoušky

Indentor již nepřejíždí po povrchu, pouze působí na námi určeném konstantním místě silou kolmou k povrchu proměřovaného materiálu.

Odolnost materiálu proti vnikání indentoru neboli tvrdost je závislá na meziatomárních silách, kterými jsou atomy k sobě vázány. Proto je možné, že kovy o stejném chemickém složení mohou mít jiné tvrdosti. [2]

Některé faktory ovlivňující tvrdost:

- Velikost zrna (Hranice zrna více odolávají rychlému vnikání cizích těles než střed zrna. Proto lze říci, že materiál s jemnější krystalickou strukturou vyniká vyšší tvrdostí než hrubozrnná forma ze stejného materiálu.)

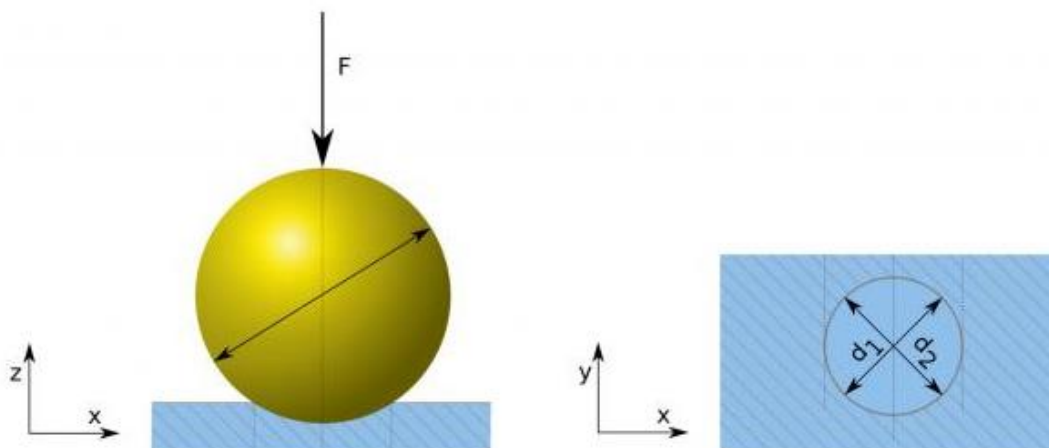
- Teplota (Je všeobecně dáno, že se zvyšováním teploty paralelně roste plasticita materiálu. Tento jev úzce souvisí s roztažností materiálu. Vlivem vzdalování sousedních atomů pevnost vazeb klesá, a proto snadněji podléhá plastické deformaci.)
- Vnitřní pnutí (Veškerá pnutí v materiálu snižuje plasticitu a zvyšuje tvrdost. Příčinou pnutí může být tváření za studena, nerovnoměrným chladnutím součásti a mnoho dalších.) [2]

Na povrch vzorku jsou kladeny mírně rozdílné nároky, dle prováděné metody. Základními požadavky povrchu jsou rovnost, hladkost bez okují nebo nátěrů. Při vytváření požadovaného povrchu však nesmí dojít k ovlivnění mechanických vlastností. Nežádoucí změny nejčastěji vznikají vlivem deformačního zpevnění nebo zahřátím součásti. Podstatnou roli hraje i tloušťka vzorku. Po provedení zkoušky nesmí dojít na protilehlé straně k deformacím. Tvrdost se určuje z velikosti vytvořeného vtisku, která reprezentuje velikost trvalé deformace, vzhledem k použité zatěžující síle a době působení indentoru. [2]

Tvrdost je spjata a závisí na mezi kluzu a vlohám daného materiálu k deformačnímu zpevnění. Díky tomu mezi vnikací a tahovou zkouškou existuje určitá analogie, dokonce byl vymyšlen i přibližný vztah mezi tvrdostí oceli a její pevností. Pro tuto analogii patří vnikací zkoušky k velmi rozšířeným. Nejčastěji používanými vnikacími zkouškami jsou metody dle Brinella, Rockwella a Vickerse. [2]

6.2.1. Tvrdost podle Brinella (HB)

Podstatou zkoušky je vtláčování ocelové kalené kuličky nebo kuličky z tvrdokovu, o průměrech 10; 5; 2,5; 2 a 1 mm do vyleštěného povrchu vzorku, kde po zkoušce zůstane vtisk o tvaru kulové úseče, u které měříme dva na sebe kolmé průměry viz. obr. 17. [14]



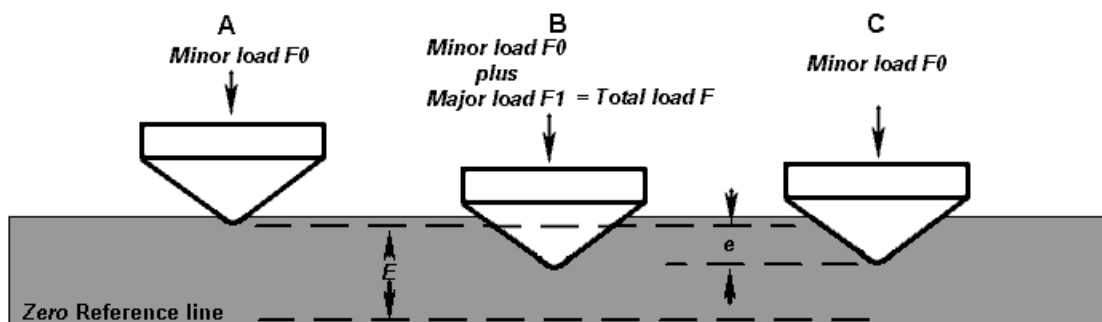
Obr. 17 - Indentor a vtisk Brinellovi vnikací zkoušky [10]

Měření se provádí tzv. Brinellovo lupou, která je vybavena měřicí stupnicí umožňující měřit na setiny milimetru. Při standardním měření tvrdosti (doba 10 až 15s, zatížení 300kp odpovídající 2941, 995 N a kuličkou o průměru 10 mm) značíme označením HB (například 135 HB). Při

jiných podmínkách zkoušky se zapisují hodnoty v pořadí průměr/síla/čas (například 90 HB 2,5/500/35). Tato zkouška je vhodná pro heterogenní a měkké materiály. [14]

6.2.2. Tvrdost podle Rockwella (HR)

Tato zkouška se provádí pomocí indentoru ve tvaru kužele s vrcholovým úhlem 120° z diamantu. Tato zkouška je navržena pro kontrolní zkoušky kalených, zušlechťovaných a jinak tepelně zpracovaných materiálů. Výhodou této metody je přímé odečtení z přístroje, neboť se zkoumá rozdíl mezi první a třetí fází zkoušky viz. obr. 18. [14]

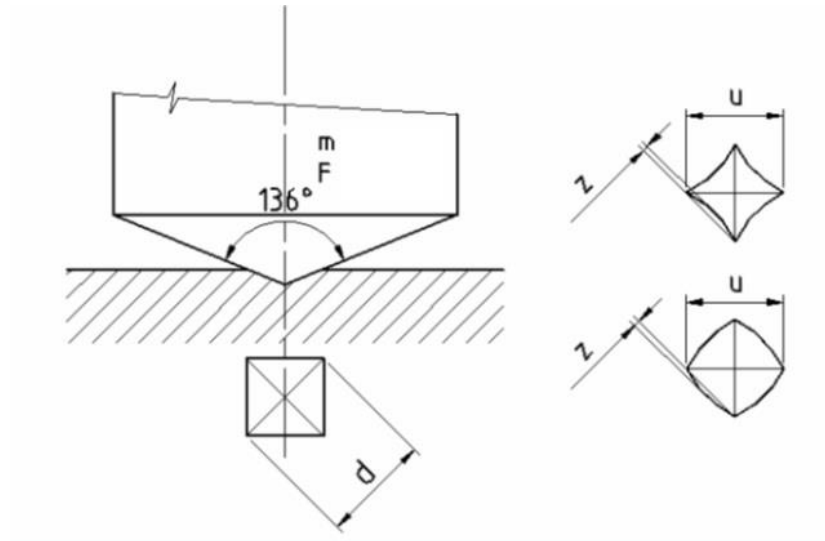


Obr. 18 - Průběh měření podle Rockwella [11]

Mezi nejznámějšími zkouškami tvrdosti podle Rockwella patří typ A (HRA), které se používá pro cementované karbidy a tvrzené oceli s malou kalenou vrstvou, dále typ B (HRB), kde se používá kuličky o průměru $1/16''$, používané pro měkké oceli, měděné a hliníkové slitiny. Posledním nejznámějším typem je typ C (HRC) se používá u materiálů tvrdších než 100 HRB, jako jsou například tvrdé litiny a vysoce kalené oceli. [14]

6.2.3. Tvrdost podle Vickerse (HV)

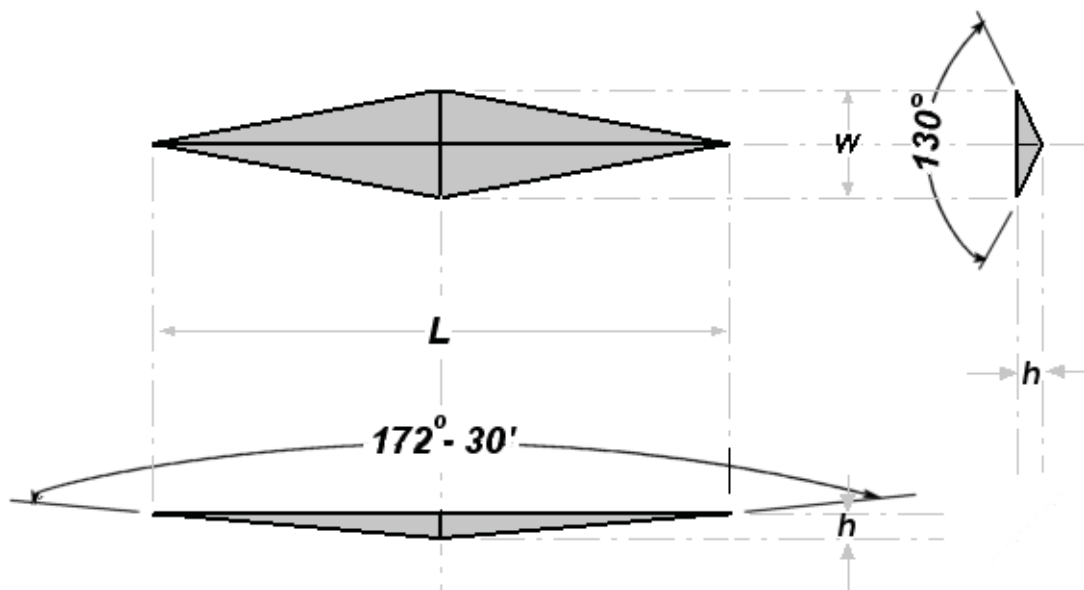
Indentor používaný při této zkoušce má tvar čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° . Ve vzniklém vtisku měříme délku na sebe kolmých hran viz. obr. 19. Dále, jak je vidět na obrázku, jsou vzniklé vtisky vyduté v případě měkkých materiálů a vypuklé v případě zpevněných materiálů. Tato metoda se nejčastěji využívá v laboratořích, nejčastěji v kombinaci se speciálním přístrojem obsahující hlavici s indentorem na revolverové hlavě s čočkami (měření mikrotvrdosti). [14]



Obr. 19 - Indentor a vzniklé vtisky po zkoušce dle Vickerse [16]

6.2.4. Knoopova zkouška

Tato zkouška je dosti podobná zkoušce podle Vickerse, materiálem indentoru je diamant. Rozdílem při této zkoušce je tvar indentoru, jde o čtyřboký jehlan, který ovšem nemá čtvercovou podstavu, ale tvar kosočtverce s úhlopříčkami, které mají poměr 7:1, dále má rozdílné vrcholové úhly (vrcholový úhel delší úhlopříčky je $172,5^\circ$, kratší úhlopříčky 130°). Díky tomuto tvaru můžeme měřit tvrdost úzkých a dlouhých profilů (například drátů) nebo také deformovaná zrna vzniklá například při válcování či tažení materiálu. Tvar indentoru Knoopova zkoušky zobrazuje obr. 20. [14]



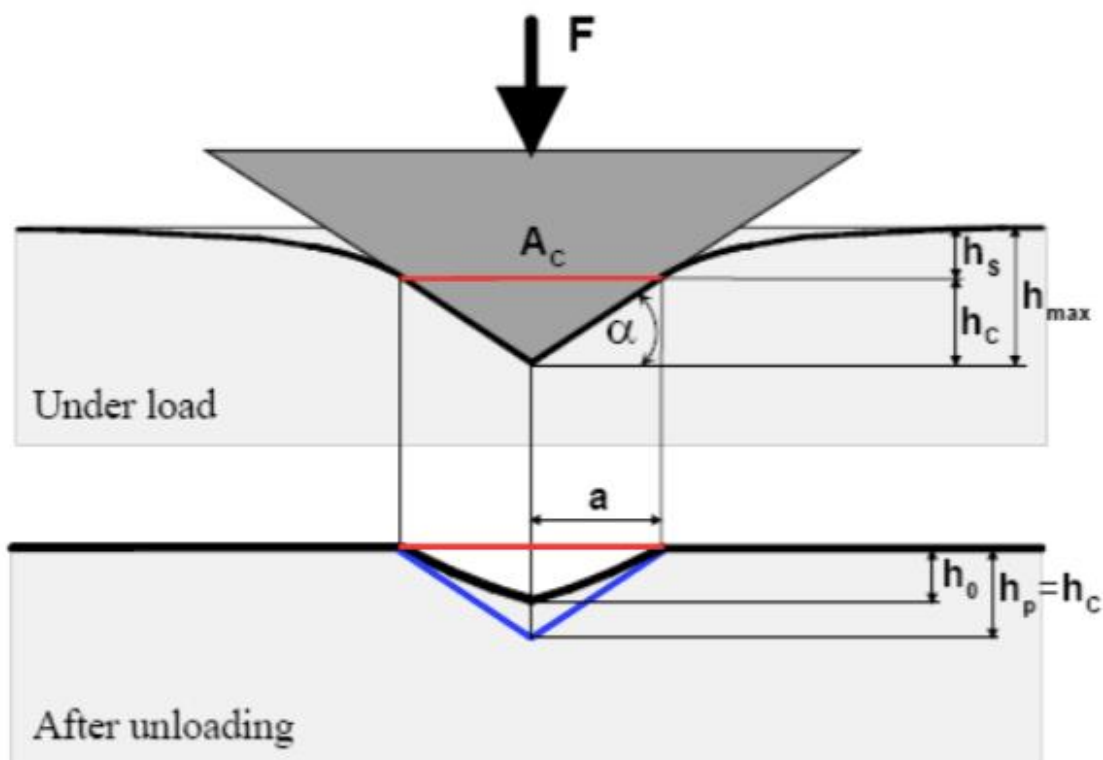
Obr. 20 - tvar Knoopova indentoru [12]

6.2.5. Měření mikrotvrlosti

Jak již bylo výše uvedeno, při měření se používá speciálního zařízení podobné mikroskopu, který má navíc v revolverové hlavě zařízení pro měření mikrotvrlosti. Používá se čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° nebo se používá Knoopův indentor, rozdíl je v působící síle, která je rovna 10 N nebo menší. Tato metoda se používá pro měření tvrdosti jednotlivých zrn nebo povrchových vrstev. [14]

6.2.6. Nanoindentace

Měření nanotvrlosti je odvozena od měření mikrotvrlosti, kdy vtlačujeme indentor do materiálu určitou silou (při mikrotvrlosti jsou rozmezí sil 1-10 Newtonů). Při nanotvrlosti je síla použitá při vtlačování indentoru v rozmezí 0,1 mN do 1961 mN. Použitý indentor je tříboký jehlan s vrcholovým úhlem 115° , vyroben z diamantu (kvůli vysokému modulu pružnosti). Při měření nanoindentace dochází u vzorku k elastické a plastické deformaci zároveň (viz. obr. 21). Proto budeme tzv. dynamickou tvrdost. Při měření dynamické tvrdosti použijeme jednoduchý a cyklický mód měření. [17]



Obr. 21 - Profil vtisku při a po zatížení [18]

Dynamická tvrdost

Dynamická tvrdost se nepočítá z měřených úhlopříček, jako tomu je při měření mikrotvrdosti s použitím indentoru od Vickerse či Knoop, neboť u těchto metod je menší procentuální zastoupení elastické deformace menší než u měření nanotvrdosti. Dynamická tvrdost se vypočítává z hloubky vpichu pomocí vzorce, kde je definována vztahem:

$$DH = \alpha * \frac{P}{D^2}$$

Kde: DH = dynamická tvrdost

α = konstanta závislá na použitém tvaru indentoru

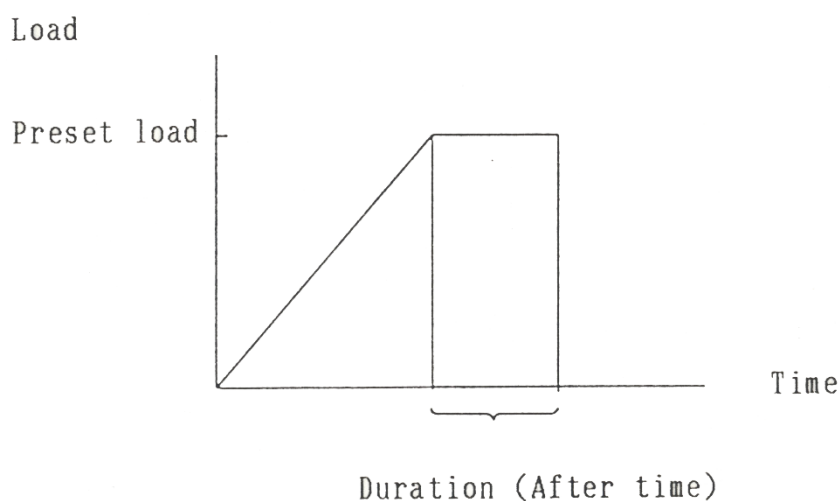
P = síla na indentor (mN)

D = hloubka vtisku indentoru

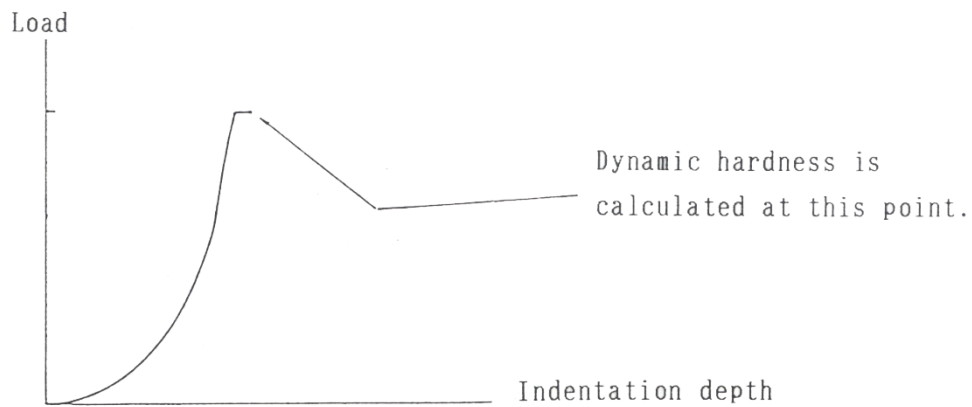
Výsledná dynamická tvrdost vypočtena z tohoto vztahu nám dává pevnostní charakteristiky zkoušeného materiálu, jak plastickou složku, tak i elastickou složku deformace zkoušeného materiálu.[17]

Měření modem 1

Jedná se o „standardní“ měření, kdy na vzorek působíme konstantní silou po danou dobu v rozmezí 1-999 vteřin. Odečtení dynamické tvrdosti provádíme po dané době, kdy je indentor vtisknutý ve vzorku do určité hloubky (viz obr. 22 a 23). [17]



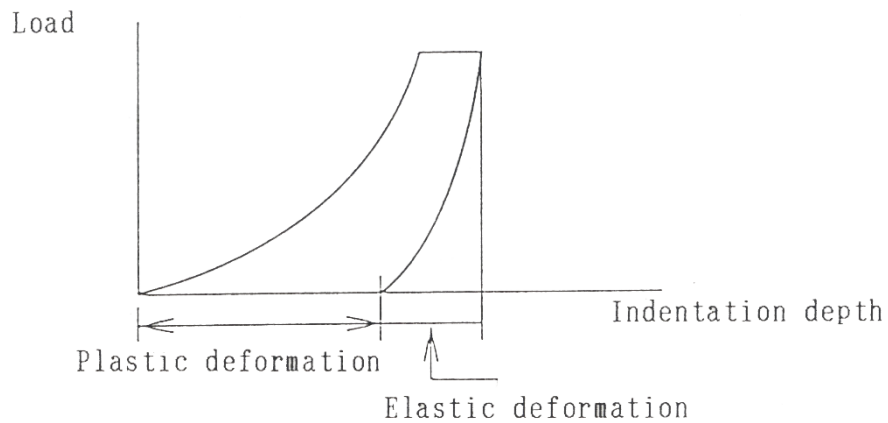
Obr. 22 - Diagram závislosti síly na čase modu 1 [17]



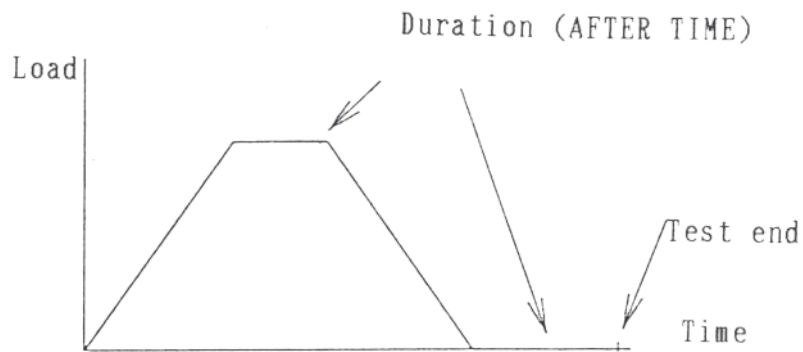
Obr. 23 - Diagram závislosti síly na hloubce vtisku modu 1 [17]

Měření modem 2

Při tomto modu se zaznamenává indentační křivka v závislosti hloubky proniknutí indentoru na velikosti normálového zatížení v celém průběhu při zatěžování, v časové prodlevě při maximálním zatížení a v průběhu odlehčování. [17], [19]



Obr. 24 - Diagram závislosti síly na čase modu 2 [17]



Obr. 25 - Diagram závislosti síly na hloubce indentoru modu 2 [17]

Měření cyklickým modem 2

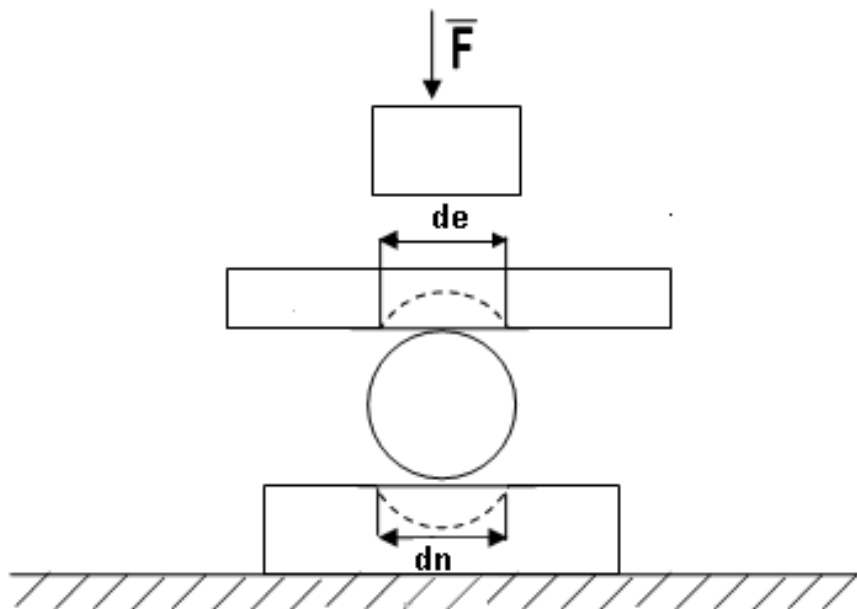
Tento mod zaznamenává indentační křivku v celém průběhu při zatěžování, v časové prodlevě při maximálním i minimálním zatížení a při odlehčování závislosti hloubky proniknutí indentoru na velikosti normálového zatížení. Je zaznamenávána indentační křivka s postupným cyklickým zatěžováním (20 cyklů) s postupným nárůstem maximální normálové síly v každém cyklu až do dosažení maximální zvolené normálové síly. [17], [19]

6.3. Rázové zkoušky

Jedná se o dynamické zkoušky, po kterých zůstane vtisk po indentoru.

6.3.1. Poldi kladívko

Poldi kladívko je mobilní zařízení měřící tvrdost používané často v provozech. Kladívko je vybaveno etalonem (čtvercová tyč) o stanovené tvrdosti. Principem této metody je porovnávání průměrů vtisků v materiálu a etalonu, které vznikly působením rázového zatížení (uhodnutí kladivem do úderníku). Po změření na sebe kolmých úhlopříček a vypočtení jejich aritmetických hodnot se hodnoty porovnají v tabulkách, čímž dostaneme výslednou tvrdost. Jako indentor je použita ocelová kalená kulička o průměru 10 mm. [14]



Obr. 26 - Schématické znázornění Poldi kladívka [13]

6.3.2. Baumannovo kladívko

Obdobně jako Poldi kladívko, i zde se jedná o mobilní zařízení používané v provozech. „Odjištěním a spuštěním pružiny, která je součástí kladívka, dojde k úderu razníku na vnikací tělíčko ve tvaru kuličky a k jeho vtlačení do povrchu zkušebního tělesa.“[14] Po provedení zkoušky se změří na sebe kolmé úhlopříčky vzniklého vtisku a z jejich aritmetických hodnot se určí pomocí tabulek tvrdost materiálu. [14]



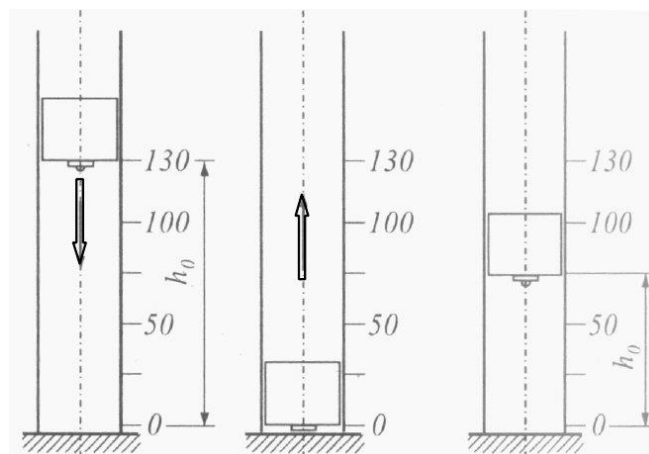
Obr. 27 - Baumannovo kladívko [14]

6.4. Odrázové zkoušky

Jedná se o dynamické zkoušky, po kterých nezůstane vtisk po indentoru. Těmito zkouškami zjišťujeme elastické vlastnosti povrchu materiálu.

6.4.1. Shoreho skleroskop

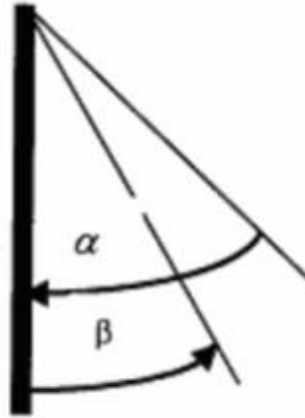
Principem této zkoušky je spuštění zkušebního tělíška z určité výšky na testovaný vzorek, poté zkoumáme výšku, do které se zkušební tělíčko odrazí. Zkušební tělíčko je vedeno ve skleněné trubici, aby nemohla nastat situace odskočení do stran. [14]



Obr. 28 - Schéma měření pomocí Shoreho skleroskopu[15]

6.4.2. Shoreho duroskop

Tato metoda spočívá v puštění zkušební tělíska z určitého úhlu na stěnu zkoušeného materiálu, přičemž sledujeme odrazový úhel, do něhož se zkušební tělíska odrazí. [14]



Obr. 29 - Schéma činnosti Duroskopu [16]

7. Měřicí přístroje

Experimentální část této bakalářské práce byla prováděna uvedených měřících přístrojích:

- Nanoindentor Shimadzu DUH 202
- Scratch tester (přístroj scratch tester CSEM REVETEST)
- Únavový stroj INSTRON 8502

7.1. Nanoindentor Shimadzu DUH 202

Experiment je prováděn na přístroji Shimadzu DUH 202. Shimadzu DUH 202 je nanoindentor, který se skládá ze tří hlavních částí. Měřicí jednotka, počítač a v neposlední řadě řídicí jednotka. Další důležitá součást nanoindentoru je světelná mikroskopie se dvěma objektivy sloužící k přesnějšímu nastavení místa v tisku a také pro možnost odečtení velikosti v tisku potřebné k výpočtu při klasické mikrotvrdosti. [20]



Obr. 30 - Nanoindentor Shimadzu DUH 202

Parametry přístroje:

- Velikost zatížení indentoru: 0,01g- 200g (přesnost 0,02g)
- Rychlost zatěžování a odlehčování indenoturu: 0,00145 – 7,2g/s
- Velikost časové prodlevy: 1 – 999s
- Velikost hloubky proniknutí indentoru (u módu 5): 0 – 10 μm
- Množství cyklů měření (u módu 4): 1 - 250
- Přesné nastavení místa měření s přesností až 1 μm

[11]

Příklady využití přístroje:

Měření nanotvrdosti tenkých vrstev na základě naměřených indentačních křivek.

Standardní hodnocení mikrotvrdosti na základě proměření provedených vtisků po indentaci.

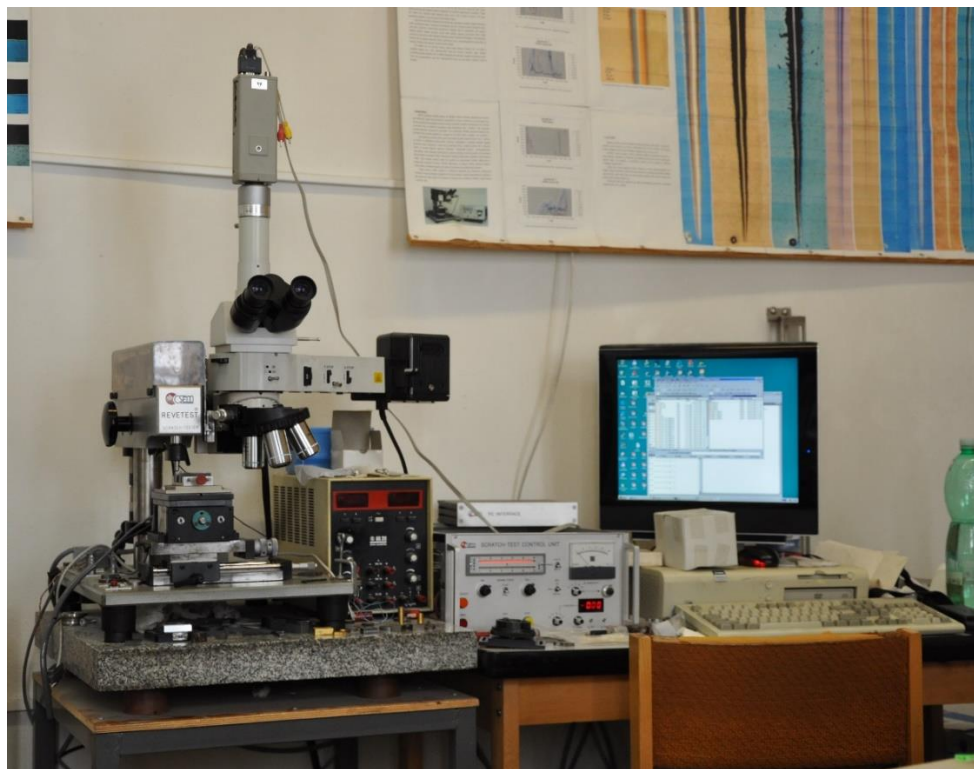
Měření lze provádět s nastavením různých parametrů jako je velikost maximálního a minimálního zatížení, délka časové prodlevy při maximálním zatížení, rychlosti zatěžování, počty cyklů u cyklických modů.

Měření jsou vhodná pro hodnocení tenkých vrstev bez ovlivnění vlastnostmi základního materiálu, pro hodnocení v malých oblastech, různých strukturních složkách, pro realizaci profilových měření tvrdosti, poměru elastické a plastické deformace jak v ploše tak do hloubky.

S využitím cyklických modů lze sledovat postupné probíhající změny vyvolané např. zpevněním povrchu vlivem opakované indentace, změny do hloubky při pronikání indentoru do větší hloubky při jednoduché i cyklické indentaci. [19], [20]

7.2. Scratch tester (přístroj scratch tester CSEM REVETEST)

Scratch tester slouží k realizaci vrypové indentace a statické indentace při různých velikostech maximální normálové síly. Vrypová indentace může být realizována za použití proměnné normálové síly rostoucí konstantní rychlostí s konstantní rychlostí se pohybujícím vzorkem pod indentorem nebo za použití konstantní normálové síly pro zjišťování zejména homogenity ve vlastnostech přes oblast vzorku. Pro vrypovou indentaci mohou být využity různé indentory Rockwellova typu s rozdílným zaoblením špičky indentoru a s rozdílnými materiálovými charakteristikami případně za použití kuličky opět s různými geometrickými a materiálovými charakteristikami. Statická indentace kromě indentorů Rockwellova typu a kuličky může využívat též diamantový jehlan pro hodnocení křehko lomových vlastností povrchových vrstev materiálů. Hodnocení je realizováno na základě studia morfologie porušení vrypovou nebo statickou indentací s různými mikroskopickými pozorovacími módy – tmavé pole, světlé pole, polarizace, Nomarského diferenciální kontrast. Dále při měření může být snímán signál akustické emise od držáčku indentoru a tečná síla ze speciálního držáku vzorků. [10], [19]



Obr. 31 - Scratch tester CSEM REVETEST

Parametry přístroje:

- Nastavení velikosti normálové síly 0 – 200 N
- Nastavení rychlosti nárůstu normálové síly
- Nastavení rychlosti pohybu stolku
- Nastavení konstantní či progresivní síly
- Nastavení citlivosti snímání akustické emise
- Možnost použití různých indentorů z materiálového i geometrického hlediska
- Snímání signálů tečné síly, normálové síly, koeficientu tření, rychlosti růstu síly, rychlosti pohybu stolku (posuv) a signálu akustické emise

[20]

Příklady využití přístroje

- Hodnocení adheze tenkých vrstev klasickým způsobem hodnocením kritické normálové síly z obrazových informací porušení uvnitř a na okraji vrypů, z kritických hodnot akustické emise a kritických hodnot koeficientu tření
- Hodnocení adhezivně – kohezivního chování systémů tenká vrstva – substrát z morfologie porušení mikroskopickými metodami a za paralelního zaznamenávání hodnot normálové a tečné síly, hodnot akustické emise a koeficientu tření do počítače při vrypové zkoušce za konstantní nebo progresivní zatěžující síle s konstantní rychlostí nárůstu normálové síly a s konstantní rychlostí se pohybujícím stolcem se vzorkem pod indentorem.
- Hodnocení koheze tenkých vrstev z morfologie porušení mikroskopickými metodami za paralelního zaznamenávání hodnot normálové a tečné síly, hodnot akustické emise a koeficientu tření do počítače při vrypové zkoušce za konstantní nebo progresivní zatěžující síle z konstantní rychlostí nárůstu normálové síly a s konstantní rychlostí se pohybujícím stolcem se vzorkem pod indentorem.
- Hodnocení koheze povrchu materiálu z morfologie porušení mikroskopickými metodami za paralelního zaznamenávání hodnot normálové a tečné síly, hodnot akustické emise a koeficientu tření do počítače při vrypové zkoušce za konstantní nebo progresivní zatěžující síle s konstantní rychlostí nárůstu normálové síly a s konstantní rychlostí se pohybujícím stolcem se vzorkem pod indentorem..
- Posuzování odolnosti materiálu proti tření materiálově i geometricky rozdílných indentorů z morfologie porušení pozorované různými mody mikroskopických metod za paralelního zaznamenávání hodnot normálové a tečné síly, hodnot akustické emise a koeficientu tření do počítače při vrypové zkoušce za konstantní nebo progresivní zatěžující síly z konstantní rychlostí nárůstu normálové síly a s konstantní rychlostí se pohybujícím stolcem se vzorkem pod indentorem..
- Posuzování deformační a křehkolomové odolnosti povrchu nebo systémů tenkých vrstev materiálu statickou i vrypovou indentací s využitím různých druhů vnikacích tělísek.
- Dokumentování deformačních stop a vznikajících porušení po vrypové či statické vnikací zkoušce světelným metalografickým mikroskopem NIKON Eclipse ve světelném

poli s polarizací a s Nomarského DIC a v tmavém poli s maximálně možným zvětšením 1000x do počítače s využitím systému obrazové analýzy.

- Posuzování velikosti opotřebení systémů tenká vrstva – substrát za působení cyklicky opakovaných přejezdů hrotem po povrchu při konstantní zatěžující síle s průběžným dokumentováním porušení v okolí a uvnitř vrypů světelnou mikroskopií.
- Posuzování velikosti opotřebení systémů tenká vrstva – substrát za působení cyklicky opakovaných přejezdů hrotem po povrchu při progresivní zatěžující síle s průběžným dokumentováním porušení v okolí a uvnitř vrypů světelnou mikroskopií.
- Pro realističtější napodobení podmínek experimentu lze využít ocelovou kalenou kuličku nebo jiný druh indentoru, ať už z materiálového či geometrického hlediska, u obou výše uvedených možností.
- Určení opotřebení diamantových hrotů ve světelném i tmavém poli. [20]

7.3. Únavový stroj INSTRON 8502

Jedná se o zařízení umožňující statické i dynamické zatěžování cyklického charakteru s možností zatěžování jak pravidelnými cykly tak s možností generace náhodného stochastického zatěžování namáháním tah, tlak a kombinace tah – tlak v oblasti kvazistatického zatěžování, nízko i vysokocyklového zatěžování.

Experiment je prováděn na stroji INSTRON 8502. Umožňuje nastavitelné tahové a/nebo tlakové statické nebo cyklické zatěžování. Lze nastavovat různé frekvence zatěžování s různými průběhy zatěžování přes pravidelné až po stochastické náhodné zatěžování. Přístroj je vybaven hydraulickými vyměnitelnými upínacími čelistmi. Pro experiment jsou využity ploché čelisti, které jsou ideální pro uchycení použitých plochých vzorků pro tento experiment. [19]



Obr. 32 - Únavový stroj INSTRON 8502

Parametry přístroje:

- Statické zatížení: max 250 kN
- Dynamické zatížení: max 200 kN
- Maximální vzdálenost deformace: 100 mm
- Maximální frekvence: 100 Hz

Příklady využití přístroje:

- Provedení vysokocyklových, nízkocyklových a kvazistatických zkoušek kovových nebo plastových vzorků pro následné určení únavových křivek.
- Provedení vysokocyklových, nízkocyklových a kvazistatických zkoušek s předpětím.
- Provedení únavových zkoušek s konstantní maximální deformací nebo konstantní maximální silou.
- Provedení klasické tahové zkoušky. [20]

8. Zkušební vzorek pro experiment

-konstrukční ocel 11523.1

Chemické složení

Jakost	C	Si	Mn	P	S	N
11 523	0,2	0,55	1,6	0,04	0,04	0,009



Obr. 33 - Zkušební vzorek - shora



Obr. 34 - Zkušební vzorek - z boku

Charakteristika:

Jde o jemnozrnnou nelegovanou konstrukční ocel. Z důvodu většího procentuálního zastoupení manganu má vyšší mez kluzu než oceli bez legur. Deklaruje zaručenou svařitelnost. Minimální mez kluzu (Re) dosahuje hodnoty 330 MPa, minimální tažnosti (A_{10}) 22% a mezí pevnosti (Rm) 510-680 MPa.

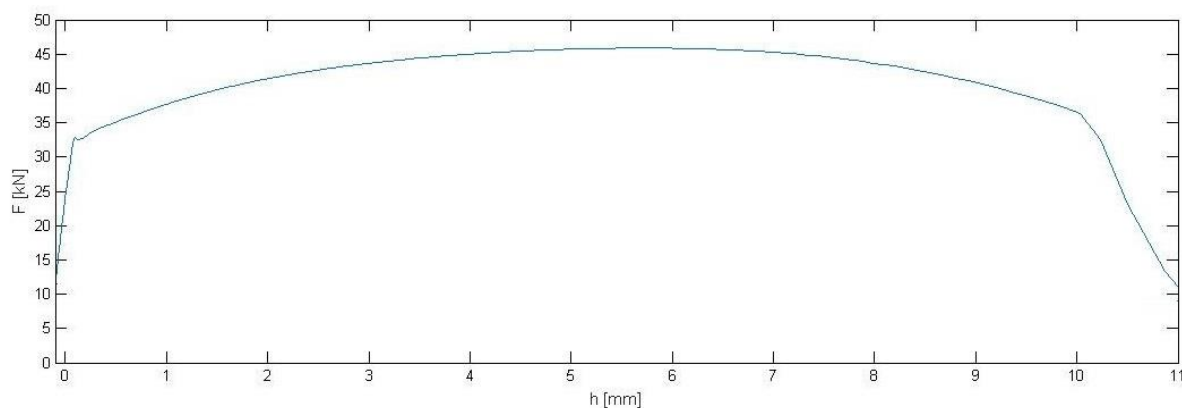
Používá se na ohýbané profily, svařované trubkové konstrukce a součásti strojů, automobilů, motocyklů, jízdních kol, tepelných zřízení tlakových nádob atd. [21], [22]

9. Experiment

Nejprve byly provedeny dvě tahové zkoušky s rozdílnou rychlostí zatěžování. Současně byl proměřen na jiné tyči počáteční nezatížený stav. Z vytvořeného tahového diagramu byly zvoleny prvotní podmínky zatěžování vzhledem k tomu, že maximální síla F_m byla 42 kN.

[19]

Graf 1 - Pracovní tahový diagram



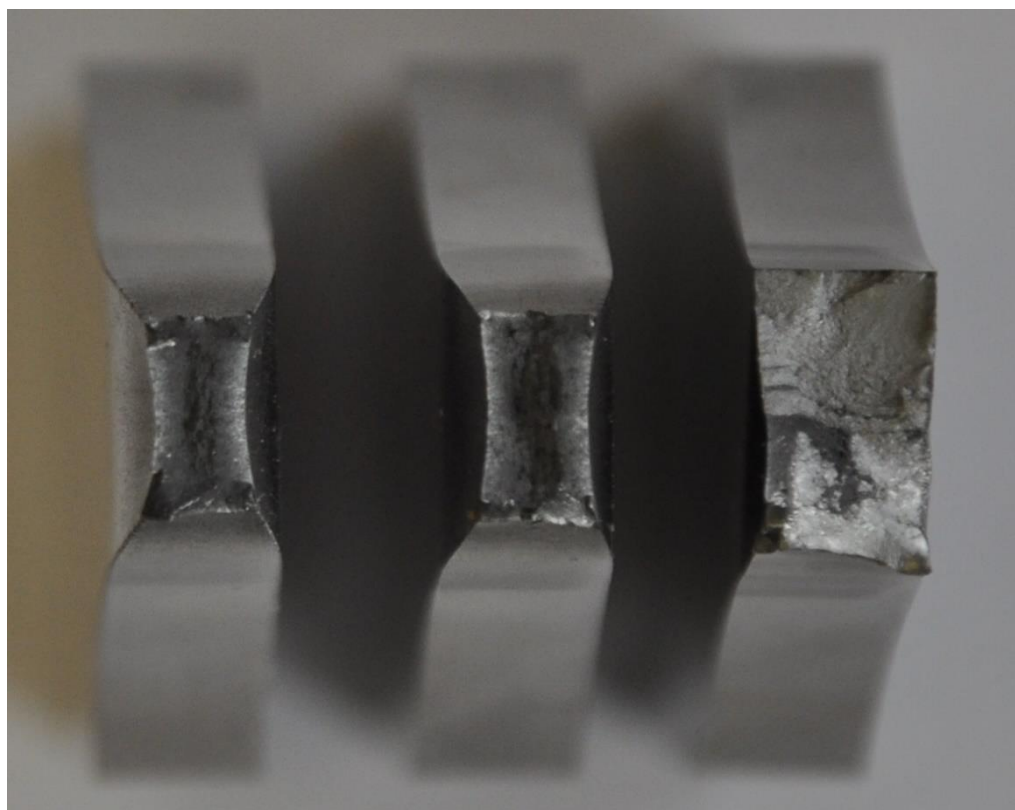
Únavové namáhání experimentu probíhá bez předpětí. Což znamená, že amplituda napětí je shodná v tahové i tlakové části. Proběhnuté změny ve vlastnostech na povrchu vzorků jsou proměřovány po 2 500 cyklech. Frekvence cyklů byla zvolena 1 Hz. [19]

Byla zvolena amplituda zatížení na 30 kN. Po prvním nakmitání 2 500 cyklů proběhlo proměření na nanoindentoru za různých podmínek měření jak z pohledu maximální normálové síly, tak z pohledu různých modů a to jednoduchého modu 2 a cyklického modu 7. Po zdokumentování vlastností nanoindentací byl vzorek upnut na druhé cyklování. Vzorek nakmital pouze 207 cyklů, jelikož nevydržel namáhání a přetrhl se. Viz obrázek 7

Při dalším cyklování bylo zvoleno zatížení s amplitudou 20 kN. Při tomto zatěžování byly provedeny celkem 4 experimenty po 2 500 cyklech. Po každém nacyklování 2500 cykly proběhlo detailní proměření pomocí nanoindentace opět s použitím různých modů a různých maximálních normálových sil. [19]

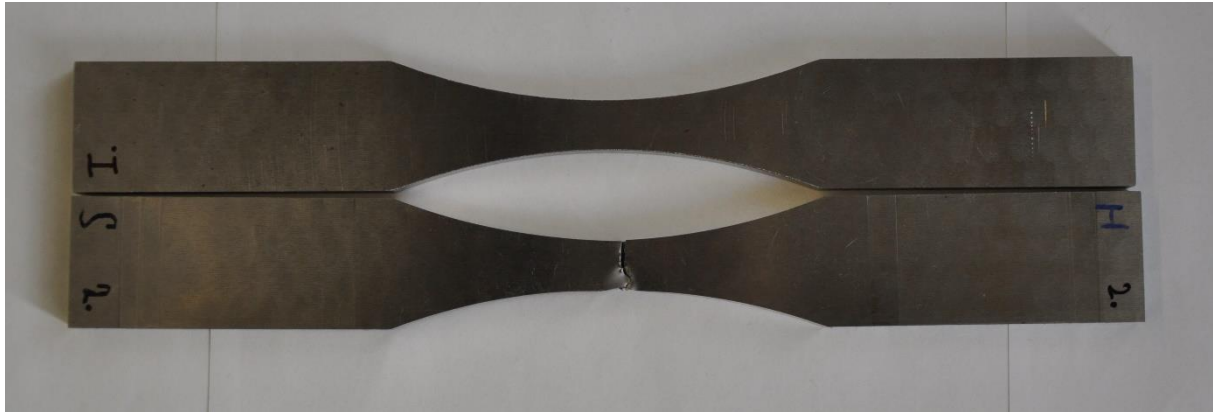


Obr. 35 - Lom vzorku po nakmitaných 2707 cyklech

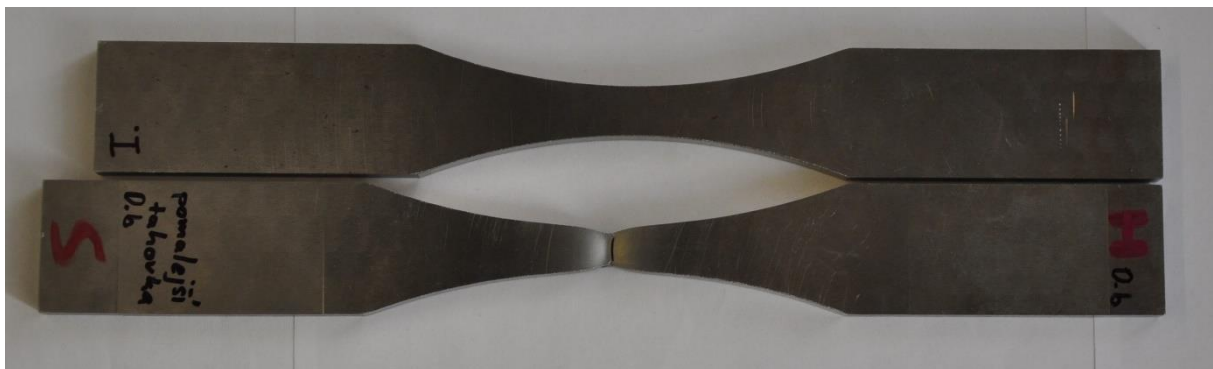


Obr. 36 - Srovnání lomů

Na obr. 36 jsou vidět 3 lomy. Zleva vzorek pomalé tahové zkoušky, rychlé tahové zkoušky a vzorek zatěžovaný únavou s amplitudou zatěžující síly 30 kN po nakmitání 2707 cyklů. Na první pohled jsou vidět rozdíly v průřezu lomové plochy i v poměru houževnatého a křehkého lomu. Což odpovídá předpokladu, že při pomalejší deformaci se materiál chová houževnatěji a vykazuje vyšší tažnost než v opačném případě. Vzorek podrobený únavovému zatěžování, také potvrzuje předpoklad zpevňování materiálu vlivem cyklování. [19]



Obr. 37 - Vizuální srovnání protažení únavového vzorku s nezatíženým stavem

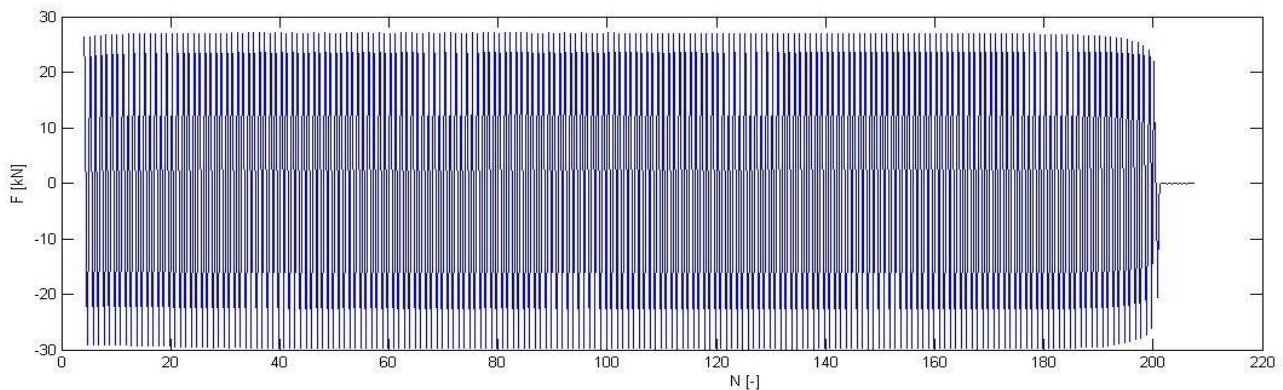


Obr. 38 - Vizuální srovnání protažení vlivem pomalé tahové zkoušky s nezatíženým stavem

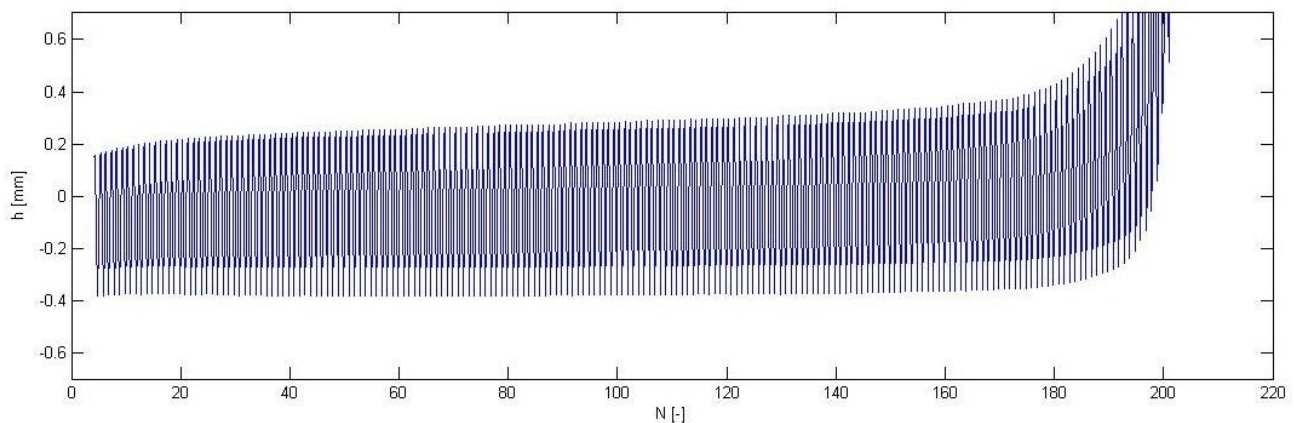
Na obrázcích 37, 38 je pro srovnání vzorek s počátečním nezatíženým stavem vždy nahoře. Zatím co u pomaleji provedené zkoušky tahem je plastická deformace znatelná, vzorek podrobený únavovému namáhání nevykazuje téměř žádné prodloužení. Důvodem je již výše zmíněné zpevňování.

Na vzorku s počátečním nezatíženým stavem jsou viditelné statické vtisky i vrypy od proměrování na scratch testeru. Detailněji níže. [19]

Graf 2 - Závislost namáhající síly na počtu cyklů u druhého cyklování při amplitudě zatížení 30kN

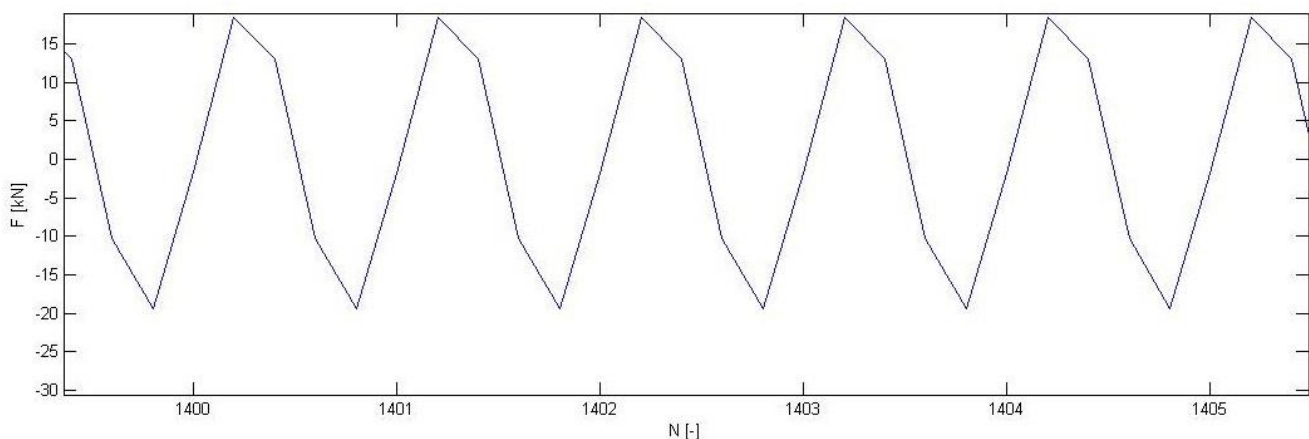


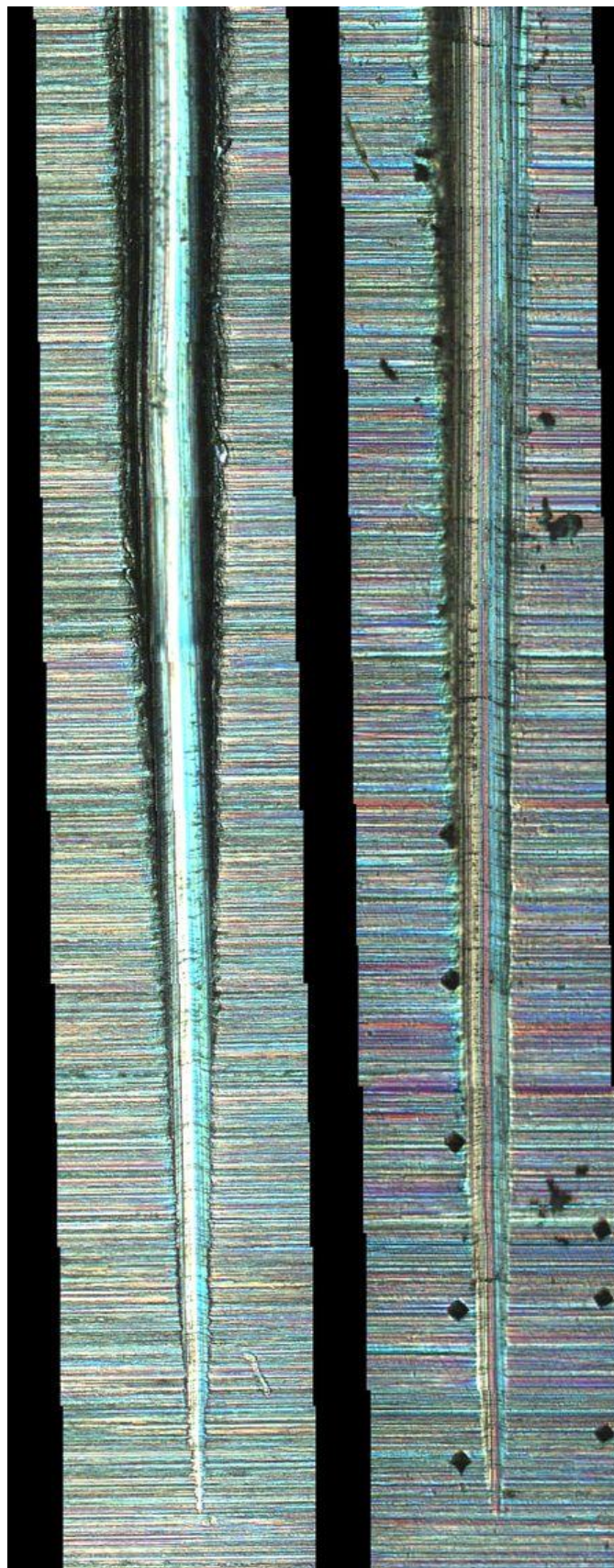
Graf 3 - Závislost velikosti deformace na počtu cyklů u druhého cyklování při amplitudě zatížení 30kN



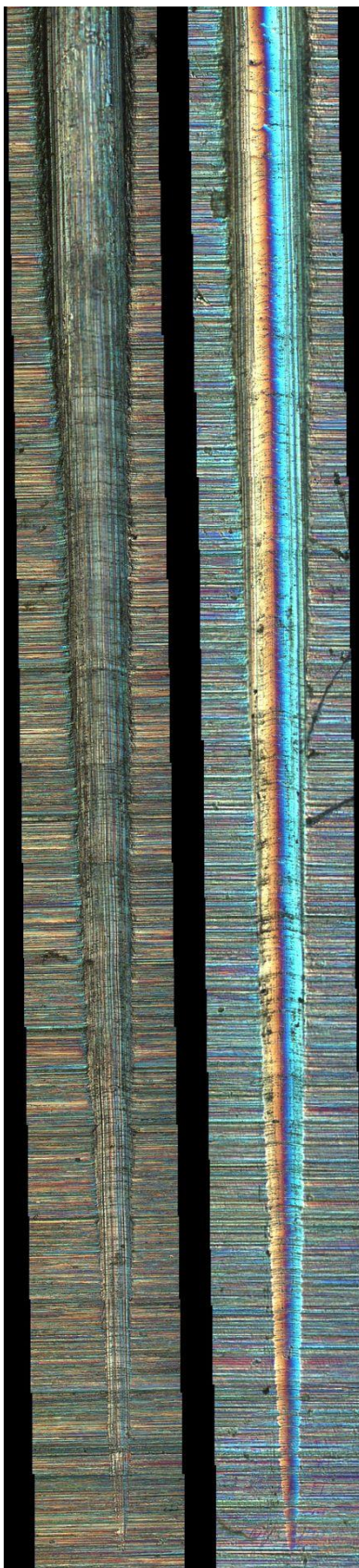
Na grafech 2 a 3 je vidět průběh kmitání vzorku při 2501 - 2707 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 30 kN v závislosti na zatěžující síle a délkové deformaci. V grafu 2 je viditelné přelomení vzorku, což se projeví ustálením zatěžující síly na 0N. Graf 3 znázorňuje postupná charakteristika délkové deformace. [19]

Graf 4 - Závislost namáhající síly na počtu cyklů (výřez)





Obr. 39 - Vryp Rockwell 0,2 mm

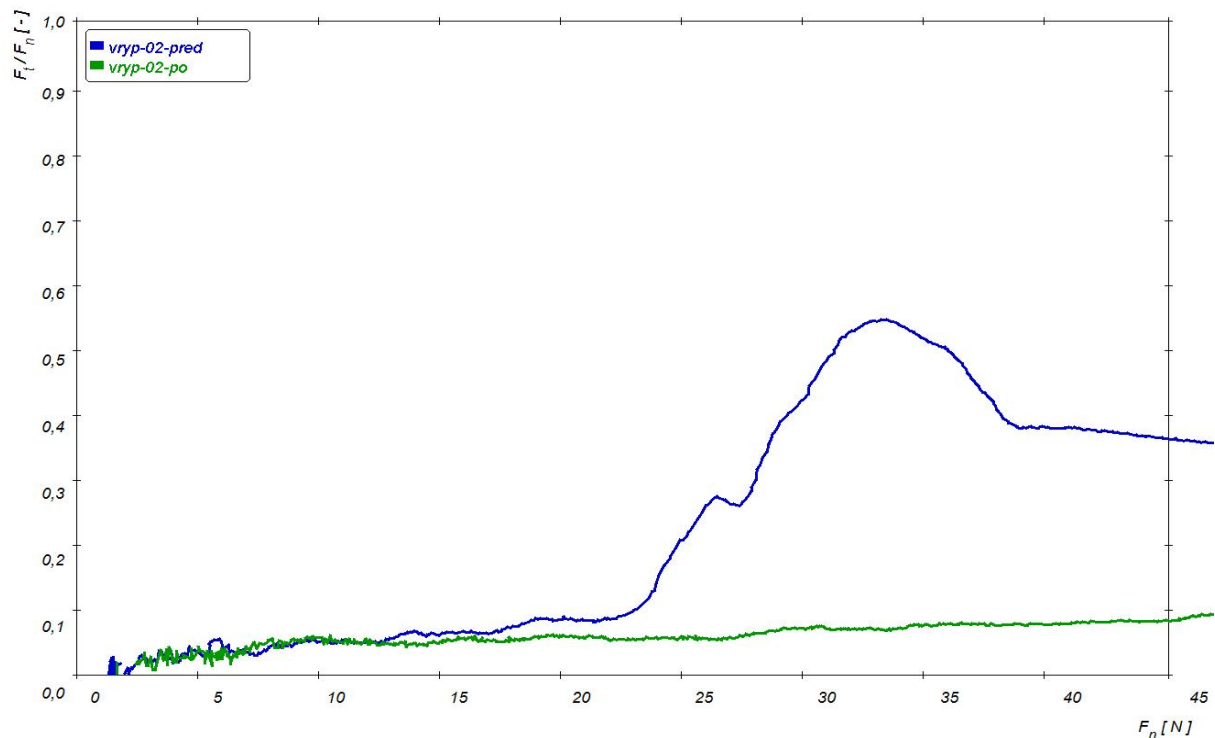


Obr. 40 - Vryp Rockwell 0,5 mm

Na obr. 39 jsou zdokumentovány vrypy provedené indentorem Rockwellova typu C s poloměrem zaoblení špičky 0.2 mm na vzorku bez únavového zatěžování a na vzorku po únavovém zatěžování 10 000 cyklů amplitudou 20 kN. Vryp byl proveden s proměnnou normálovou silou od 0 N do 50 N. Jsou patrné výrazné změny v plastické deformaci v okolí vrypu, která je výraznější na vzorku bez únavového zatěžování. Je patrné zpevnění povrchových vrstev po únavovém zatěžování na základě menší šířky vrypu a menším pronikáním indentoru do hloubky materiálu. Porušení je celkově tvárnější na vzorku před zatěžováním. Na vzorku po zatěžování je patrné na okraji vrypů spíše křehké praskání a na dně vrypu je patrný vznik křehkých trhlin. Z výsledku je patrné, že lze zachytit změny v povrchu po únavovém zatěžování na základě vrypové indentace sledováním změn v kohezivním porušování zejména ve změně charakteru porušení a ve zpevnění materiálu zachycením menší šířky vrypu.

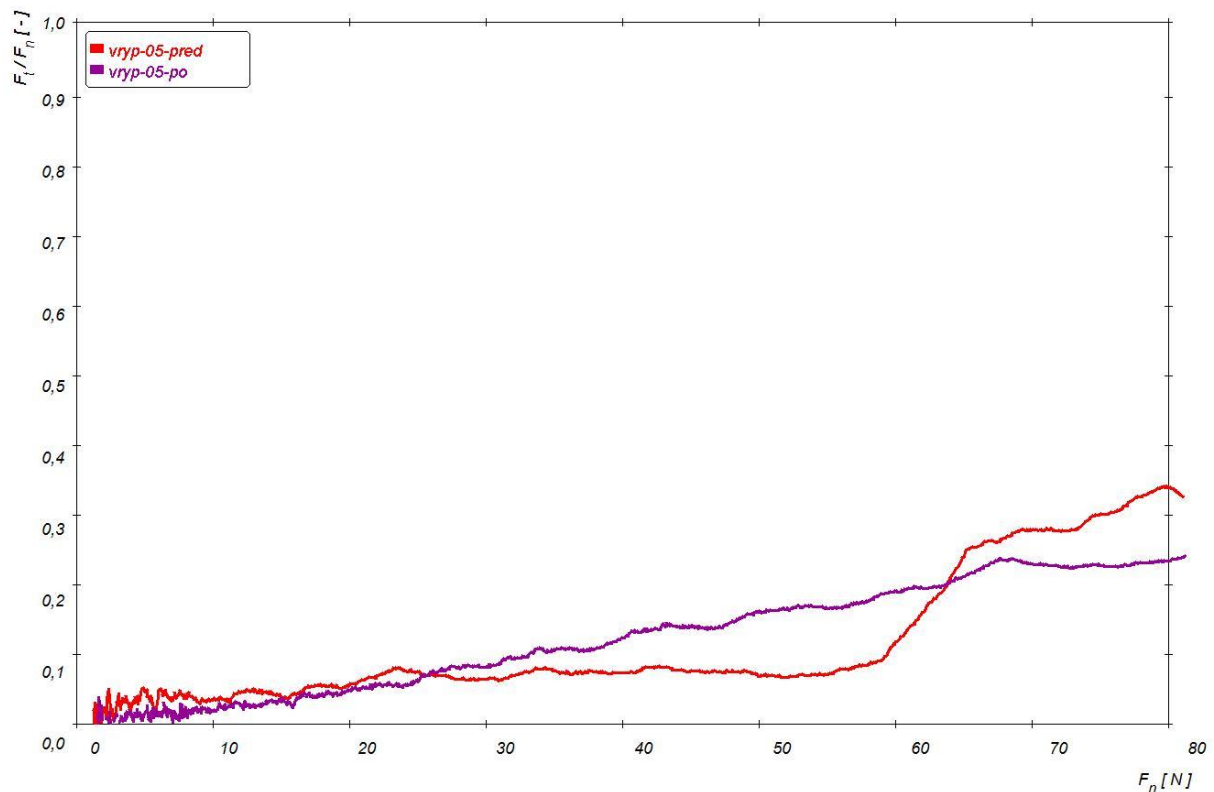
Na obr. 40 jsou podobně zdokumentovány vrypy provedené indentorem s poloměrem zaoblení špičky indentoru 0.5 mm. Vrypy byly opět provedeny na vzorku bez a s únavových zatěžování opět 10 000 cyklů s amplitudou 20 kN. Vrypy jsou provedeny s proměnnou normálovou silou od 0 N do 80 N. Z morfologie porušení vrypováním testem je opět patrné, že dochází ke zpevnění materiálu, změně houževnatého porušení na křehké po cyklickém únavovém zatěžování.

Graf 5 - Závislost koeficientu tření na normálové síle – vryp Rockwell 0,2 mm

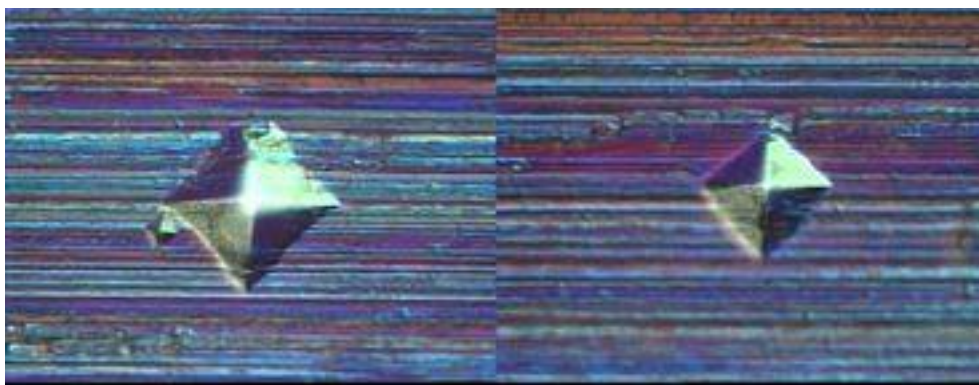


Průběh závislosti koeficientu tření na působící normálové síle v případě vrypové indentace indentorem 0.2 mm ukazuje rozdíly na vzorku před a po únavovém zatěžování. Na vzorku bez únavového zatěžování je patrné, že dochází k většímu zvrásnění a pronikání do větší hloubky s rostoucí normálovou silou než na vzorku, který byl zpevněn cyklickým zatěžováním silou 20 kN.

Graf 6 - Závislost koeficientu tření na normálové síle – vryp Rockwell 0,5 mm



Závislost koeficientu tření na normálové síle při vrypové indentaci indentorem 0.5 mm opět ukazuje rozdíly mezi vzorky bez únavového a s únavovým zatěžováním. Je patrné větší pronikání indentoru do hloubky při vyšších normálových silách na vzorku před únavovým zatěžováním.



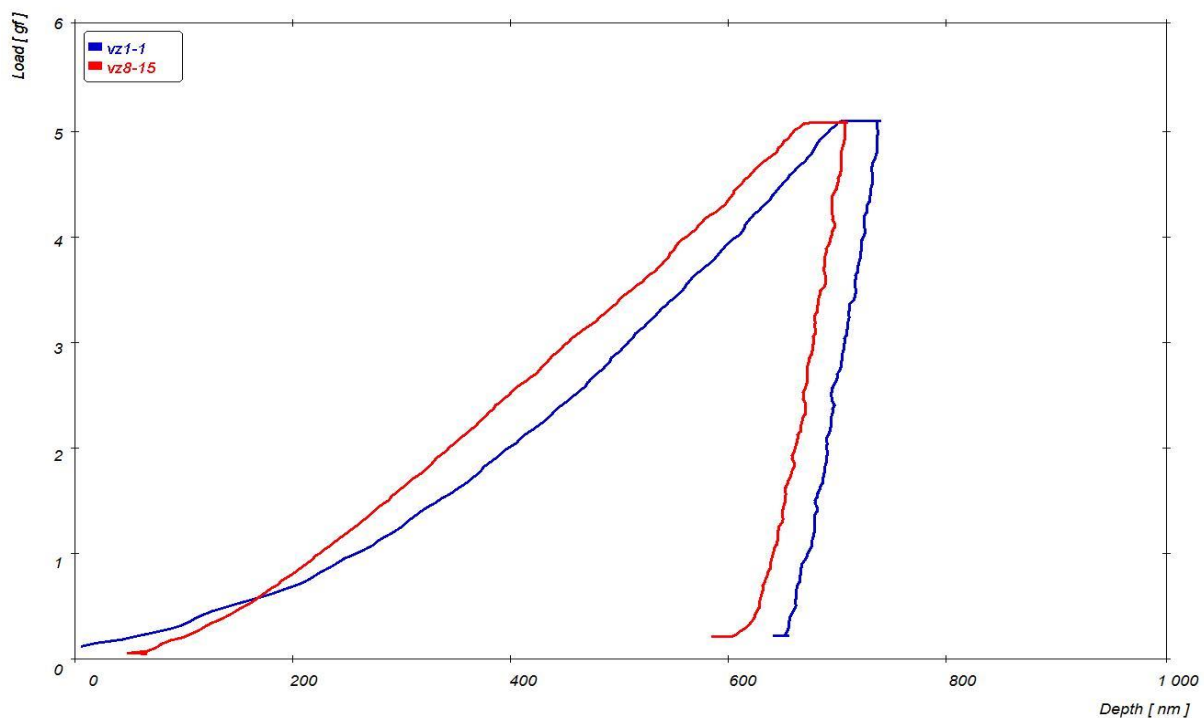
Obr. 41 - Vtisky Vickers s normálovou silou 10N

Obr. 41 znázorňuje srovnání dvou vtisků vytvořených stejnou zatěžující normálovou silou na vzorcích vystavených stejnému počtu 2500 cyklů s rozdílnou amplitudou namáhání. Vlevo amplituda dosahovala hodnoty 20 kN a vpravo 25 kN. Je patrné, že při nižší amplitudě zatěžování dochází k pomalejšímu zpevňování a tudíž indenter pronikl hlouběji do materiálu.

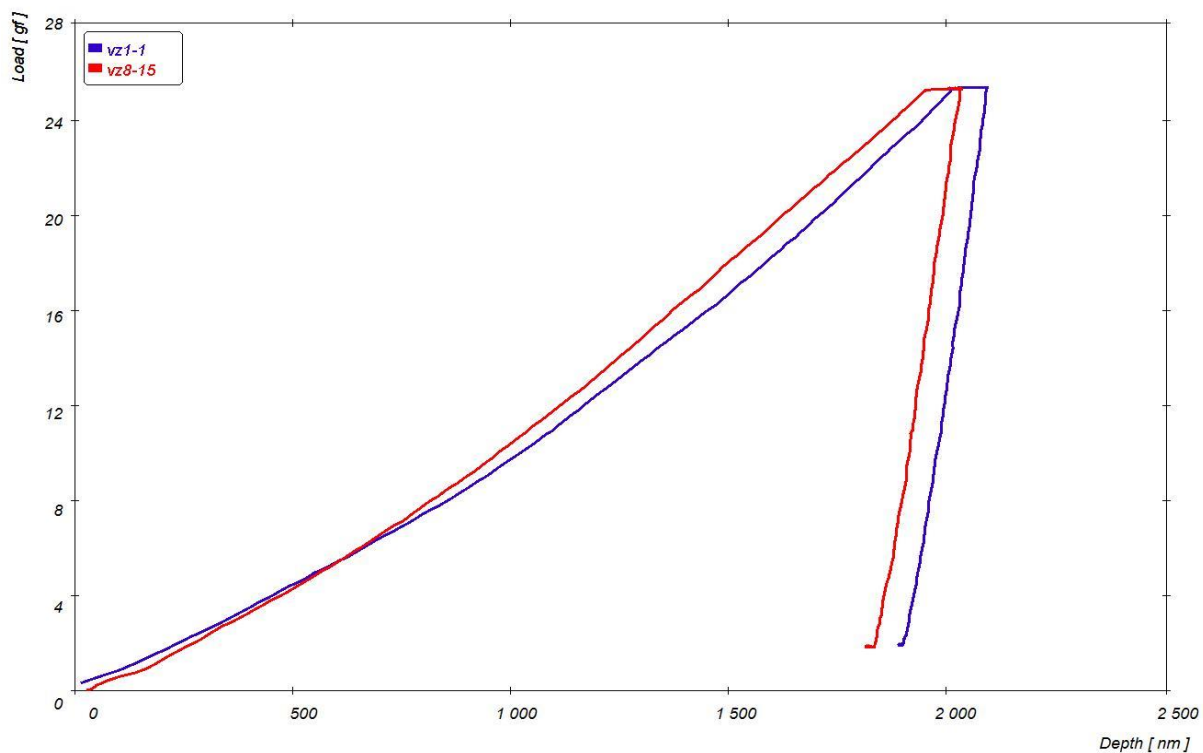
V následujících grafech jsou zobrazeny nanoindentační křivky kdy :

- vz1-1 : zkušební tyč s počátečním nezatíženým stavem
- vz1-2 : tyč vystavena 2500 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 30 kN
- vz1-3 : tyč vystavena 2500 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN
- vz1-4 : tyč vystavena 5000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN
- vz1-5 : tyč vystavena 7500 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN
- vz1-6 : tyč vystavena 10 000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN
- vz7-25 : tyč vystavena 2500 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 25 kN
- vz8-15 : tyč vystavena 5000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 15 kN
- vz9-25 : tyč vystavena 5000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 25 kN
- vz10-15 : tyč vystavena 10 000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 15 kN

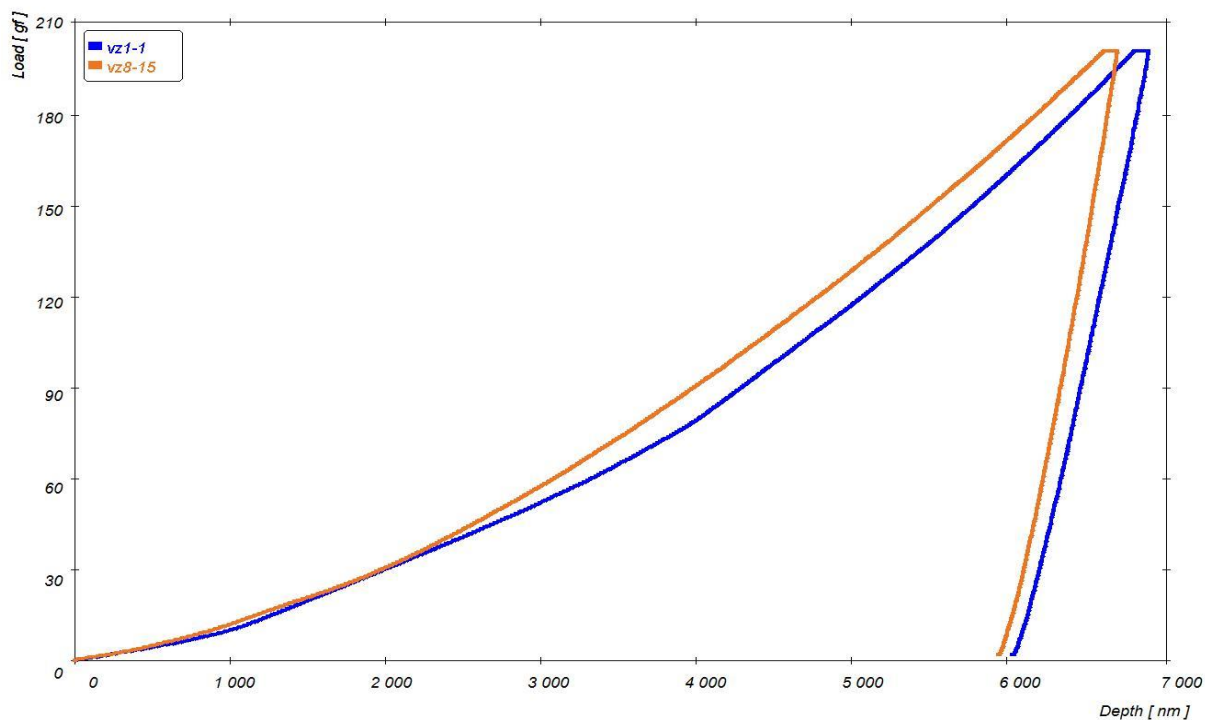
Graf 7 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížením 5g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 5000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 15 kN



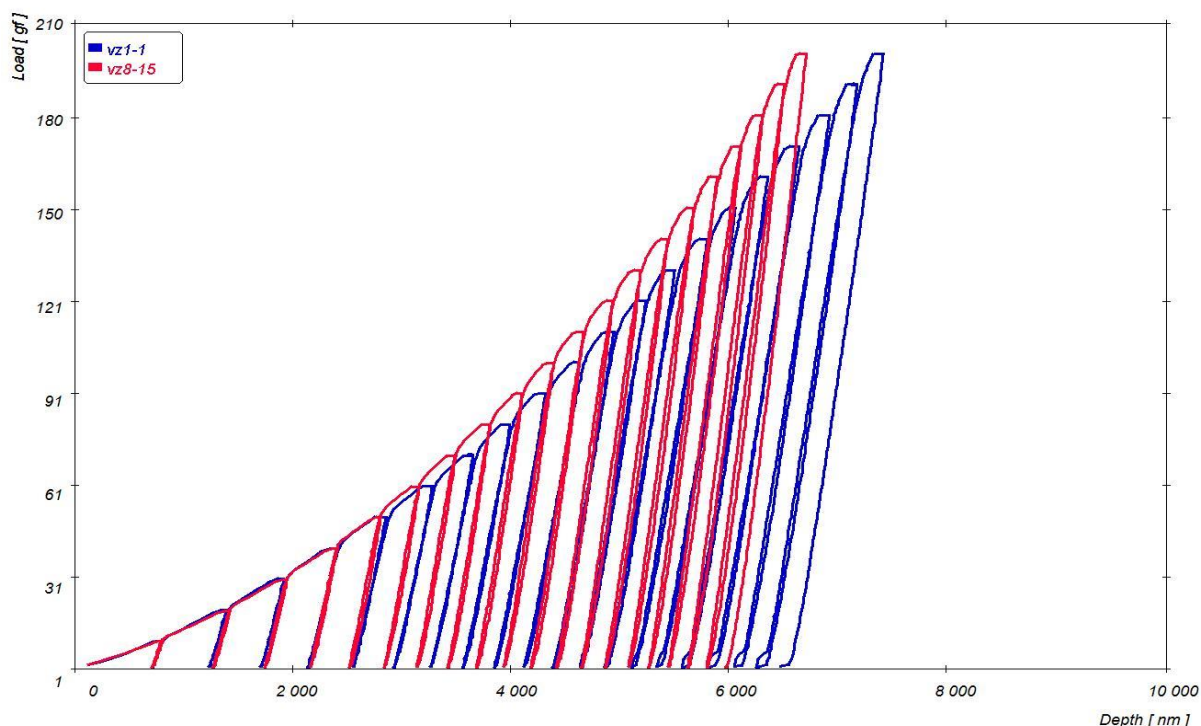
Graf 8 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 25g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 5000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 15 kN



Graf 9 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 5000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 15 kN

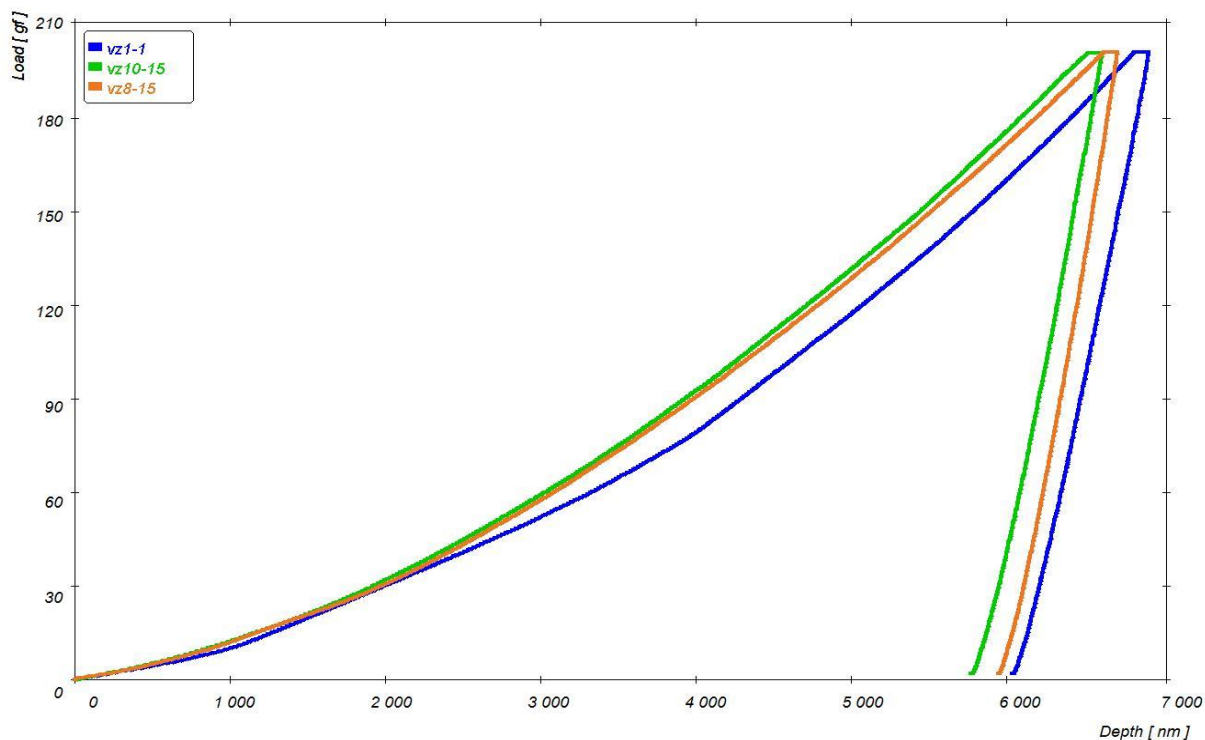


Graf 10 - Cyklické indentační křivky s maximálním normálovým zatížením 200g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 5000 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 15 kN



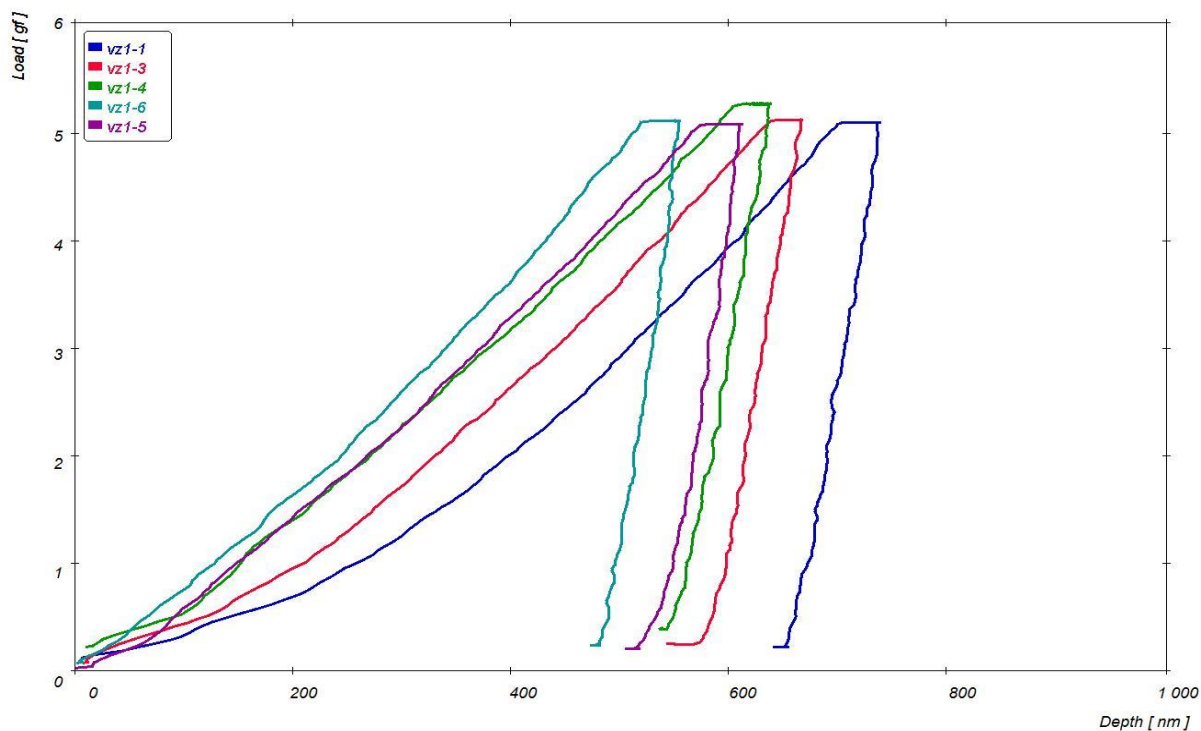
Výše uvedené grafy ukazují rozdíly v indentačních křivkách záznamu závislosti hloubky proniknutí indentoru na normálové síle v průběhu zatěžování, v časové prodlevě a v průběhu odlehčování v modu 2 při různých normálových zatíženích způsobujících měření z různě velkých lokalit a různých hloubek materiálu před únavovým zatěžováním a po únavovém zatěžování 15 kN. Je patrné zpevnění povrchu vzorku po cyklickém zatěžování ze sklonu indentační křivky a ze změny hloubky proniknutí indentoru. Výsledky ukazují zpevnění vzorku při měření všemi maximálními normálovými silami již po 5000 cyklech. Růst zpevnění materiálu po cyklickém zatěžování silou 15 kN ukazují i cyklické indentační křivky, kde je patrný nárůst sklonu celkové křivky a pokles maximální hloubky proniknutí a též zhuštění cyklické indentační křivky na vzorku zatíženém cyklicky 15 kN při 5000 cyklech.

Graf 11 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíženém vzor-ku a vzorku zatíženého 5000 a 10 000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 15kN

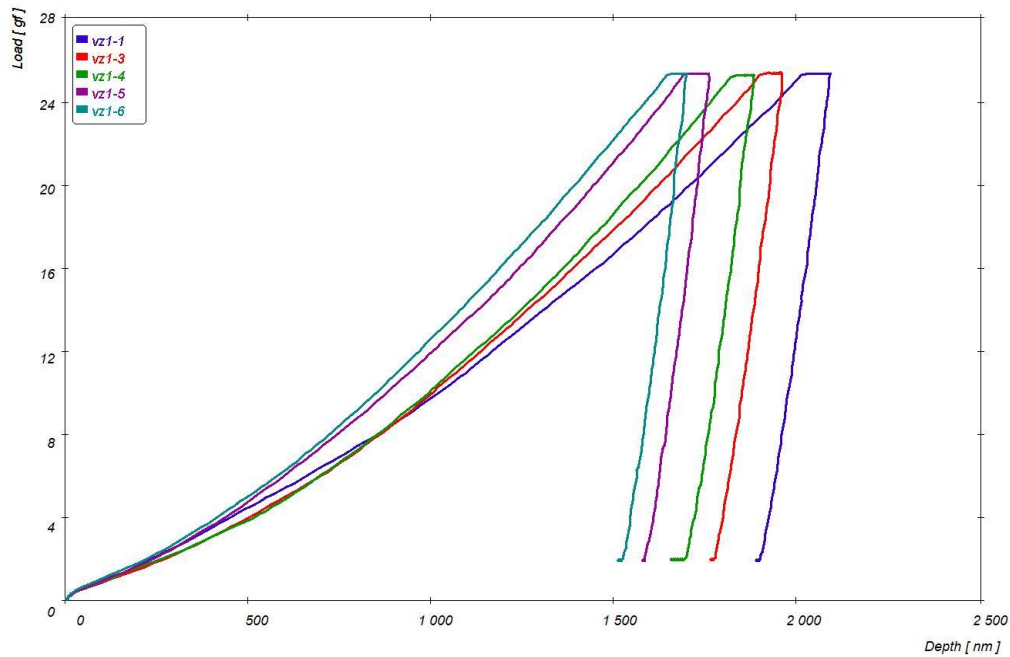


Z dalšího grafu je patrné, že zpevňování materiálu narůstá s dalším nárůstem počtu cyklů na 10 000, ač je nárůst zpevnění již menší.

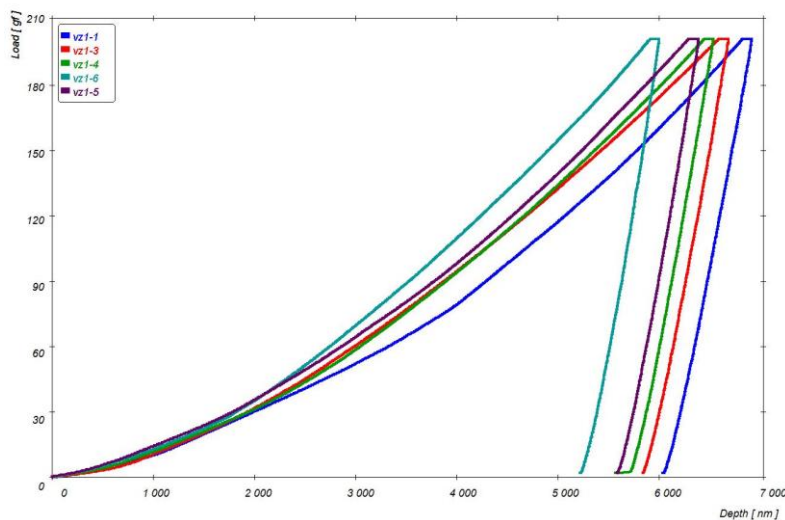
Graf 12 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 5g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 2500, 5000, 7500, 10 000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN



Graf 13 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížením 25g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 2500, 5000, 7500, 10 000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN

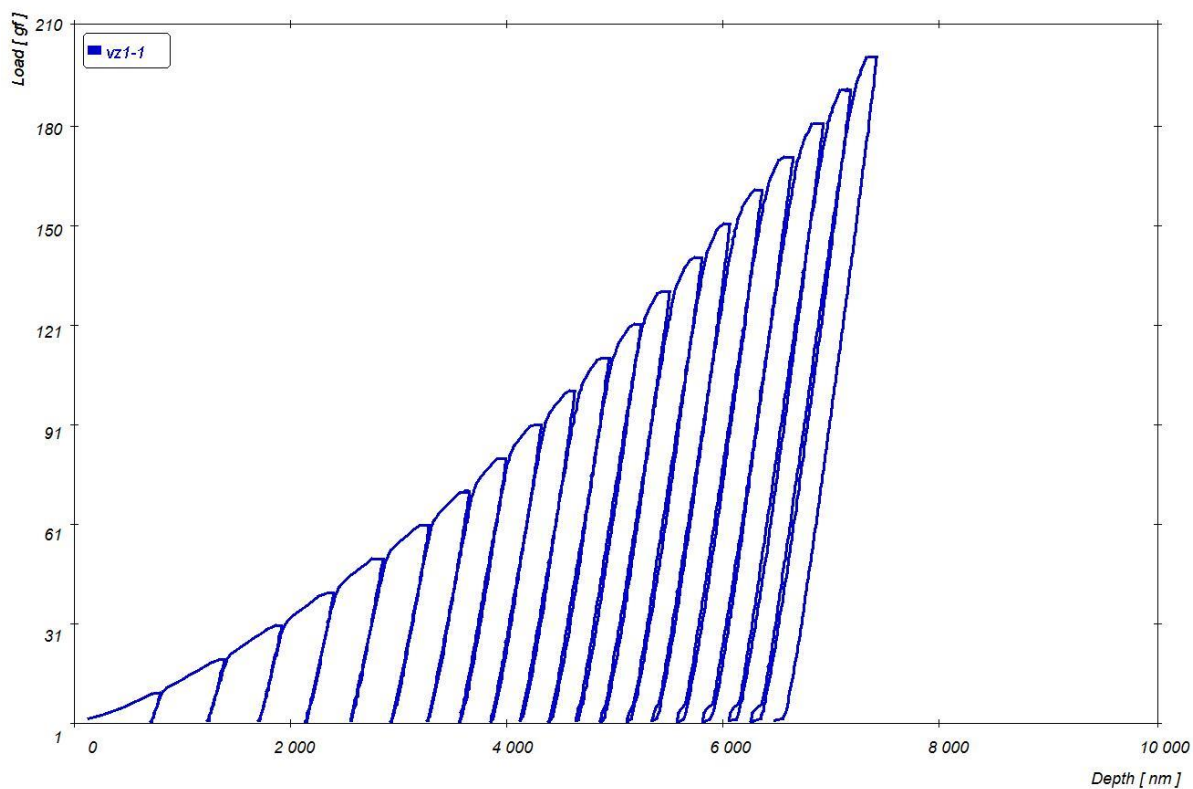


Graf 14 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížením 200g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 2500, 5000, 7500, 10 000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN

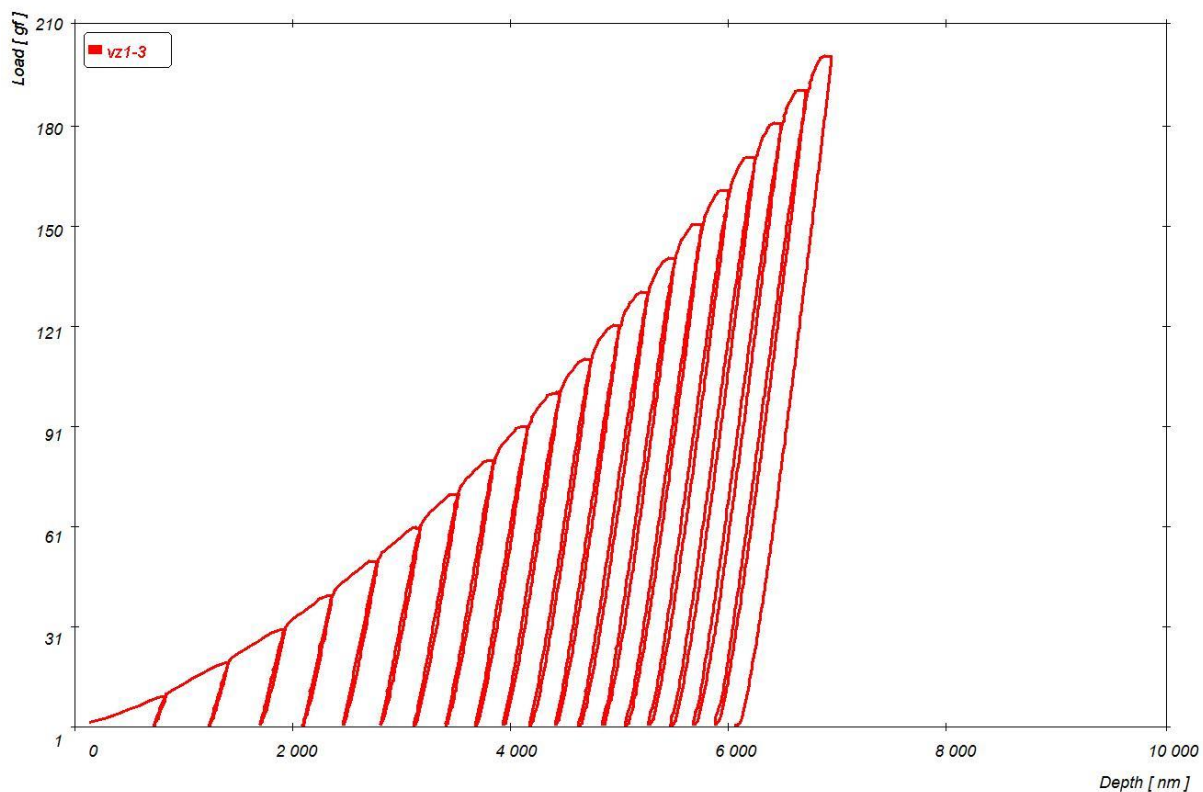


Další série grafů zobrazujících průběhy indentačních křivek modu 2. Ukazuje cyklické zatěžování silou 20 kN s postupně rostoucím počtem cyklů. Z průběhů při všech měřeních modem 2 a to s rozdílnou maximální normálovou silou je patrný postupný vývoj změn v nárůstu tvrdosti patrné z poklesu maximální hloubky proniknutí indentoru a z nárůstu sklonu indentačních křivek s rostoucím počtem cyklů zatěžování.

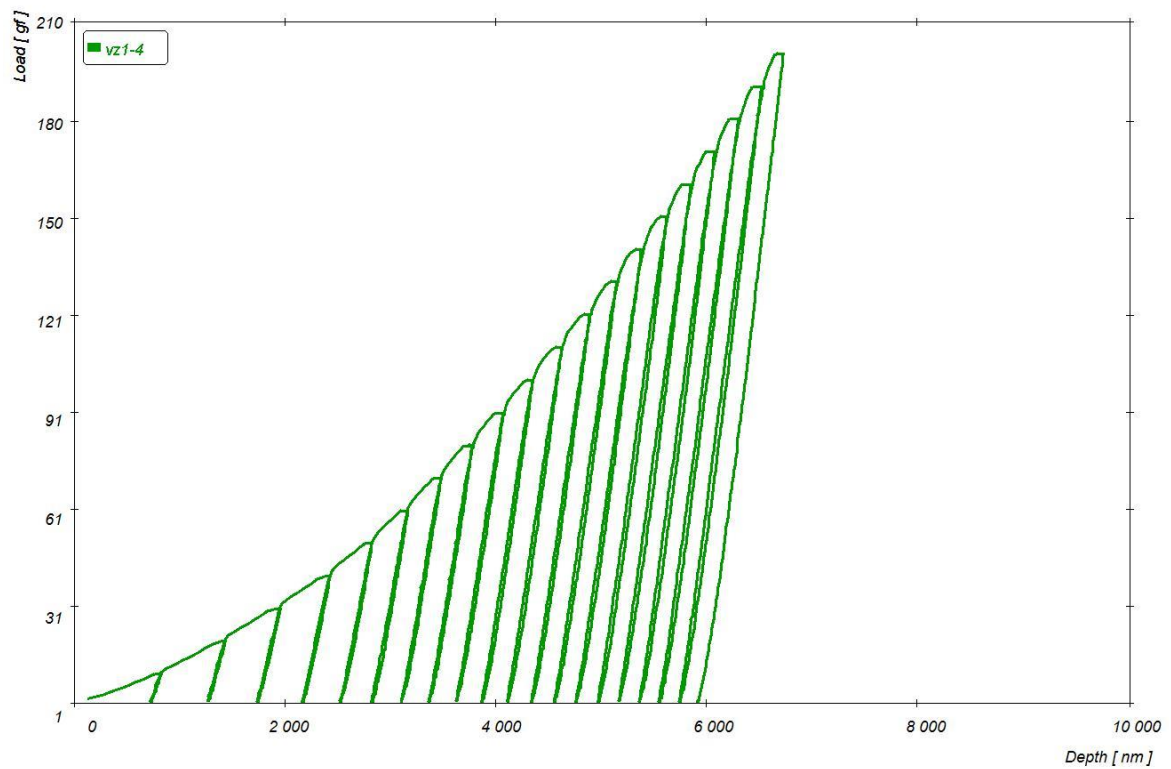
Graf 15 - Cyklická indentační křivka s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíže-ném vzorku



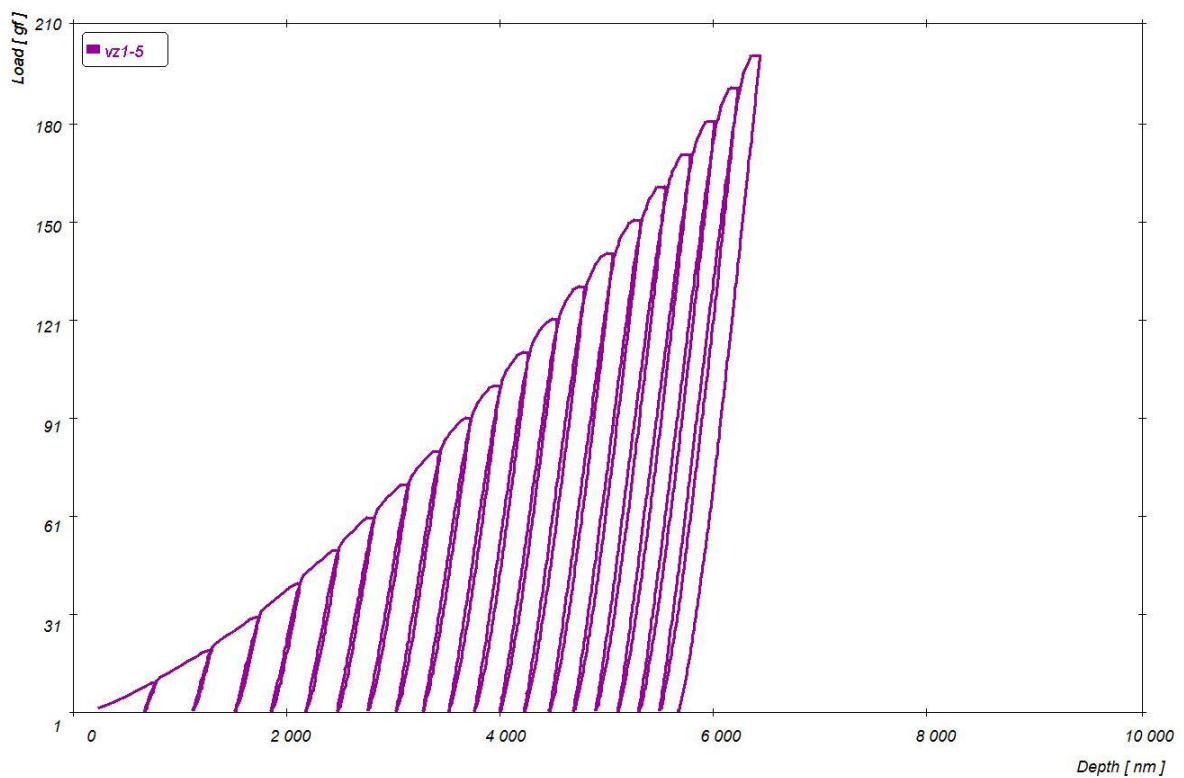
Graf 16 - Cyklická indentační křivka s maximálním normálovým zatížení 200g na vzorku zatíženém 2500 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN



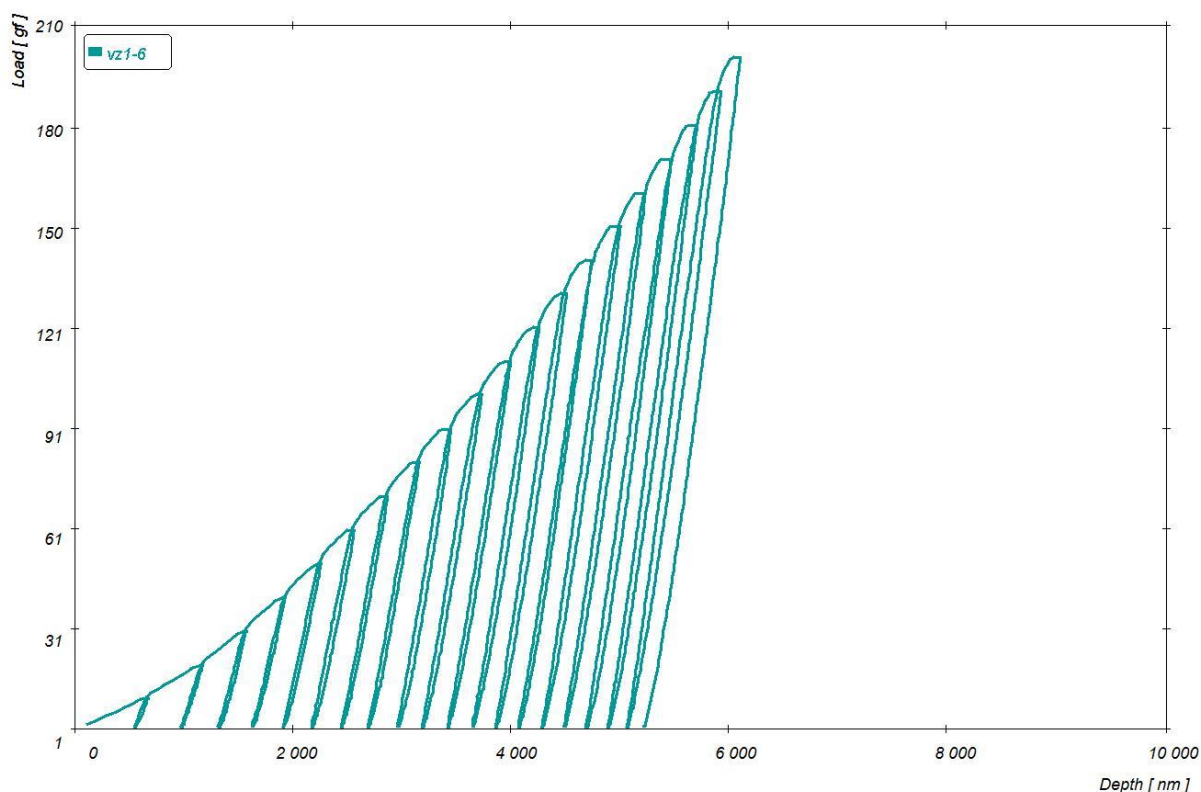
Graf 17 - Cyklická indentační křivka s maximálním normálovým zatížení 200g na vzorku zatíženém 5000 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN



Graf 18 - Cyklická indentační křivka s maximálním normálovým zatížení 200g na vzorku zatíženém 7500 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN

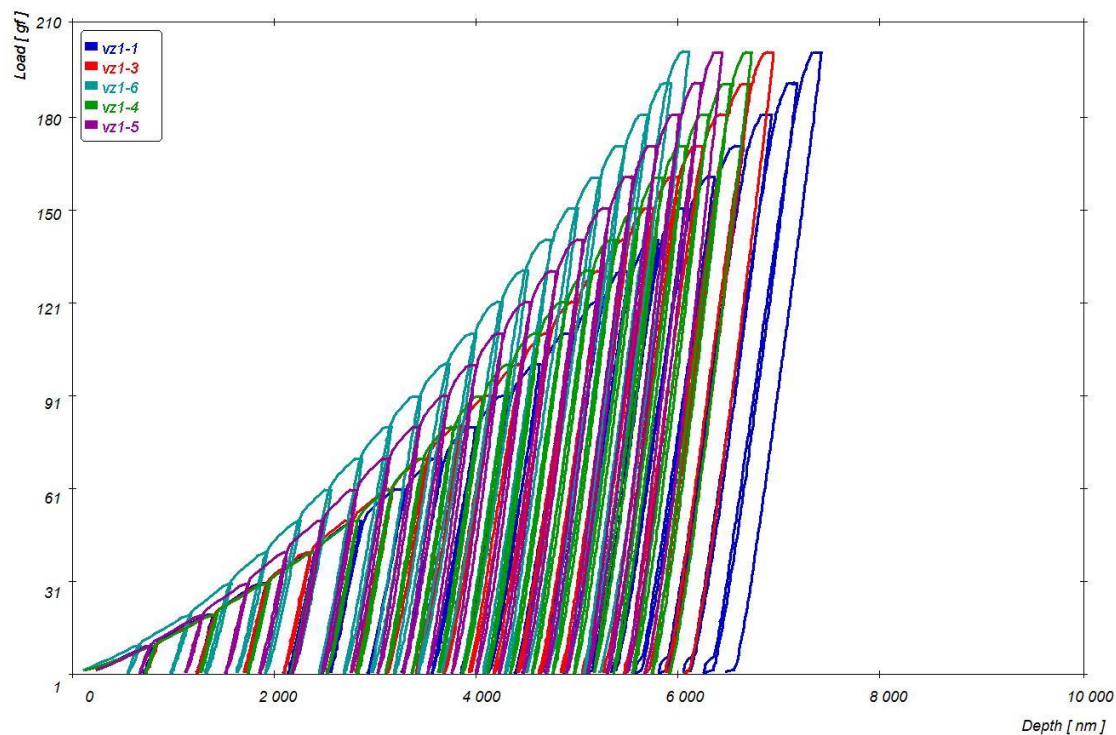


Graf 19 - Cyklická indentační křivka s maximálním normálovým zatížením 200g na vzorku zatíženém 10 000 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN

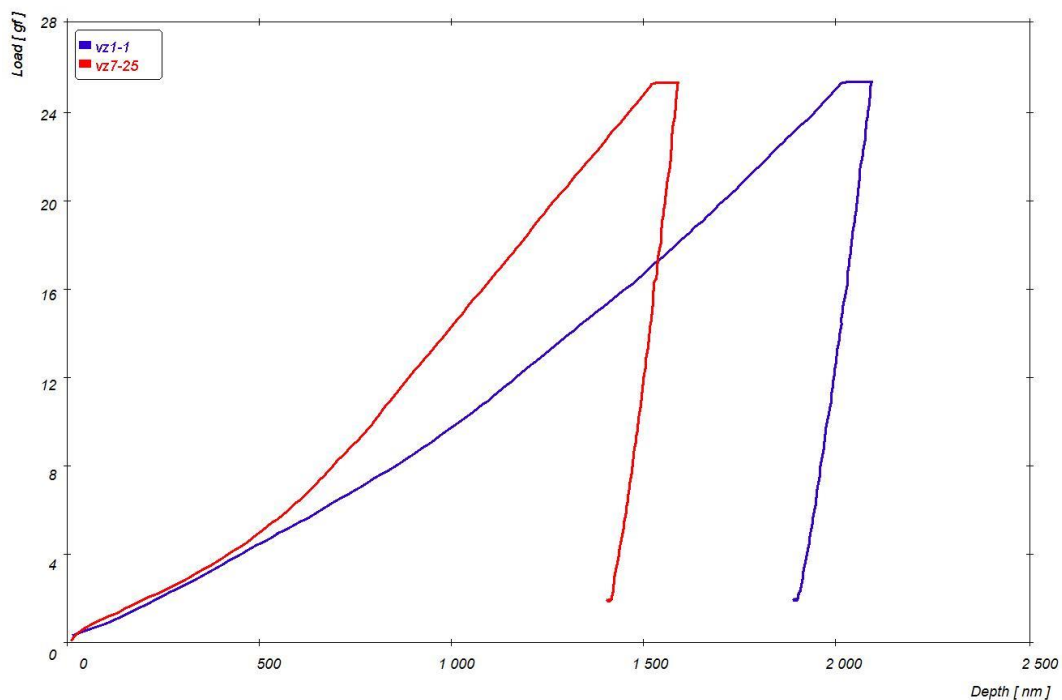


Z jednotlivých cyklických indentačních křivek při maximálním normálovém zatížení 200 g po různých počtech cyklů únavového zatížení stejnou silou a to 20 kN je patrné, že dochází ke zpevnění materiálu na základě zhuštění cyklických indentačních křivek, z nárůstu jejich sklonu a z poklesu maximální hloubky proniknutí. Je patrné, že v případě vzorků s menším počtem cyklů únavového zatížení dochází nejdříve k hlubšímu pronikání, ale následně se začne materiál zpevňovat cyklickou indentací. Kdežto v případě vzorků s větším počtem cyklů únavového zatížení se projevuje již více zpevnění únavou a materiál se již výrazněji nezpevňuje cyklickou indentací. Níže je uveden souhrn cyklických indentačních křivek vzorků zatěžovaných stejnou silou 20 kN ale s rozdílným počtem cyklů.

Graf 20 - Cyklické indentační křivky s maximálním normálovým zatížením 200g na počátečním nezatiženém vzorku a vzorku zatíženého 2500, 5000, 7500, 10 000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN

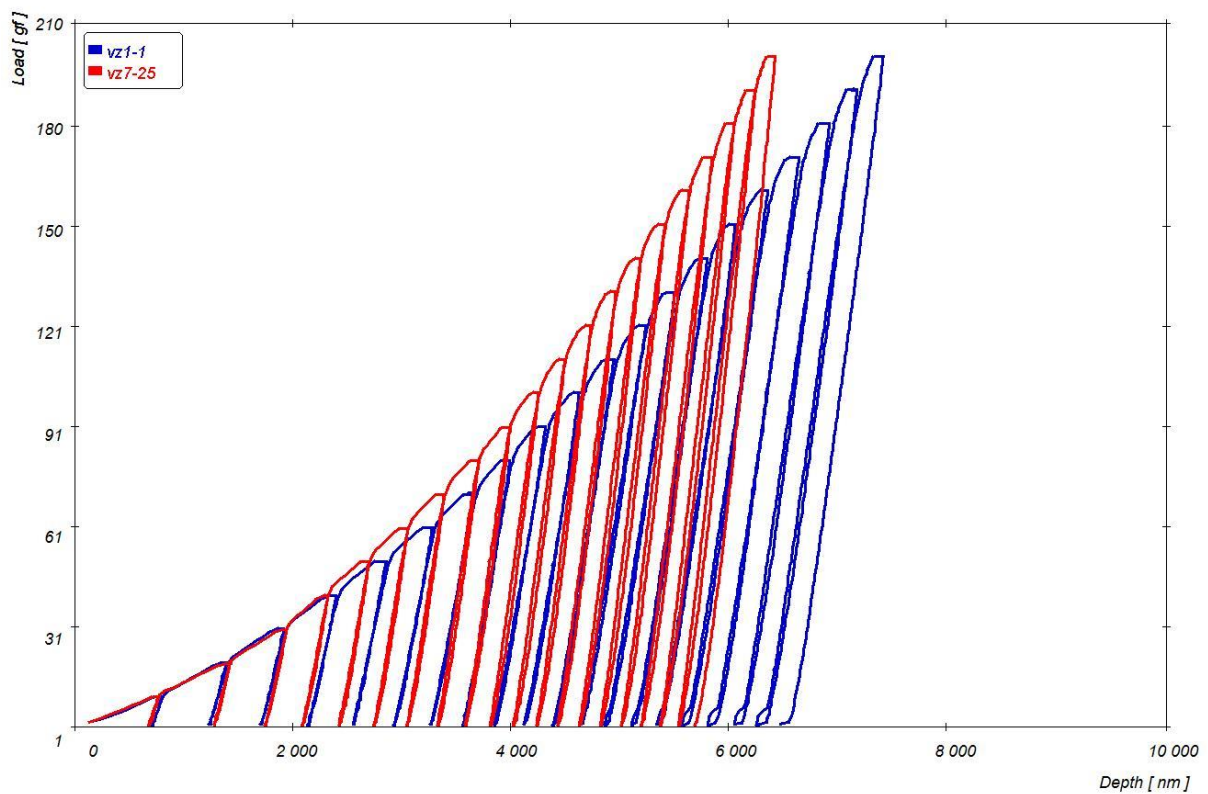


Graf 21 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížením 25g na počátečním nezatiženém vzorku a vzorku zatíženého 2500 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 25 kN

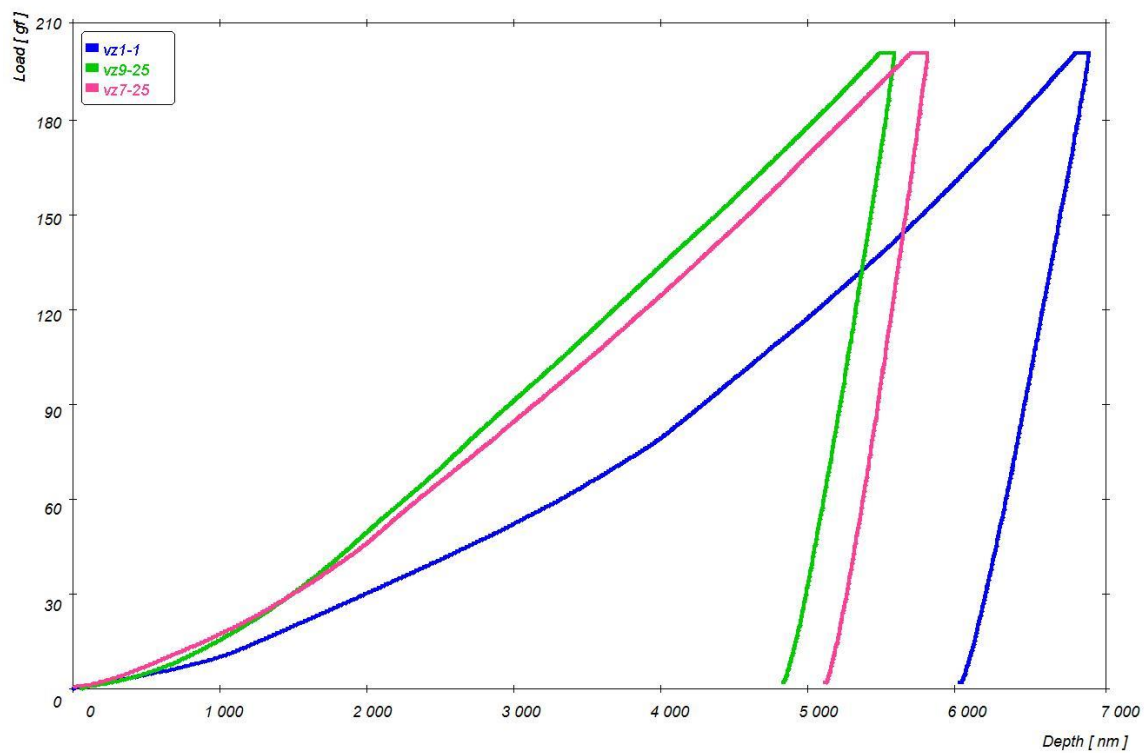


Další únavové zatěžování proběhlo se silou 25 kN. Z indentačních je patrné výraznější zpevnění již při 2500 cyklech zatěžování proti vzorku bez únavového zatížení. Podobný výsledek ukazují cyklická indentační křivky vzorku nezatíženého a zatíženého únavově silou 25 kN 2500 cykly.

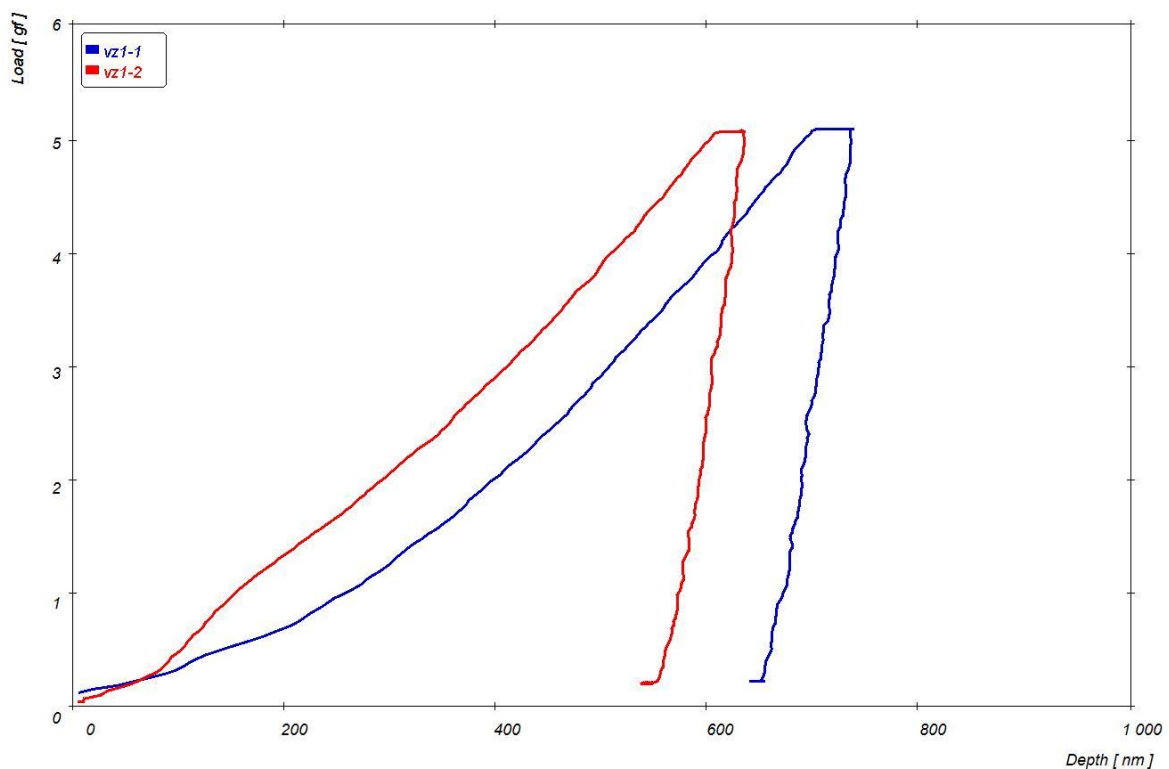
Graf 22 - Cyklické indentační křivky s maximálním normálovým zatížením 200g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 2500 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 25 kN



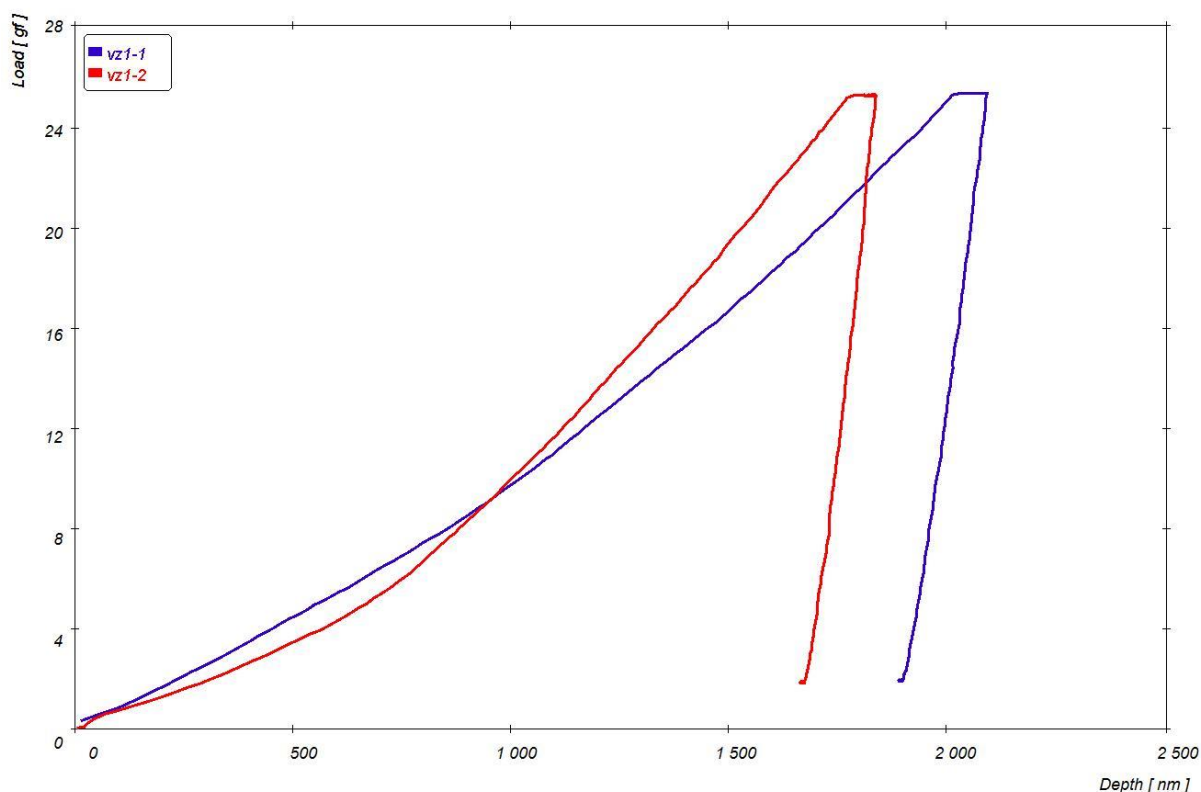
Graf 23 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíženém vzor-ku a vzorku zatíženého 2500 a 5000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 25 kN



Graf 24 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 5g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 2500 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 30 kN

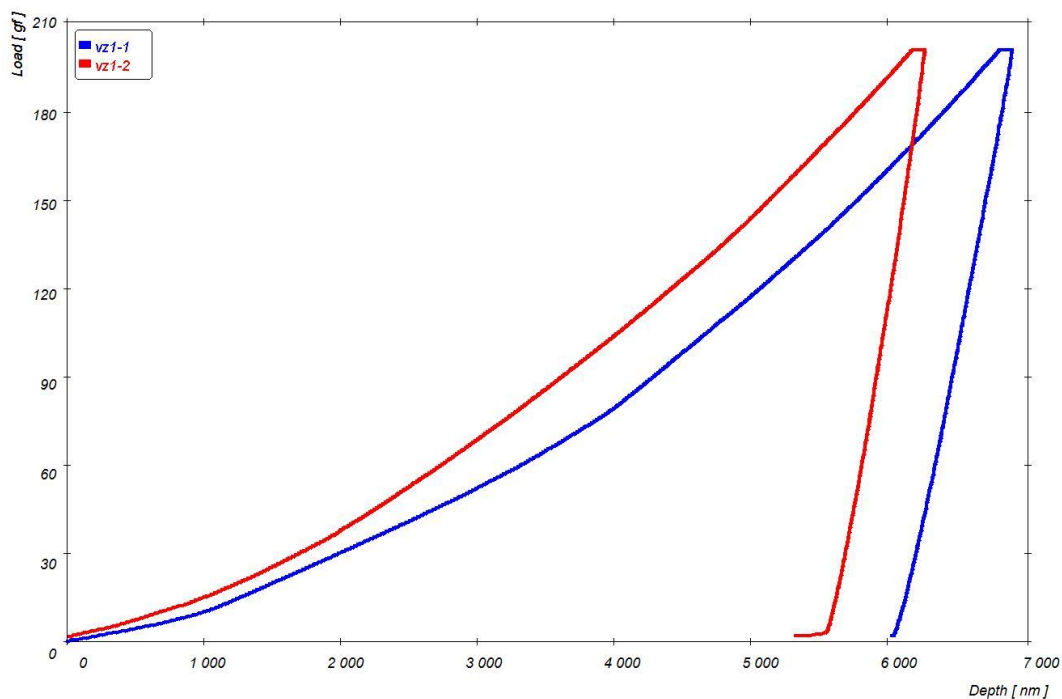


Graf 25 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížením 25g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 2500 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 30 kN

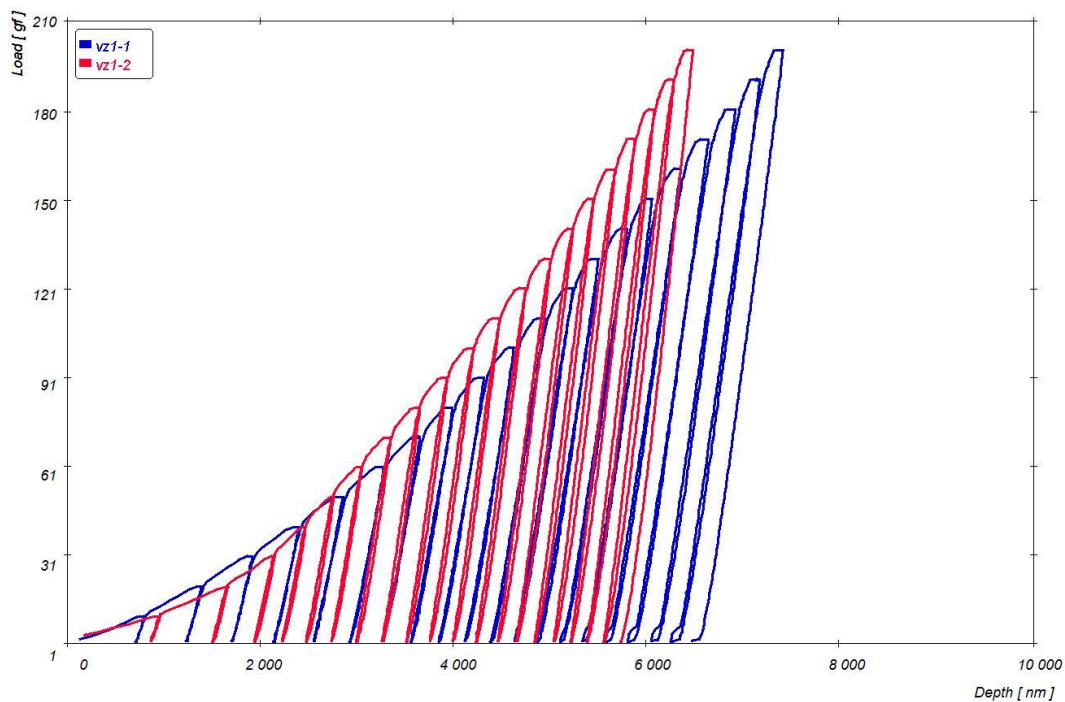


Výše jsou uvedeny grafy naměřené v modu 2 a níže jsou uvedeny grafy ukazující cyklické indentační křivky ukazující změny indentačních křivek proti nezatíženému únavově vzorku při zatěžování 30 kN 2500 cyklů. Tento vzorek se ovšem při další zatěžování již přetrhl a tak již nebylo možné zachytit další vývoj. Bylo by dobré v dalších navazujících experimentech se k tomuto měření vrátit vzhledem k tomu, že toto zatěžování se nastavilo na začátku a nebyla měření ještě optimalizována a tak ukazují rozdílnější výsledky a neodpovídají naměřenému trendu.

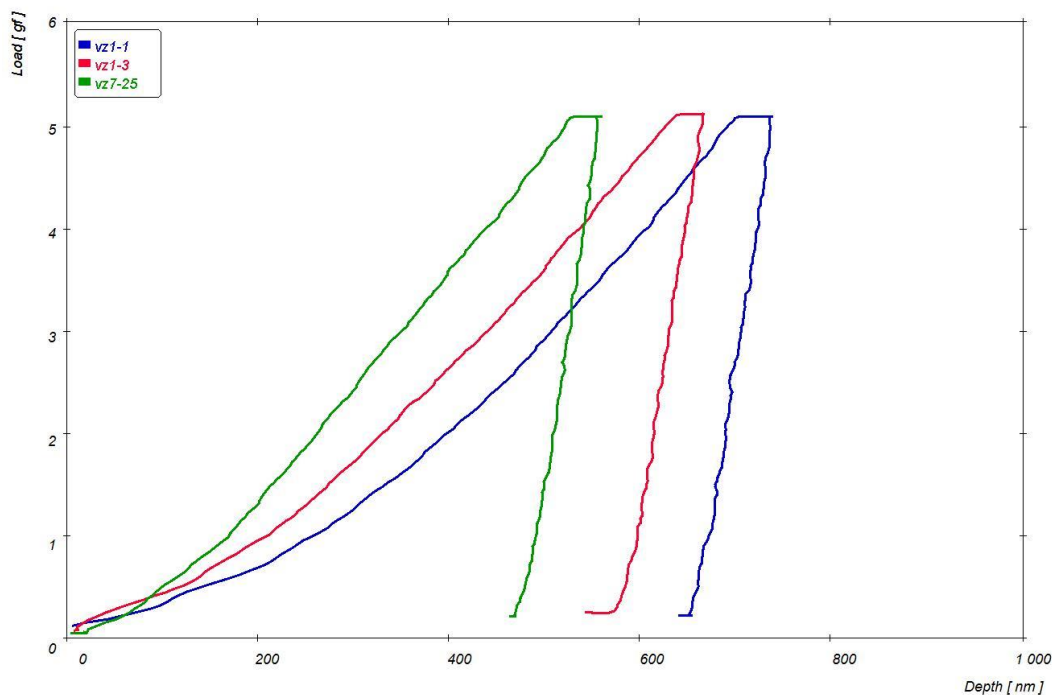
Graf 26 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíženém vzor-ku a vzorku zatíženého 2500 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 30 kN.



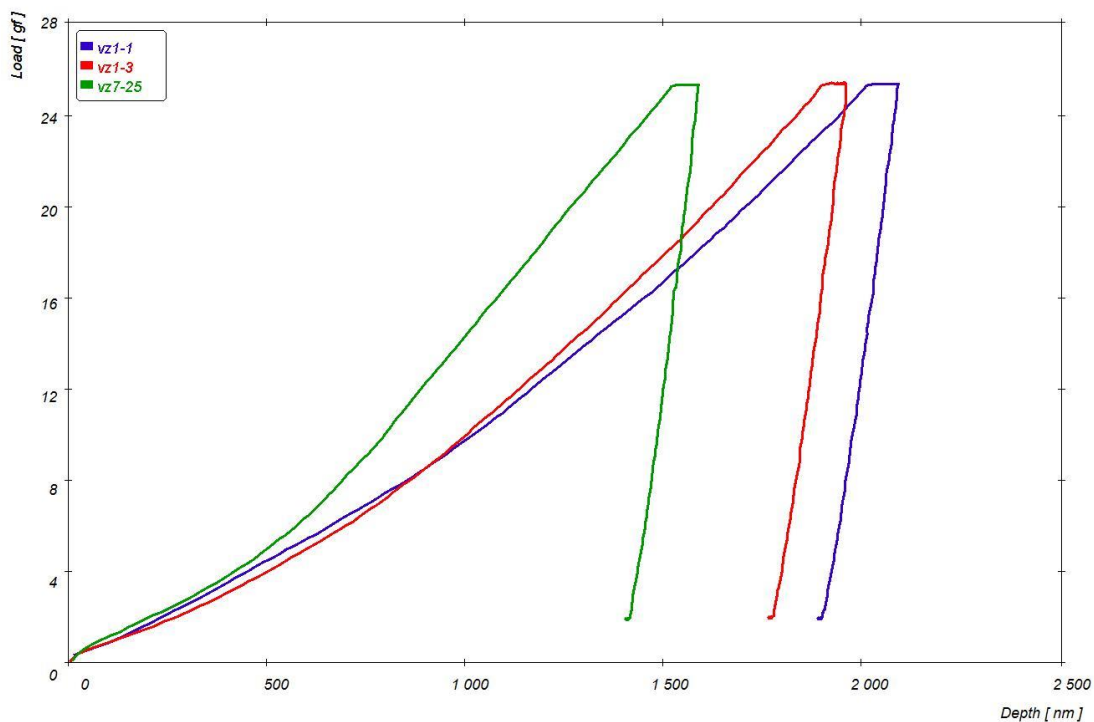
Graf 27 - Cyklické indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíže-ném vzorku a vzorku zatíženého 2500 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 30 kN



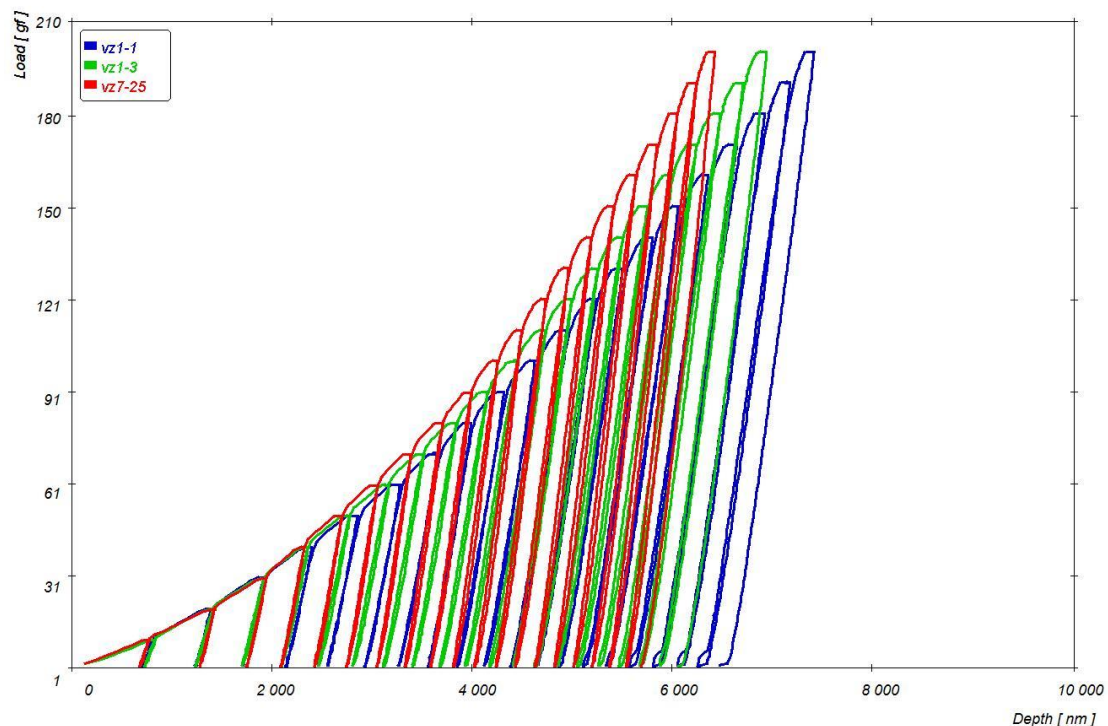
Graf 28 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 5g na počátečním nezatíženém vzorku, vzorku zatíženého 2500 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN a 25 kN



Graf 29 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 25g na počátečním nezatíženém vzorku, vzorku zatíženého 2500 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN a 25 kN

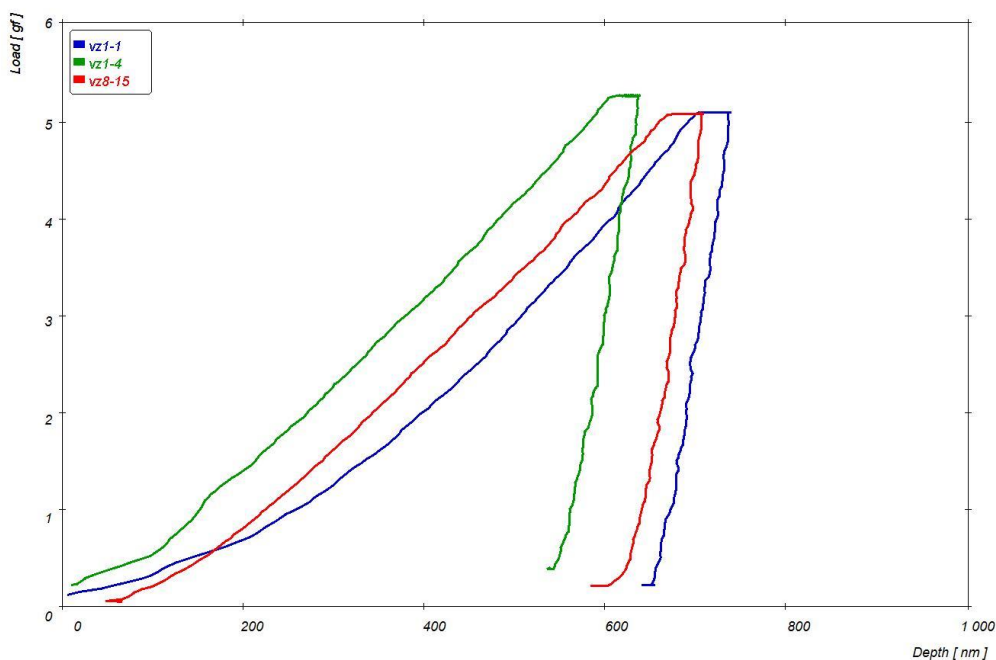


Graf 30 - Cyklické indentační křivky s maximálním normálovým zatížením 200g na počátečním nezatižené-ném vzorku, vzorku zatíženého 2500 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN a 25 kN

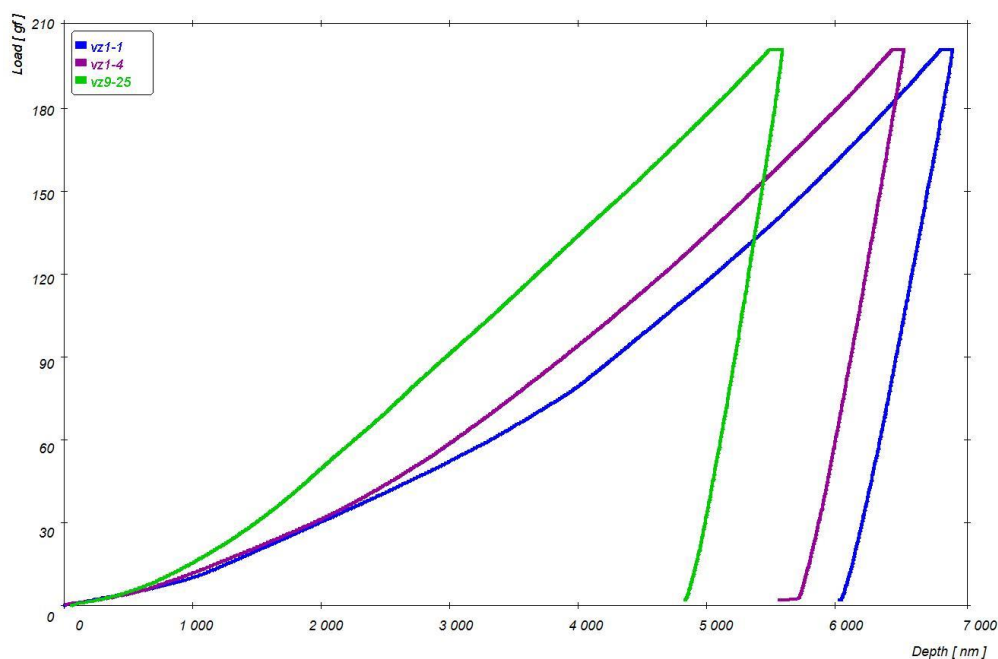


Grafy 28 – 30 ukazují rozdíly mezi indentačními křivkami jednoduchými s různou velikostí maximálního normálového zatížení a cyklickými na vzorcích s různým únavovým zatěžováním a to 20 kN a 25 kN se stejným počtem zátěžných cyklů. Z indentačních křivek je patrné, že dochází k rozdílnému zpevnění při použití rozdílných sil při únavě. Výraznější zpevnění je při vyšší síle, ale liší se v případě měření s rozdílnými maximálními zátěžemi při indentaci. Zpevnění je výraznější při povrchu vzorku tj. při měření menšími silami. Kdežto při vyšším zatížení je patrný menší rozdíl pro případ únavy 20 kN, kdežto u zatížení 25 kN je to výraznější i při měření ve větší hloubce.

Graf 31 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 5g na počátečním nezatíženém vzorku, vzorku zatíženého 5000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN a 15 kN

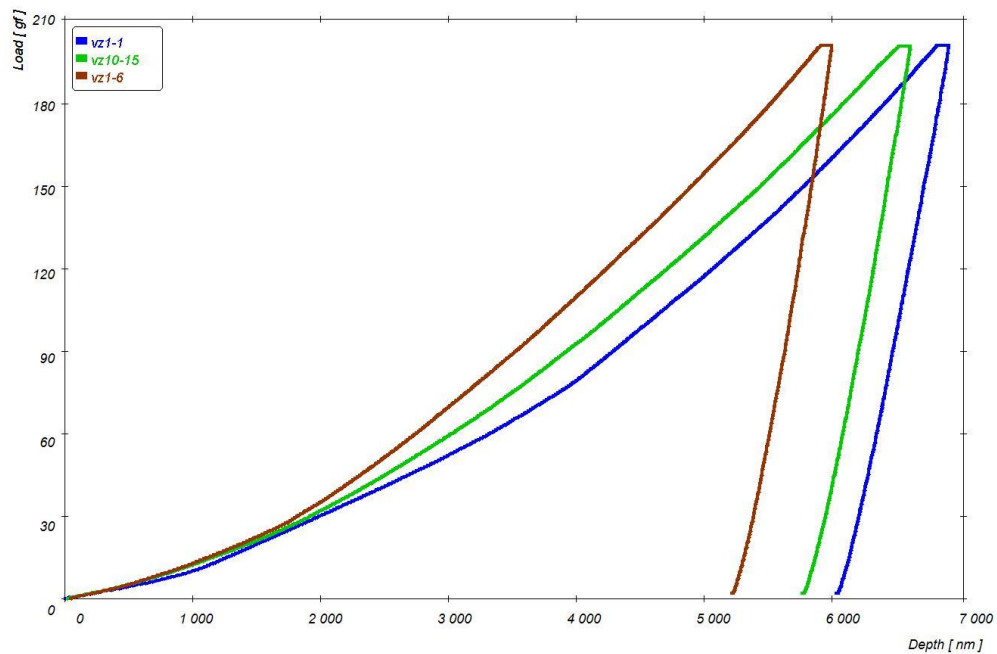


Graf 32 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíženém vzor-ku, vzorku zatíženého 5000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN a 25 kN



Při porovnání měření na vzorcích zatížených 15 kN a 20 kN při stejném počtu cyklů jsou patrné podobné rozdíly jako při porovnání 20 kN a 25 kN. Při 15 kN je ale zpevnění mnohem méně výrazné proti vzorku bez únavového zatížení tj. ještě není výrazná změna ani při povrchu.

Graf 33 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížením 200g na počátečním nezatíženém vzor-ku a vzorků zatíženého 10 000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 15kN a 20kN



Ovšem při dalším růstu zatížení 15 kN se již začíná též zvýrazňovat rozdíl a je výrazněji patrné zpevnění od povrchu do hloubky vzorku po únavovém zatížení.

10. Diskuze výsledků

V rámci této práce byly ověřovány možnosti zachycení průběžných změn při cyklickém únavovém zatěžování vzorků pomocí analýz mechanických vlastností a chování určených zejména pro hodnocení povrchových vlastností materiálů a materiálových systémů. Zaměření bylo zejména na využití nanoindentace jako téměř nedestruktivní analýzy, aby nedocházelo k narušení povrchu a tím způsobení koncentrace napětí. Bylo optimalizováno uchycení únavových vzorků při měření na nanoindentoru a scratch testeru umožnit pro tyto speciální vzorky, které původně nebylo možno do přístrojů uchytit. Dále byly optimalizovány podmínky měření. Po provedení cyklických únavových zkoušek byla využita též metoda scratch testeru pro zachycení změn v kohezivním chování povrchu vzorků, změny plastické deformace a vzniku křehkého porušení na okraji a uvnitř vrypu.

Byla provedena řada únavových experimentů s rozdílným tahovým únavovým zatížením a to 30 kN, dále 20 kN a pro zjemnění změn 15 kN a naopak zesílení zatěžování 25 kN. Postupně vždy po 2500 cyklech a nebo po 5000 cyklech bylo provedeno proměření zkušebních tyčí jedním modelem jednoduchým s rozdílnou velikostí normálového zatížení pro zachycení probíhajících změn jak na povrchu tak v určité hloubce pod povrchem zkušebních tyčí. Dále byla provedena hodnocení s využitím cyklického modu 7 pro zachycení změn do hloubky a pro zachycení změn z pohledu zpevnování materiálu cyklickou indentací. Z indentačních křivek je patrné, že dochází k postupným změnám s růstem cyklů zatěžování a nanoindentace je pro tyto změny dostatečně citlivá. Je patrné, že dochází nejdříve k výraznějším změnám na povrchu a teprve následně prostupuje zpevnění do hlubších vrstev materiálu. Podobně je to s vlivem rostoucí tahové síly při zatěžování rozdílných vzorků. Při 15 kN jsou nejdříve patrné jen změny u povrchu, kdežto v případě 25 kN jsou patrné dříve navíc výraznější změny po cyklickém zatěžování do větší hloubky materiálu.

Na nejvíce zatěžovaném vzorku počtem cyklů 10 000 při amplitudě 20 kN bylo provedeno zhodnocení povrchových změn též vrypovou indentací, která ukázala též dostatečnou citlivost pro zachycení povrchových změn a byly zjištěny změny v poklesu houževnatého porušení snížením plastické deformace a naopak dochází k nárůstu křehkého charakteru porušení a je patrné zpevnění povrchu na základě hodnocení změny v šířce vrypu, hloubky pronikání a zachycení rozdílů v závislosti koeficientu tření na velikosti normálového zatížení v průběhu vrypové indentace.

Experimenty byly dosti časově náročné, a tudíž jsou stavebním kamenem pro další výzkum v této oblasti na ÚT AV ČR, kde byly experimenty realizovány. Cílem je využití nanoindentace pro průběžnou charakterizaci změn po únavovém zatěžování a případně dalších metod prvotně určených pro hodnocení povrchových vrstev materiálů.

11. Závěr

V rámci této práce byly realizovány experimenty prověřující možnosti využití analytických metod zejména nanoindentačních pro hodnocení postupných probíhajících změn při postupném únavovém zatěžování vzorků. Nanoindentační metoda byla optimalizována jak z pohledu uchycení vzorků pro měření a výběru vhodných míst pro měření tak z pohledu nastavitelných parametrů měření. Byla prokázána dostatečná citlivost pro zachycení probíhajících změn na povrchu postupně pronikajících do hloubky materiálu s růstem únavového zatížení. Nanoindentaci lze použít pro zachycení průběžných změn, neboť ji lze brát do jisté míry jako nedestruktivní. Konečný stav byl ověřován též vrypovou zkouškou, kde opět byla prověřena dostatečná citlivost pro zachycení změn od houževnatého charakteru porušení ke křehkému.

Únavové zatěžování bylo provedeno tahově s amplitudou síly 30 kN, 20 kN, 25 kN a 15 kN s růstem počtu cyklů 2500, 5000, 7500 a 10 000 na plochem vzorku. Nanoindentační měření bylo provedeno v modu 2 jednoduchý a modu 7 cyklický pro zachycení změn v různé hloubce s maximálním normálovým zatížením 200 g, 25 g a 5 g. Vrypová indentace pro zachycení průběžných změn byla provedena s indentory Rockwellova typu s poloměrem zaoblení špičky 0.2 mm a 0.5 mm pro zachycení změn ve větší a menší hloubce s proměnnou normálovou silou od 0 N do 50 N a od 0 N do 80 N.

12. Seznam obrázků

Obr. 1 - Únavové porušení válcové pružiny [9].....	5
Obr. 2 - Wöhlerovy křivky a) lineární stupnice b) logaritmická stupnice [2] str. 82.....	6
Obr. 3 - Wöhlerova křivka – meze únavy [2] str. 82.....	6
Obr. 4 - Únavový lom drážkovaného hřídele [9]	7
Obr. 5 - Schématické znázornění únavového lomu [1] - str. 204.....	7
Obr. 6 - Typy průběhu napětí [1] - str. 206	8
Obr. 7 - Smithův diagram [1] str. 208	10
Obr. 8 - Časové změny cyklické odezvy materiálu znázorněné v průběhu cyklických deformačních křivek [5]	11
Obr. 9 - Schématický přehled základních typů únavových lomů a podmínek jejich vzniku [1] str. 205	13
Obr. 10 - Rozdělení únavy podle počtu kmitů [2] str. 85.....	14
Obr. 11 - Únavový stroj pro ohyb za rotace [6]	15
Obr. 12 - Únavový stroj pro ohyb za rotace čtyřbodový ohyb [6]	15
Obr. 13 - Únavový stroj pro ohyb s využitím rotující páky [6]	16
Obr. 14 - Mechanický rezonanční pulsátor [6]	16
Obr. 15 - Záznam napětí působícího v čepu řízení motorového vozidla [6].....	17
Obr. 16 - Zkušební vzorky pro únavové zkoušky [6]	18
Obr. 17 - Indentor a vtisk Brinellovi vnikací zkoušky [10]	21
Obr. 18 - Průběh měření podle Rockwella [11]	22
Obr. 19 - Indentor a vzniklé vtisky po zkoušce dle Vickerse [16].....	23
Obr. 20 - tvar Knoopova indentoru [12]	23
Obr. 21 - Profil vtisku při a po zatížení [18]	24
Obr. 22 - Diagram závislosti síly na čase modu 1 [17]	25
Obr. 23 - Diagram závislosti síly na hloubce vtisku modu 1 [17].....	26
Obr. 24 - Diagram závislosti síly na čase modu 2 [17]	26
Obr. 25 - Diagram závislosti síly na hloubce indentoru modu 2 [17].....	26
Obr. 26 - Schématické znázornění Poldi kladívka [13].....	27
Obr. 27 - Baumannovo kladívko [14]	28
Obr. 28 - Schéma měření pomocí Shoreho skleroskopu[15]	28
Obr. 29 - Schéma činnosti Duroskopu [16].....	29
Obr. 30 - Nanoindentor Shimadzu DUH 202.....	30
Obr. 31 - Scratch tester CSEM REVETEST	31
Obr. 32 - Únavový stroj INSTRON 8502	33
Obr. 33 - Zkušební vzorek - shora.....	34
Obr. 34 - Zkušební vzorek – z boku.....	34
Obr. 35 - Lom vzorku po nakmitaných 2707 cyklech.....	36
Obr. 36 - Srovnání lomů.....	36
Obr. 37 - Vizuální srovnání protažení únavového vzorku s nezatíženým stavem	37
Obr. 38 - Vizuální srovnání protažení vlivem pomalé tahové zkoušky s nezatíženým stavem.....	37
Obr. 39 - Vryp Rockwell 0,2 mm.....	39
Obr. 40 - Vryp Rockwell 0,5 mm.....	40
Obr. 41 - Vtisky Vickers s normálovou silou 10N.....	42

13. Seznam grafů

Graf 1 - Pracovní tahový diagram	35
Graf 2 - Závislost namáhající síly na počtu cyklů u druhého cyklování při amplitudě zatížení 30kN	38
Graf 3 - Závislost velikosti deformace na počtu cyklů u druhého cyklování při amplitudě zatížení 30kN.....	38
Graf 4 - Závislost namáhající síly na počtu cyklů (výřez)	38
Graf 5 - Závislost koeficientu tření na normálové síle – vryp Rockwell 0,2 mm	41
Graf 6 - Závislost koeficientu tření na normálové síle – vryp Rockwell 0,5 mm	42
Graf 7 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 5g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 5000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 15 kN	43
Graf 8 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 25g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 5000 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 15 kN	44
Graf 9 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 5000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 15 kN	44
Graf 10 - Cyklické indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíže-ném vzorku a vzorku zatíženého 5000 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 15 kN	45
Graf 11 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíženém vzor-ku a vzorku zatíženého 5000 a 10 000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 15kN.....	46
Graf 12 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 5g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 2500, 5000, 7500, 10 000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatě-žování 20 kN.....	46
Graf 13 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 25g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 2500, 5000, 7500, 10 000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatě-žování 20 kN.....	47
Graf 14 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 2500, 5000, 7500, 10 000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN	47
Graf 15 - Cyklická indentační křivka s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíže-ném vzorku	48
Graf 16 - Cyklická indentační křivka s maximálním normálovým zatížení 200g na vzorku zatíženém 2500 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN	48
Graf 17 - Cyklická indentační křivka s maximálním normálovým zatížení 200g na vzorku zatíženém 5000 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN	49
Graf 18 - Cyklická indentační křivka s maximálním normálovým zatížení 200g na vzorku zatíženém 7500 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN	49
Graf 19 - Cyklická indentační křivka s maximálním normálovým zatížení 200g na vzorku zatíženém 10 000 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN	50
Graf 20 - Cyklické indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíže-ném vzorku a vzorku zatíženého 2500, 5000, 7500, 10 000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN	51

Graf 21 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 25g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 2500 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 25 kN.....	51
Graf 22 - Cyklické indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 2500 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 25 kN.....	52
Graf 23 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíženém vzor-ku a vzorku zatíženého 2500 a 5000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 25 kN.....	53
Graf 24 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 5g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 2500 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 30 kN	53
Graf 25 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 25g na počátečním nezatíženém vzorku a vzorku zatíženého 2500 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 30 kN.....	54
Graf 26 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíženém vzor-ku a vzorku zatíženého 2500 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 30 kN.....	55
Graf 27 - Cyklické indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíže-ném vzorku a vzorku zatíženého 2500 cykly únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 30 kN.....	55
Graf 28 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 5g na počátečním nezatíženém vzorku, vzorku zatíženého 2500 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN a 25 kN.....	56
Graf 29 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 25g na počátečním nezatíženém vzorku, vzorku zatíženého 2500 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN a 25 kN	56
Graf 30 - Cyklické indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíže-ném vzorku, vzorku zatíženého 2500 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN a 25 kN	57
Graf 31 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 5g na počátečním nezatíženém vzorku, vzorku zatíženého 5000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN a 15 kN.....	58
Graf 32 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíženém vzor-ku, vzorku zatíženého 5000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 20 kN a 25 kN	58
Graf 33 - Indentační křivky s maximálním normálovým zatížení 200g na počátečním nezatíženém vzor-ku a vzorků zatíženého 10 000 cyklů únavového zatěžování s amplitudou zatěžování 15kN a 20kN	59

14. Použitá literatura

- [1] PLUHAŘ,J., KORITTA,J. Strojírenské materiály, SNTL/ALFA Praha 1981
- [2] SKALOVÁ,J. a kol. Základní zkoušky kovových materiálů, Ediční středisko VŠSE, Plzeň 1990
- [3] VĚCHET,S., KOHOUT,J. a BOKŮVKA,O. Únavové vlastnosti tvárné litiny, EDIS,Žilina 2001
- [4] ŠTĚPÁNEK,I.,BLÁHOVÁ,O.,KOLEGA,M. Tenké vrstvy – vytváření, vlastnosti. Plzeň 1994
- [5] RŮŽIČKA,M. Kritéria a postupy při posuzování únavové pevnosti a životnosti konstrukcí, dostupné z http://mechanika2.fs.cvut.cz/sources_old/pzk/6_1.html dne 22.11.2015
- [6] DOWLING,N.,E. Mechanical behaviour of materials, Prentice Hall International Editions, 1993
- [7] dostupné z <http://physics.mff.cuni.cz/kevf/s4r/povrch/uvod.html> dne 24.11.2015
- [8] BUREŠ,J. dostupné z <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-brinell.htm> dne 25.11.2015
- [9] dostupné z http://degradace.tf.czu.cz/LU/page_04.htm dne 27.11.2015
- [10] Diybook, Parkett holzarten im überblick, dostupné z <<https://diybook.de/bauen-renovieren/bodenlegerarbeiten-fliesenlegerarbeiten/holzboden-verlegen/parkett-holzarten-ueberblick#articlegallery>>dne 27.11.2015
- [11] Gordon England, Rockwell hardness test, dostupné z <<http://www.gordonengland.co.uk/hardness/rockwell.htm>> dne 27.11.2015
- [12] Gordon England, Microhardness test dostupné z <<http://www.gordonengland.co.uk/hardness/microhardness.htm>> dne 27.11.2015
- [13] Zadania-seminarky.sk, Skúška tvrdosti poldi kladivkom dostupné z <<http://www.zadania-seminarky.sk/meranie/skuska-tvrdosti-poldi-kladivkom/8198>> dne 27.11.2015
- [14] Macháč, M., Měření tvrdosti materiálů..., dostupné z <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27306> dne 27.11.2015
- [15] Luthmar, Rotor FJ06 – FJ10 wykres... dostupné z <http://pompysrubowe.eu/wykres_wydajnosci_cz1.html> dne 27.11.2015
- [16] Učíme v prostoru, zkoušky mechanických vlastností materiálů dostupné z <http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2076> dne 27.11.2015 21:36
- [17] Instruction manual for DUH-202 Shimadzu dynamic/ultra micro hardness tester, Shimadzu corporation
- [18] Savková, J.,Bláhová, O., Nanoindetačné merania tenkých vrstiev... dostupné z <http://www.kme.zcu.cz/download/seminar/savkova_nanoindentace_25_10_2006.pdf>dne 3.12.2015
- [19] ŠTĚPÁNEK, I.: *ústní informace*
- [20] ŠTĚPÁNEK, I.: *Dokument o činnosti pracoviště*
- [21] dostupné z <https://cs.wikipedia.org/wiki/Ocel> dne 10.3 2016
- [22] DRASTÍK, F. a kol. Atlas použití kovů ve strojírenství, elektrotechnice a v chemickém průmyslu. SNTL, Praha 1980.