

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vybrané mechanické vlastnosti mikrolegovaných otěruvzdorných ocelí

Autor: **Tomáš Růžička**
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Šimeček**

Akademický rok 2014/2015

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr bakalářského 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 Růžička	Jméno Tomáš
STUDIJNÍ OBOR	B2301R016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“	
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Šimeček	Jméno Jiří
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KMM	
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ
		Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Vybrané mechanické vlastnosti mikrolegovaných ořevzdorných ocelí	

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2015
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	45	TEXTOVÁ ČÁST	40	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Hlavním úkolem této bakalářské práce je prozkoumat problematiku únavy mikrolegovaných ořevzdorných ocelí a následné vyhodnocení, zda by bylo tyto materiály vhodné používat pro širší využití ve strojírenské praxi. Zkoušeny dle normy ČSN 42 0363 byly materiály HARDOX 450, HARDOX 500 a ocel třídy 11 k porovnání. Zkoušky únavy jsou doprovázeny dalšími zkouškami a pokusy.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Únava, lom, Wöhlerova křivka, HARDOX, S355J2 + N, vrubovaná tyč, chemická analýza, tvrdost, tahová zkouška, leptání

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Růžička	Name Tomáš
FIELD OF STUDY	B2301R016 “Materials engineering and engineering metallurgy “	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Šimeček	Name Jiří
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR
TITLE OF THE WORK	Selected mechanical properties of microalloyed and resistance to abrasion steels	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2015
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	45	TEXT PART	40	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The main task of that bachelor work is studied problems of fatigue microalloyed and resistance to abrasion steels and subsequent evaluation of whether it would be appropriate to use these materials for wider use in engineering practice. HARDOX 450, HARDOX 500 and steel class 11 to compare are tried by standard ČSN 42 0363. Fatigue tests are accompanied by other supporting tests and experiments.
KEY WORDS	Fatigue, fracture, Wöhler’s curve, bend, HARDOX, S355J2 + N, notched stick, chemical analysis, hardness, tensile test, etching

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Jiřímu Šimečkovi za cenné rady, podněty, připomínky, pomoc a trpělivost v celém průběhu zpracovávání bakalářské práce.

Poděkování patří také konzultantovi práce panu Ing. Miroslavu Hálovi, CSc. za cenné rady a především za ochotu a vstřícnost během zpracovávání celé bakalářské práce.

Obsah

Přehled použitých značek a symbolů	3
Úvod	4
1 Únava materiálu	4
1.1 Poškozování kovů únavou	4
1.2 Únavový lom	5
1.3 Časový průběh únavy	7
1.4 Činitelé mající vliv na únavu	9
1.4.1 Obrábění/tváření válečkováním	9
1.4.2 Tepelná a tepelně-mechanická úprava	9
2 Zkoušky únavy	10
2.1 Metodika a zařízení pro zkoušení únavy	10
2.2 ČSN 42 0363 (únavové zkoušení únavy kovů a jejich slitin).....	11
2.2.1 Postup při zkoušce vysokokmitové únavy se stanovením meze únavy	11
2.2.2 Náležitosti záznamu o zkoušce	12
2.3 Carl Schenck typu PWYG pro zkoušky na únavu s rovinným ohybem a při kmitavém napětí v krutu.....	13
2.3.1 Funkční charakteristika stroje	13
2.3.2 Měřicí a pracovní rozsah	13
3 Zkoušené materiály	13
3.1 Výrobce ocelí HARDOX.....	13
3.2 Výroba mikrolegovaných otěruvzdorných ocelí	16
3.3 Oceli HARDOX	17
3.4 Příprava zkušebních vzorků.....	18
3.5 Typy zkušebních těles	19
4 Chemická analýza	20
4.1 Přístroj GDS500A.....	20
4.2 Získané výsledky chemické analýzy	20
4.3 Vliv dalších prvků na chování materiálu	21
4.3.1 Rozdělení prvků	21
4.3.2 Vlastnosti jednotlivých prvků	21
5 Mechanické zkoušky	23
5.1 Zkoušky tvrdosti	23
5.1.1 Zkouška tvrdosti dle Brinella	23
5.1.2 Zkouška tvrdosti dle Vickerse.....	24
5.1.3 Zkouška tvrdosti dle Rockwella (ČSN 42 0372-81, ČSN 42 0373-78).....	24

5.2	Tahová zkouška	25
6	Kalibrace zkušebního stroje	26
7	Vyhodnocení experimentálního programu	29
7.1	Makrostruktura	29
7.2	Tabulky naměřených hodnot a křivky únavy	34
7.2.1	Hladké o proměnlivém průřezu	34
7.2.2	Vrubované tyče ploché s vrubem	36
7.2.3	Vrubované tyče ploché s otvorem	37
8	Diskuse výsledků	37
9	Závěr	38
	Použitá literatura	39

Přehled použitých značek a symbolů

σ_n - časová změna únavy [MPa]

σ_c - mez únavy [MPa]

n - počet cyklů [-]

R_m - mez pevnosti materiálu [MPa]

σ_h - horní mezní napětí [MPa]

σ_n - dolní mezní napětí [MPa]

σ_m - střední napětí [MPa]

R_e - mez kluzu [MPa]

r_u - součinitel nesouměrnosti [-]

N - počet kmitů do lomu popřípadě do vzniku makrotrhliny [-]

C_e - uhlíkový ekvivalent [-]

GDS500A - atomový emisní spektrometr

CCD - elektronická součástka používaná pro snímání obrazové informace

HV - zkouška tvrdosti dle Vickerse

HB - zkouška tvrdosti dle Brinella

HRC - zkouška tvrdosti dle Rockwella

F - zátěžná síla [N]

F_0 - předběžné zatížení [N]

F_1 - přídavné zatížení [N]

A - plocha vtisku [mm²]

Π - Ludolfovo číslo

η - součinitel poměrného zúžení [-]

μ - konstanta úměrnosti, tzv. Poisonovo číslo [-]

E - modul pružnosti materiálu [MPa]

M_0 - zatěžovací ohybový moment [Nm]

W_0 - modul průřezu materiálu v ohybu [mm³]

Úvod

Hlavním úkolem této bakalářské práce je prozkoumat problematiku únavy mikrolegovaných ořezávacích ocelí a následné vyhodnocení, zda by tyto materiály vhodné používat pro širší využití ve strojírenské praxi. Zkoušení probíhalo na stroji Carl Schenck typu PWYG pro zkoušky na únavu s rovinným ohybem a při kmitavém napětí v krutu. Zkoušeny dle normy ČSN 42 0363 byly materiály HARDOX 450, HARDOX 500 a ocel třídy 11 k porovnání. Zkoušky únavy jsou doprovázeny dalšími zkouškami a pokusy.

1 Únava materiálu

Většina strojních částí či konstrukcí není zatížena konstantně nebo plynule se měnícími silami. Ve většině případů se jedná o neustále se opakující proměnné namáhání (pružiny, hřídele, čepy kol u vozidel, ale i například mosty, ...). Tyto součásti jsou někdy po delší době provozu porušeny, aniž by bylo dosaženo meze pevnosti nebo i meze kluzu, které byly zjištěny experimentálně pomocí statických zkoušek. Mnohdy je napětí i několikrát nižší než napětí při experimentech. V těchto případech se hovoří o únavě materiálu a projevuje se únavovým lomem. Únava je nejčastější příčinou poruch strojních součástí v praxi a to až zhruba v 90 %. Proto je důležité poznat podmínky vzniku únavových lomů. Následné zhodnocení materiálů z tohoto hlediska je důležité kvůli snaze o zajištění provozní bezpečnosti a životnosti strojních součástí při maximálním využití materiálu bez zbytečných rezerv. [1]

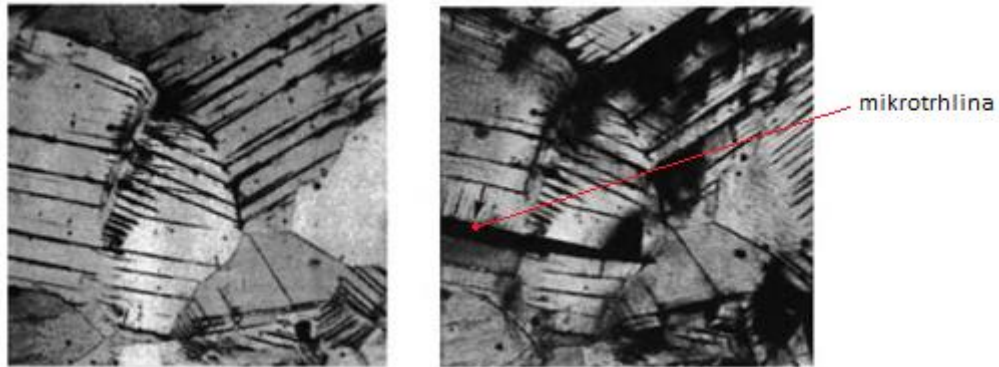
1.1 Poškození kovů únavou

Kdyby byla jakákoliv součást zatěžována pouze silou, která vyvolává pouze čistě pružnou cyklickou deformaci, tak ani při libovolně velkém počtu kmitů nelze dosáhnout vnitřní změny v materiálu. To znamená, že únavový proces je podmíněn střídavou plastickou deformací, která vede ke zvyšování poruchovosti mřížky, spojování poruch až k následnému vzniku poškození. [1]

Celý proces poškození únavou lze rozdělit do čtyř stádií:

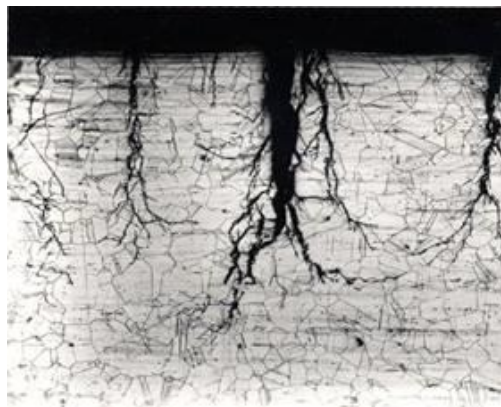
- a) **stádium únavy** - zvětšování hustoty mřížkových poruch a nerovnoměrnosti jejich rozložení vede ke vzniku pásů s vysokou dislokační hustotou. Zároveň s tím jsou měněny strukturně citlivé vlastnosti až do určité hodnoty, která pro dané podmínky odpovídá stavu nasycení. Kvůli tomu jsou měněny mechanické vlastnosti a s tím samozřejmě i odpor proti deformaci. Projevuje se i na závislosti amplituda napětí – amplituda plastické deformace, která při cyklickém zatěžování vytváří hysterezní smyčku. Je měněn tvar i plocha smyčky. Údaje, které definují hysterezní smyčky téhož materiálu, odpovídající nasycenému stavu při různých podmínkách cyklického zatěžování (cyklická deformační křivka), patří k základním charakteristikám chování materiálu při únavě. [1]
- b) **stádium únavy** - vznik zárodků mikrotrhlin v místech na povrchu, kde je největší soustředění poruch. Negativní ovlivnění povrchu je způsobeno zejména předchozím zpracováním (oduhlíčení, vnitřní pnutí, ...), opotřebením nebo někdy i

znehodnocením koroze. Nehledě na to, že při namáhání ohybem nebo krutem jsou nejvíce namáhána právě krajní vlákna. Zárodky trhlin (obr. 1) mohou vznikat také uvnitř součásti a to v místech, kde se vyskytují vměstky nebo technologické vady, které mají charakter trhliny. Únavovou životnost i mez únavy je tedy možné zvýšit vyloučením vrubů a vytvořením příznivých tlakových vnitřních pnutí v této vrstvě. Žádoucího tlakového poměru lze dosáhnout zpevněním, tepelným nebo chemicko-tepelným zpracováním. [1]



Obr. 1 - skluzové linie před a po začátku namáhání. [2]

- c) **stádium únavy** - počáteční růst mikrotrhlin, jejichž růst je záhy zastaven. Poté roste již jen hlavní trhlina, šířící se transkrystalicky (obr. 2) ve směru kolmém na normálové napětí. Tímto je neustále zmenšována nosná plocha součásti. [1]



Obr. 2 - transkrystalické šíření trhliny. [3]

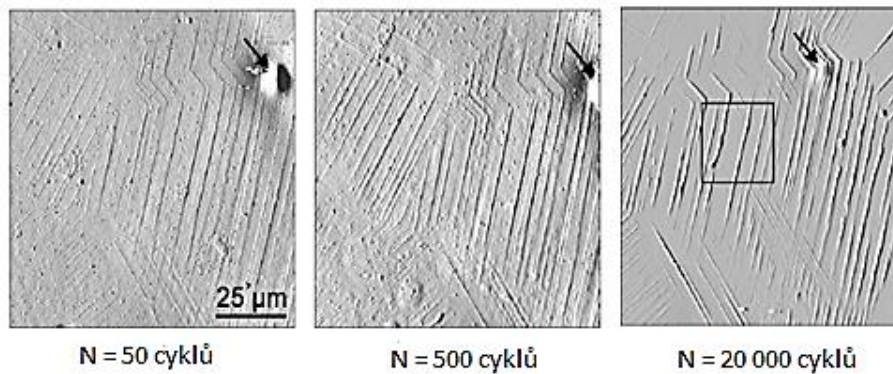
- d) **stádium únavy** - vlastní lom, který se skládá ze tří částí: ohniska, vlastního lomu a zbytkového lomu (obr. 4).

1.2 Únavový lom

Lom, který vznikl při vysokocyklové únavě má tři rozlišitelné části odlišného charakteru:

1. **Ohnisko lomu** – též východisko lomu je místo, kde vychází hlavní trhlina (lom), který zapříčiní lom součásti. [1]

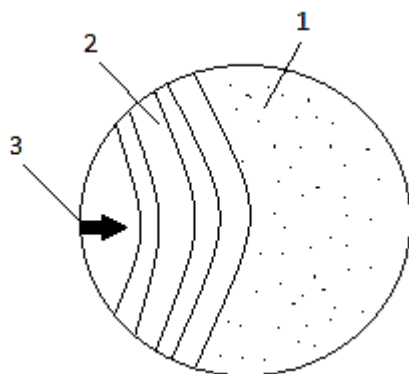
2. **Vlastní únavový lom** – hladká většinou rovinná část lomové plochy bez známek makroskopické plastické deformace, která odpovídá šíření hlavní únavové trhliny. Na líci únavového lomu bývají makroskopicky patrné postupové linie šíření trhliny, odpovídající jednotlivým přetížením nebo změnám provozních podmínek. Lokální mikroplastická deformace před čelem trhliny, uskutečňující se vždy jen v té části zátěžného cyklu, který trhlinu rozvírá, vytváří na lomovém povrchu mikroskopické žlábkování (“striace”). Striace jsou nesporným důkazem únavového lomu. Z tvaru postupových linií lze určit jedno nebo někdy i více ohnisek lomu. [1]



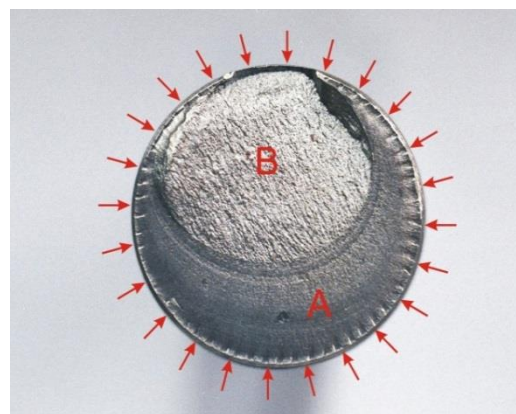
Obr. 3 - šíření únavových striací. [4]

3. **Zbytkový lom** – odpovídá náhlému silovému dolomení zeslabeného nosného průřezu. Povrch zbytkového lomu (obr. 5) je nepravidelný, většinou hrubozrnný a někdy na něm můžou být znatelné známky plastické deformace. [1]

Při bližším zkoumání lomů lze stanovit úroveň a druh namáhání, který součást musela snášet a většinou lze i podmínky provozu a příčiny porušení.



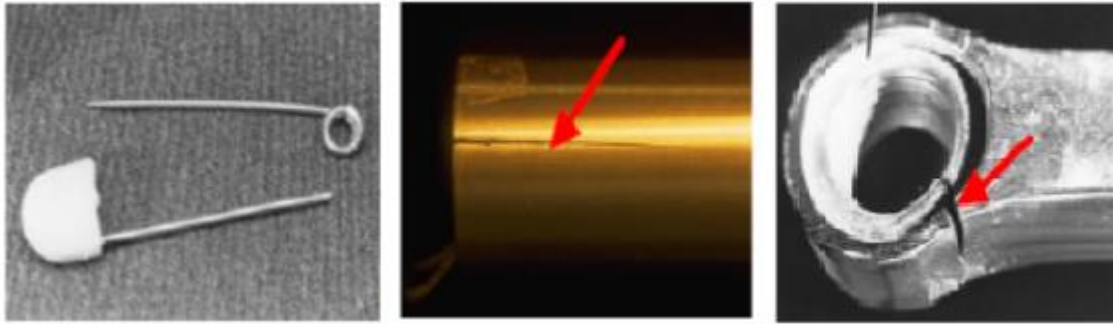
Obr. 4 - schéma lomu.



Obr. 5 - hřídel poloosy vozidla [5].

- 1 - zbytkový lom
2 - únavový lom s postupnými liniemi šíření
3 - oblast východiska lomu

- A - únavový lom
B - zbytkový lom



Obr. 6 - praktické příklady únavových lomů. [4]

1.3 Časový průběh únavy

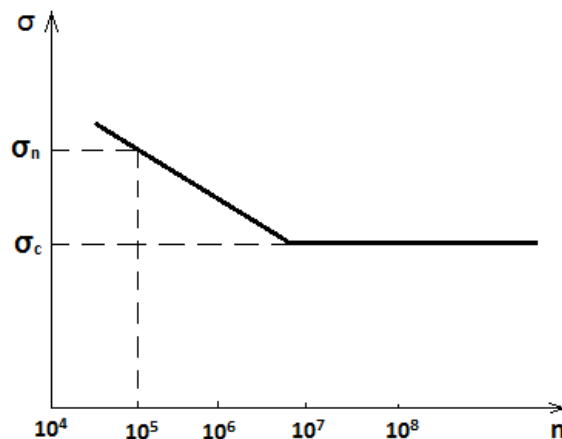
Při únavovém namáhání má životnost dvě složky:

- doba do vzniku zárodků a trhlin
- doba šíření trhliny ze vzniklého zárodku až do lomu

Celková životnost se určuje počtem kmitů do lomu, který je určen z experimentálně zjišťované únavové křivky, tzv. Wöhlerovy křivky a ta se zanáší do diagramu.

Únavová křivka vyjadřuje závislost plastické deformace nebo výkmitu napětí na počtu zátěžných cyklů do lomu. Jednodušeji je křivka složena z napětíových parametrů a výsledný diagram je nazýván Wöhlerův (obr. 7).

Nejvýznamnější charakteristikou, která je z diagramu získávána, je mez únavy σ_c (největší opakované napětí, které by teoreticky materiál dokázal snášet trvale, aniž by došlo k lomu). [1]



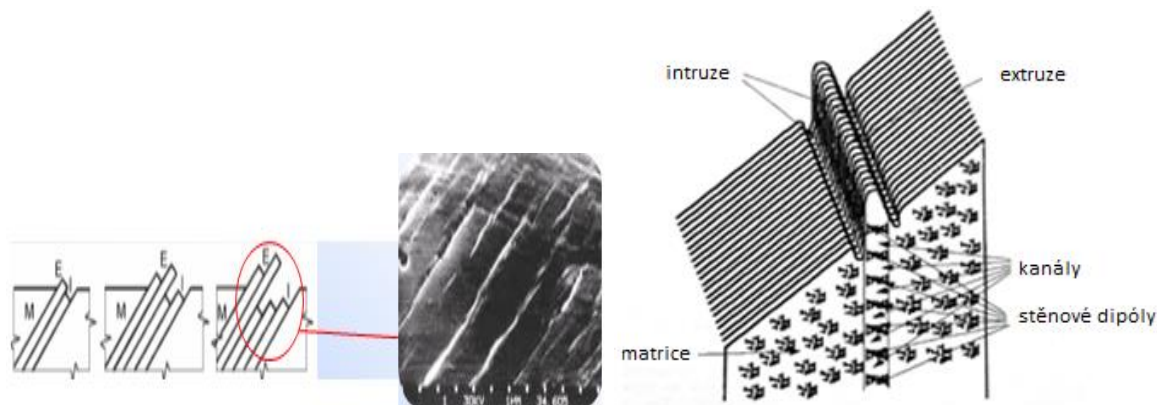
Obr. 7 - Wöhlerova křivka
(σ_n – časová změna únavy; σ_c – mez únavy)

Průběh a trvání jednotlivých etap únavy závisí na velikosti cyklické plastické deformace. Nastávají dva druhy:

- Střídavá makroplastická deformace**, která je obecně výsledkem zatěžování napětím okolo meze kluzu nebo nad mez kluzu. Kov rychle zpevňuje a vyčerpává se možnost

další plastické deformace. Počet cyklů do nukleace mikrotrhlin je malý a životnost do lomu závisí především na rychlosti šíření hlavní trhliny. Tento případ je nazýván nízkocyklovou únavou a počet cyklů do lomu obvykle nepřesahuje 10^4 . [1]

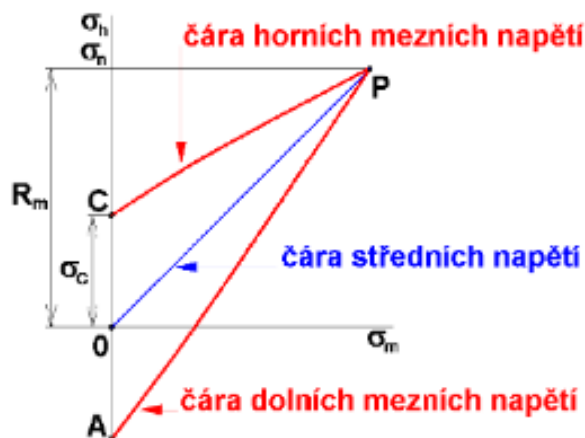
2. **Mikroplastická deformace** ve struktuře v místech, kde je koncentrací napětí dosaženo jeho kritické skluzové hodnoty. Proces probíhá při napětích pod makroskopickou mezí kluzu. Poškození je hromaděno pomalu a doba nukleace je rozhodující pro únavovou životnost. Jedná se o vysokocyklovou únavu, zde přesahuje počet cyklů do lomu 10^5 . [1]



Obr. 8 – vznik mikrotrhlin v matrici vznikem intruzí a extruzí v jednom skluzovém systému. [4]

Reliéf povrchu součásti je se zvyšujícím se počtem cyklů, při kterém je součást namáhána, měněn. V součásti roste počet intruzí (I) a extruzí (E), což je jev, kdy vystupují nebo se naopak propadají rovinné útvary v základní matrici (obr. 7). Jejich počet je s počtem cyklů lineárně zvyšován až do konce únavové životnosti. [4]

O odolnosti materiálu při jiném než pravidelném cyklickém namáhání dává přehlednou informaci Smithův diagram (obr. 8). Závislost horních σ_h a dolních σ_n mezních cyklů a jejich středního napětí σ_m . Je určen amplitudou meze únavy materiálu σ_c (bod C) a její zápornou hodnotou (bod A) a mezi pevnosti materiálu R_m (bod P).



Obr. 9 - Smithův diagram [6].

1.4 Činitelé mající vliv na únavu

Životnost a charakter poškození ovlivňuje řada vnějších ale i vnitřních činitelů. Z vnějších jsou to druh, velikost a časový průběh napětí, teplota, atd. Z vnitřních jsou to materiál a jeho vlastnosti (pevnost, ...), plasticita, lomová houževnatost, atd.

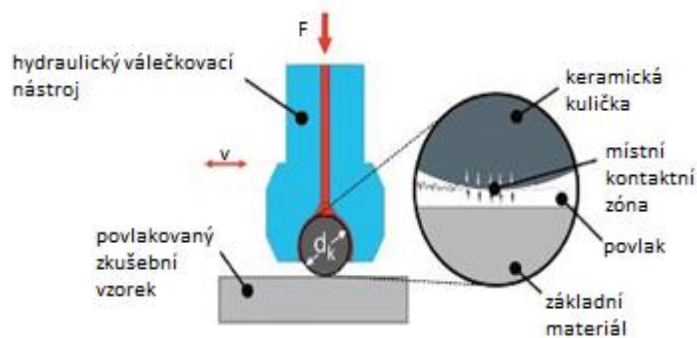
Nejvíce mez únavy a životnost snižují vruby. Vruby mohou být různé:

- konstrukční – zápich, otvor, změna průřezu, ...
- technologické – stopy po obrábění, okuje, ...
- strukturní – heterogenita, vměstky, ...

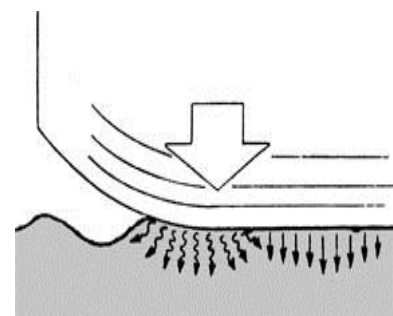
Únavové poškození začíná vždy na povrchu tělesa, z toho plyne, že by se mělo nejvíce zaměřovat na povrch a uvést ho do nejlepšího možného stavu. To znamená vyvarování se vrubům a vytvoření příznivého tlakového vnitřního pnutí v této vrstvě. Takového vnitřního pnutí lze například dosáhnout deformačním zpevněním (kuličkování, válečkování) povrchu nebo určitým tepelným nebo chemicko-tepelným zpracováním (cementování, nitridování). Za předpokladu, že je dokonale připravený povrch bez nečistot. Ovšem mnohdy není možné deformačně zpevňovat a také chemicko-tepelné zpracování nemusí být žádané.[1]

1.4.1 Obrábění/tváření válečkováním

Válečkování (obr. 10 a 11) je beztržisková metoda obrábění, která zlepšuje kvalitu povrchu bez jakéhokoliv úběru materiálu. Válečkovací nástroje fungují na principu přitlačení odvalovaného tvrdého prvku k povrchu obrobku, čímž na povrchu obrobku vyvinou tlak, který překračuje mez kluzu materiálu. Takto jsou srovnány na povrchu soustruženého obrobku výstupky a prohlubně, čímž je povrch zhutněn a stane se rovnoměrným. Tato beztržisková metoda obrábění odstraňuje vady a nerovnosti povrchu s přesností na tisícinu milimetru. Výhoda válečkování je také v jeho jednoduchosti. [7]



Obr. 10 - válečkování [7].



Obr. 11 - válečkování – povrch [8].

1.4.2 Tepelná a tepelně-mechanická úprava

Termomechanické zpracování niobem nebo vanadem mikrolegovaných jemnozrnných ocelí metodou řízeného válcování. Řízením teploty, času a úběru při válcování je dosaženo velmi jemného austenitického zrna, které při rychlém ochlazení transformujeme na

jemnozrnný ferit s vysokými hodnotami meze kluzu a nízkou tranzitní teplotou. To znamená, že je ocel mikrolegována Nb nebo V a řízeně je tepelně zpracovávána a tvářena.

Termomechanické zpracování deformací před transformací, je děleno na dvě části:

- a) Vysokoteplotní termomechanické zpracování, což je tváření ještě stabilního austenitu s následným rychlým ochlazením v čase kratším, než je čas nutný na rekrystalizaci. Zvýšena je pevnost a lomová houževnatost.
- b) Nízkoteplotní termomechanické zpracování, které je založeno na deformaci (kolem 50 %) nestabilního austenitu během inkubační periody a jeho zakalením na martenzit s následným popouštěním při teplotách nižších než 200 °C.

Deformace během transformace, při průběhu perlitické transformace při teplotách mezi 600 – 700 °C a následným ochlazením na vzduchu. Tímto pochodem je dosaženo malého zvýšení pevnosti, ale podstatného zvýšení houževnatosti.

Deformace po transformaci je vyznačována malou deformací martenzitu za studena 1 – 5 %. Toto zpracování zvyšuje mez kluzu materiálu při současném poklesu hodnot tažnosti a lomové houževnatosti. [9]

2 Zkoušky únavy

Při zkouškách je únavové namáhání vyvozováno cyklickým napětím okolo určité stálé hodnoty napětí normálového σ_m nebo smykového τ_m . Dle časové nesouměrnosti výkmitu rozeznáváme tyto typy kmitů:

- a) pulsující
- b) míjivý
- c) souměrný střídavý
- d) nesouměrný střídavý
- e) nepravidelný opakující se
- f) nepravidelný náhodný

Výsledky zkoušek jsou vynášeny buď do Wöhlerova anebo Smithova diagramu, který udává přehlednou informaci o odolnosti materiálu proti porušení při opakovaném namáhání kombinovaném se statickým předpětím. K sestavení diagramu stačí znát hodnoty meze únavy (σ_e) při souměrném střídavém namáhání, hodnoty meze únavy při míjivém namáhání a mez kluzu R_e . [1]

2.1 Metodika a zařízení pro zkoušení únavy

Všechny předpisy, které se týkají zkoušení a samotného vyhodnocení jsou zapsány v normách ČSN 42 0362-75, ČSN 42 0363-73 a ČSN 42 0368-73. Ke zkouškám jsou používány speciální stroje, které vyvozují cyklické namáhání zvoleného druhu. Při mechanickém nebo hydraulickém zatěžování jsou značné nároky na čas, kvůli malým zatěžovacím frekvencím. Proto jsou ve většině případů využívány vysokofrekvenční pulsátory, kde je napětí vyvozeno elektromagneticky rozkmitávaným závažím a výsledky jsou získávány do 2-3 dní.

Současný trend vývoje v této problematice směřuje k celkové automatizaci a k tomu, aby opravdu každá zkoušená součást měla stejné podmínky jako ta předchozí a ta následující. Prozatím jsou výsledky ze zkoušek brány informativně. Další trend je zkoušet celé konstrukce a strojní díly, což potřebuje buď speciální stroje, nebo speciální přípravky. [1]

2.2 ČSN 42 0363 (únavové zkoušení únavy kovů a jejich slitin)

V této normě jsou uvedeny postupy při zkoušení vysokokmitové a nízkokmitové únavy, rozměry a tvary zkušebních těles a způsoby záznamu a znázornění výsledků zkoušek. Zkouška slouží k získání hodnot základních charakteristik a podkladů o chování kovů za působení cyklického zatížení.

Při provádění zkoušky je dbáno na stálost teploty $20 \pm 10^\circ\text{C}$ a chemicky neagresivní prostředí. Řídí se buď síla anebo deformace a amplituda zatížení nastavená na počátku zkoušky se v jejím průběhu nemění. V tomto případě je zkoumána únava v plochem ohybu a to znamená, že na tyč je působeno proměnlivým ohybovým momentem, který působí ve stejné rovině po celou dobu zkoušení. Pro tento typ zkoušení je používáno tyčí s kruhovým průřezem a tyčí plochých.

U výroby zkušebních tyčí je dbáno v první řadě na to, aby nedošlo k zeslabení průřezu v přechodu do zkoušené části. Délka zkušební tyčinky je volena s ohledem na možnost vybočení při tlakové části kmitu. Kdyby bylo nutné zjistit vliv povrchu zkušební tyčinky, zkoušeno by bylo více druhů těles s různě upraveným povrchem (neupraveným) a následně by se výsledky zkoušek porovnály. Průměr válcové části zkoušených těles se pohybuje v rozměrech od 5 do 15 mm a na místech úchyty je průměr zvětšený a přechází rovnoměrně do zkoušené části. U zkušebních tyčí plochých se pohybuje rozměr čtvercové části v rozměrech od 3 do 15 mm a hrany musí být zaobleny na R 0,05 až R 0,1 mm kvůli možnému praskání v těchto místech. Tělesa musí být na konci výroby broušeny a poté i leštěny a následně vhodně konzervovány.

V normě jsou rozepsány parametry ke zvláštním únavovým zkouškám, jakými jsou například zkouška za vysokých a nízkých teplot nebo zkouška za koroze. [2]

2.2.1 Postup při zkoušce vysokokmitové únavy se stanovením meze únavy

1. Při zkouškách je stanovován u odstupňovaně namáhaných zkušebních tyčí počet kmitů do úplného zlomení, nebo do stanoveného počtu kmitů u ocelí 10^7 . Pro ukončení zkoušky mohou být kromě lomu přijata i jiná kritéria (např. vznik viditelné trhliny), což je následně uvedeno v záznamu o zkoušce.
2. Počet zkušebních tyčí závisí na charakteru požadovaných informací, které má únavová zkouška poskytnout. Pro stanovení šikmé větve únavové křivky tvoří jednu skupinu nejméně 8 tyčí.
3. Namáhání první zkušební tyče je voleno tak, aby došlo k lomu. U dalších je postupně snižováno, až jsou zajištěny mezní hodnoty napětí, při nichž zkušební tyč ještě vydrží počet kmitů zvolených za základ pro stanovení meze únavy.
4. Mez únavy je stanovena na základě kontrolní zkoušky nejméně ještě jedné další tyče. Zkouška je vykonána při stejném napětí nebo při napětí o 15 MPa menším, než je hodnota zjištěna první zkouškou. Ani při této zkoušce nesmí dojít ke zlomení tyče do počtu kmitů, který byl zvolen pro stanovení meze únavy. Jinak je nutno pokračovat při nižších hodnotách napětí.

5. Rozdíl mezi výkmitem napětí u tyče, kde došlo při únavové zkoušce ještě k lomu a mezním výkmitem napětí u nezlomené tyče, při základu kmitů nemá být větší než následující hodnoty:
3 MPa je-li mezní amplituda menší než 100 MPa
5 MPa je-li mezní amplituda od 100 do 200 MPa
10 MPa je-li mezní amplituda přes 200 do 400 MPa
15 MPa je-li mezní amplituda větší než 400 MPa
6. Pro stanovení únavové křivky a meze únavy je běžně použito nejméně 10 zkušebních tyčí z jedné skupiny.
7. Při upínání zkušebních tyčí je nutno dbát, aby se zamezilo vzniku přidavných namáhání od upnutí.
8. Zatěžování tyčí na zkušebním zařízení musí být plynulé a hlavně bez rázů. Při zkouškách v ohybu za rotace je nutno zatěžovat již rotující zkušební tyč.
9. Podle způsobu namáhání jsou hodnoty buď středního nebo dolního napětí kmitu nebo součinitele nesouměrnosti r_u celé skupiny tyčí stejné.
10. Zkušební tyče, u nichž došlo k porušení v místě upnutí, nebo v zesílených částech přechodu do hlavy se neuvažují pro hodnocení celkových výsledků. Zkušební tyče, u nichž došlo k porušení v kořeni přechodu do hlav, je možno uvažovat do souboru výsledků, pokud nevybočují z celkového rozptylového pásma.
11. V průběhu zkoušky je třeba kontrolovat stálost nastaveného zatížení. Zkoušku pokud možno nepřerušovat! Působí-li vysoká zátěž při přerušení zkoušky např. v ohybu za rotace trvalou deformaci tyče, je zkouška neplatná.
12. Při únavových zkouškách je doporučeno podle možnosti zjišťovat okamžik vzniku únavové trhliny zjizvitelné optickými nebo jinými vhodnými metodami např. potenciometrickými.
13. Pokud je ke stanovení nebo vyhodnocování základních nebo únavových charakteristik použito jiných metod, musí být se zdůvodněním uvedeny v záznamu o zkoušce. [10]

2.2.2 Náležitosti záznamu o zkoušce

1. Údaje o materiálu vztahující se k únavové zkoušce (značka jakosti, údaje o technologickém zpracování, hodnoty základních mechanických vlastností, atd.)
2. Přesný popis zkušební tyče (tvar, rozměry, orientace polohy vůči směru tváření, údaje o jakosti povrchu povrchové úpravy, atd.)
3. Popis zkušebního stroje nebo zařízení (typ, řídicí systém, použitý rozsah nebo stupnice zatížení)
4. Údaje o použité frekvenci zatěžovaných kmitů a jejich časový průběh, základ počtu kmitů pro stanovení meze únavy případně doba trvání zkoušky
5. Druh a způsob namáhání, parametry napětí popřípadě deformace
6. Informace o změnách velikosti zatížení, o změnách teploty zkušební tyče zjištěných v měřeních v průběhu zkoušky, o způsobu případného chlazení
7. Počet kmitů N do konce lomu popřípadě do vzniku makrotrhliny nebo do jiného kritéria pro ukončení zkoušky
8. Informace získané pozorováním vzniku a růstu únavové trhliny, fraktografickým řešením únavového lomu (východisko, poloha, charakter lomu, směr jeho únavové části k silovému dolomu, materiálové vady)
9. V případě odlišnosti podmínek zkoušky od předpisu normy je nutno tuto okolnost výslovně uvést v záznamu o zkoušce
10. Tabele přehled naměřených výsledků, popis metody jejich zpracování, grafické znázornění
11. Doba zahájení a ukončení zkoušky popřípadě údaje o jejím přerušení [10]

2.3 Carl Schenck typu PWYG pro zkoušky na únavu s rovinným ohybem a při kmitavém napětí v krutu

Zkušební stroj slouží ke stanovení meze únavy materiálů při kmitavém napětí na základě dynamických zkoušek krutem nebo ohybem.

Zařízením pro předpětí je možné vytvořit statický moment, takže se dá zjišťovat kromě meze únavy při souměrném střídavém namáhání také mez únavy při momentu předpětí a superponovaném střídavém momentu, např. ke stanovení diagramů meze únavy při kmitavém napětí.

2.3.1 Funkční charakteristika stroje

Motor pohání hřídel s nastavitelným excentrem. Ojnice uložená na výstředníkovém čepu je spojena křížovým kloubem s pákou, která je připevněna na hřídeli svěrným spojem. Pohybem ojnice je zaváděn na hřídel krouticí moment. Vzorek je upevněn mezi torsním hřídelem a zařízením pro měření momentu upevněném na loži stroje.

Dle použitého upínacího zařízení je možné zkušební tyče namáhat na krut či ohyb.

Zařízení pro měření momentu obsahuje cejchovanou pružinovou tyč, jejíž deformace se měří číselníkovým indikátorem a je měřítkem pro namáhání. [11]

2.3.2 Měřicí a pracovní rozsah

Moment kmitu.....	± 7 až ± 50 mkp
Statický moment předpětí.....	0 až 100 mkp
Nejvyšší složený moment.....	100 mkp
Frekvence zatěžovacích cyklů za minutu (připojitelná)	
Při síťové frekvenci 50 Hz cca.....	1500 a 3000
Při síťové frekvenci 60 Hz cca.....	1160 a 1750
Úhel kmitu:	
Při frekvenci zatěžovacích cyklů 1500/min, maximálně ± 7°30'	
Při frekvenci zatěžovacích cyklů 3000/min, maximálně ± 6°	
Nejvyšší upínací délka (vzdálenost mezi připojovacími přírubami) 750 mm	
Příkon poháněcího motoru (trojfázový proud) cca 5,5 kW [11]	

3 Zkoušené materiály

3.1 Výrobce ocelí HARDOX

Otěruvzdorné plechy HARDOX byly dodány od české firmy Gamaocel s r.o., která spolupracuje se švédskou firmou SSAB Oxelösund AB, která je jejich dodavatelem.

SSAB je ocelářská společnost s globálním dosahem a nákladově efektivním a flexibilním výrobním systémem, která sídlí v USA. Jsou předními výrobci na světovém trhu vysokopevnostních ocelí, tvrzených ocelí, standardních pásů, desek a trubkových výrobků stejně jako dalších různých konstrukčních řešení. Řídí se vizí, která zní: „silnější, lehčí a udržitelnější svět“. Přispívají k nižší hmotnosti, zvýšení pevnosti a životnosti konečného produktu.

Ve výrobních závodech ve Švédsku, Finsku a USA je každým rokem vyprodukováno 8,8 milionu tun oceli. V Číně a dalších zemích lze dokončit další ocelové výrobky. Ve

Švédsku a Finsku je proces výroby prováděn ve vysokých pecích, v USA je ocel vyráběna ze šrotu v elektrických obloukových pecích.

V dnešní době má firma kolem 17 300 zaměstnanců v 50 zemích světa. Založena byla roku 1878 a zkoušenou ocel HARDOX začali vyrábět poprvé v roce 1974.

SSAB se specializuje na výrobu ocelí, jako jsou HARDOX, DOMEX, DOCOL, WELDOX, PRELAQ, ARMOX a TOOLOX. [12]

Popis sortimentu:

- a) **Domex** jsou za tepla válcované pásy, které jsou používány v aplikacích, jako jsou lodě, mosty, budovy, stroje, různé typy vozidel, zdvihací zařízení, nádrže a kontejnery. Pro splnění různých konstrukčních požadavků jsou Domex oceli vyráběny se zaručenou mezí kluzu v rozmezí od 220 do 1200 MPa v tloušťkách od 2 do 16 mm. Spojují vysokou pevnost s dobrou tvářitelností. Díky vysoké pevnosti, může dojít ke snížení váhy objektů (až o 40%), což je obzvláště užitečné např. při výrobě koreb či kontejnerů (obr 12). [13]



Obr. 12 – využití oceli typu Domex. [12]

- b) **Docol** je v současné době jednou z nejpevnějších za studena válcovaných vysokopevnostních konstrukčních ocelí na trhu. Jsou jím zajišťovány nejen silné komponenty, ale i konstrukce pro automobilový průmysl, také přispívá k zlehčení výrobků, a tím snižování emisí CO₂. Docol je používán na nárazníky, kostry automobilů a sedaček a na lehké nákladní automobily (obr. 13). [12]



Obr. 13 – využití oceli typu Docol. [12]

- c) **Weldox** jsou vysoce pevné plechy, jejichž podstatou je dosažení daného pevnostního stupně při zachování co nejlepší svařitelnosti. Konstrukční plechy Weldox jsou uplatňovány při stavbě mostů, ocelových budov, sil, buldozerů, nakladačů (obr. 14) a mnoha dalších aplikacích, při kterých je důležitá houževnatost, pevnost a dokonalá svařitelnost. Jsou legovány vodou, což zaručuje nízké hodnoty uhlíkového ekvivalentu a z toho plynoucí vynikající svařitelnost. Mez kluzu se pohybuje od 420 do 1100 MPa. [12]



Obr. 14 – využití oceli typu Weldox. [13]

- d) **Prelaq** je ocelový plech vhodný pro vnější stavební výrobky, jako jsou plechové profily pro střešní krytiny (obr. 15) a fasády, prefabrikované stěnové panely, stěnové a stropní kování a plechové střešní tašky. [12]



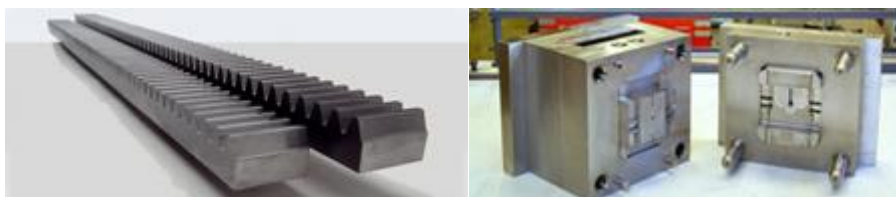
Obr. 15 – využití oceli typu Prelaq. [12]

- e) **Armox** je vysoce odolný plech používaný tam, kde je osobní bezpečnost zásadní (obr. 16). Jde o neprůstřelný plech, který prochází rozsáhlým balistickým testováním za účelem splnění přísných mezinárodních kritérií. [13]



Obr. 16 – využití oceli typu Armox. [14], [15]

- f) **Toolox** je charakterizován výbornou obrobiteľnosťou v kombinaci s vysokou tvrdostí, která byla dosažena díky výrobní technologii. Ocel je určena pro výrobu forem, lisovacích nástrojů a částí strojů. Vynikající lešitelnost a leptatelnost. Příkladem využití jsou formy pro plasty, formy pro pryže, formy pro lisování, držáky, kolíky a nástroje. [23]



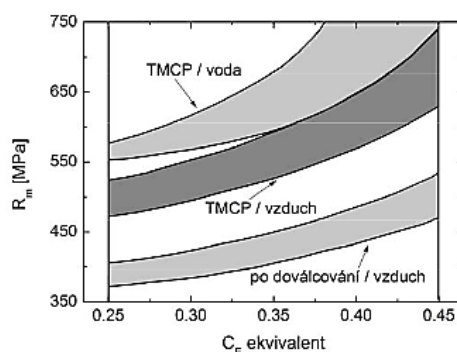
Obr. 17 – využití oceli typu Toolox. [12]

3.2 Výroba mikrolegovaných otěruvzdorných ocelí

Termomechanické zpracování oceli je konvenční způsob výroby polotovarů, který se začal průmyslově využívat na základě hlubších teoretických poznatků z teorie dislokací. Materiály jsou zpevňovány nejen pomocí substitučního, intersticionálního a precipitačního zpevnění, ale výraznou roli hraje hustota dislokací a podíl dislokačního zpevnění.

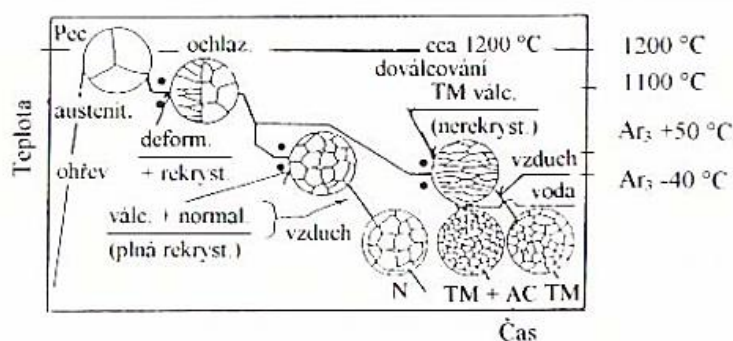
Termomechanického zpevnění je dosahováno řízenou kombinací tváření materiálu a jeho fázovými a strukturními přeměnami. Současného zvýšení pevnostních i plastických vlastností lze takto dosáhnout u ocelí nízkolegovaných, které obsahují 0,4 - 0,6 % C.

Vlastnosti se lepší se stupněm zpevňování zrn. Termomechanické zpracování je složeno z řízeného ovládnání procesu tváření a následného zrychleného ochlazování bez dalšího tepelného zpracování. Je docíleno také toho, že je snížen uhlíkový ekvivalent (C_e), (obr. 18), jsou sníženy teploty při předehřevu při svařování a je zvýšena odolnost proti vodíkovému křehnutí. [9]



Obr. 18 - graf změny uhlíkového ekvivalentu. [16]

Přednost spojení řízeného válcování s řízeným ochlazováním v porovnání s normalizačním je zřejmé z následujícího obrázku. Výsledkem je jemnozrná nerekrystalizovaná struktura a její zrovnomnění (obr. 19). [9]



Obr. 19 - vývoj struktury při zpracování ocelí. [9]

Termomechanické procesy v aplikaci se zrychleným ochlazováním vedou ke zvýšení vlastnosti vysokopevných ocelí cestou výrazného ovlivnění struktury:

- a) Zjemnění zrn feritu
Zjemnění disperzně vyloučených sekundárních fází
- b) Tvorbu lokalizovaných oblastí rovnoměrně distribuovaných strukturních ostrůvků perlitu na místo perlitických pásů [9]

3.3 Oceli HARDOX

Univerzální otěruvzdorný plech s ideální kombinací mechanických vlastností, které splňují ty nejnáročnější kritéria pro výrobu a použití v extrémních i běžných podmínkách. Díky kombinaci vysoké tvrdosti, pevnosti a dobré houževnatosti představuje plech HARDOX optimální řešení pro situace, kdy příčinou problémů a opotřebení bývá otěr. Vysoká odolnost proti opotřebení otěrem zvyšuje životnost součástí. Tvrdost desky se dosahuje účinným kalením ve vodě na kalicí lince. Díky tomu má plech vysokou tvrdost i přes to, že v oceli je málo legovacích prvků. Výsledkem je plech, který se snadno zpracovává, ohýbá a svařuje.

Plechy HARDOX jsou dodávány v několika typech, lišících se úrovní dosažené tvrdosti. V současné době jsou k dispozici následující materiály: HARDOX 400, HARDOX 450, HARDOX 500, HARDOX 550, HARDOX 600 a HARDOX HiTuf. Číslo v označení materiálu odpovídá dosažené tvrdosti podle Brinella (HB). Vyjímá se jen označení HiTuf, které označuje materiál pro nejnáročnější aplikace. Lze si tak vždy zvolit materiál o tvrdosti, která vyhovuje potřebám. [17]

V případě této bakalářské práce byly zkoušeny materiály:

- a) **HARDOX 450** je ocelový plech. Byl původně vyvinut jako odpověď na požadavky výrobců koreb, kteří chtěli vyšší tvrdost než Hardox 400, ale při zachování příznivých technologických vlastností. V současné době se stává novým standardem otěruvzdorných ocelí. Tvrdost je 425–475 HB. Zvýšení tvrdosti o 50 HB (oproti původnímu standardu „400 HB“) přináší významné zvýšení životnosti, zejména ve středně a výše tvrdých horninách a minerálech. Houževnatost této oceli je vyšší než houževnatost jiných otěruvzdorných ocelí tvrdosti 400 HB. Je to ocel, která umožnila konstrukci bezvýztuhových koreb. [22]

Chemické složení dle tloušťky plechů: (zkoušené plechy měly tloušťku 6 mm)

Tloušťka [mm]	C max. %	Si max. %	Mn max. %	P max. %	S max. %	Cr max. %	Ni max. %	Mo max. %	B max. %
3 – (8)	0,19	0,70	1,60	0,025	0,010	0,25	0,25	0,25	0,004
8- 20	0,21	0,70	1,60	0,025	0,010	0,50	0,25	0,25	0,004
(20) – 40	0,23	0,70	1,60	0,025	0,010	1,00	0,25	0,25	0,004
(40) – 50	0,23	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	0,25	0,60	0,004
(50) – 80	0,26	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	1,00	0,60	0,004

Tab. 1 - chemické složení HARDOX 450. [21]

- b) **HARDOX 500** je ocel pro aplikace, kde vyžadujeme vysokou otěruvzdornost, případně tam, kde tvrdost abraziva přesahuje cca 800 HB. Cenou za vyšší

otěruvzdornost je větší, nicméně stále velmi přijatelná, technologická náročnost. I tuto ocel můžeme v menších tloušťkách použít jako konstrukční a otěruvzdornou současně. Tvrdost je 470–530 HB. [22]

- **chemické složení dle tloušťky plechů:** (zkoušené plechy měly tloušťku 6 mm)

Tloušťka[mm]	C max. %	Si max. %	Mn max. %	P max. %	S max. %	Cr max. %	Ni max. %	Mo max. %	B max. %
4 – 13	0,27	0,70	1,60	0,025	0,010	1,00	0,25	0,25	0,004
(13) – 26	0,29	0,70	1,60	0,025	0,010	1,00	0,50	0,30	0,004
(26) – 40	0,9	0,70	1,60	0,025	0,010	1,00	1,00	0,60	0,004
(40) – 80	0,30	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	1,50	0,60	0,004

Tab. 2 - chemické složení HARDOX 500. [21]

- c) Ocel **S355J2+N**, která má v české normě ekvivalent 11 503. Ta bude použita pouze z důvodu porovnání a má podobné chemické složení jako zmíněné oceli HARDOX. Liší se druhem výroby.

Mezi typické aplikace materiálů HARDOX patří zejména korby nákladních automobilů pro převážení sypkých hmot (kamení, štětku, sutě, zeminy, písku, apod.). Dále je používán na lžících bagrů a nakladačů, pracovních částí různých drtičů, pluhů, zemních a zemědělských strojů obecně. V neposlední řadě nachází uplatnění při výrobě přepravních kontejnerů nebo různých vodících lišt. Z důvodu ceny je používán jen na tzv. pracovních částech, tedy exponovaných místech s hrozcím největším opotřebením. Zbytek konstrukce je obvykle z "normální oceli". [17]

3.4 Příprava zkušebních vzorků

Vzorky byly poptány u několika firem. Po jejich objednání a dodání byla zvolena varianta jejich výroby pomocí pálení mikroplazmou. Výhodou je zanedbatelné ovlivnění materiálu v řádu maximálně desetin mm, přijatelná cena a hladký řez téměř srovnatelný s řezem vodou.

Druhou variantou byla možnost použití řezání vodním paprskem. Tato varianta nabízí nulové ovlivnění struktury oceli teplem. Z důvodu enormní ceny výroby vzorků bylo přikročeno k variantě druhé a to za cenu vyšších nároků na vybroušení a vyleštění hran.

Vzorky pro zkoušení únavy je nutno připravit tak, aby byly pokud možno potlačeny všechny ostatní vlivy kromě materiálových, jedná se zejména o odstranění drsnosti vzorků vzniklé při obrábění. Drsnost vzorků jsou rýhy vzniklé při obrábění, které při nevhodné shodě podmínek mohou být považovány za vruby, z nichž budou při namáhání snadno vyrůstat mikrotrhliny, které vyvolají předčasný růst únavového poškození. Zvlášť negativní vliv je považován směr rýh ve směru příčném na směr ohybu.

Vzhledem ke tvaru vzorku v průřezu (plochý obdélník) musí být eliminován ještě jeden faktor a to hrany vzorku zejména v místě největšího průhybu. Ty musely být sraženy a dále leštěny.

Nerespektováním těchto zásad by se nejednalo o materiálové testy, ale technologické, u kterých je naopak nutno tyto negativní vlivy zdůraznit a sledovat jednotlivé možné varianty.

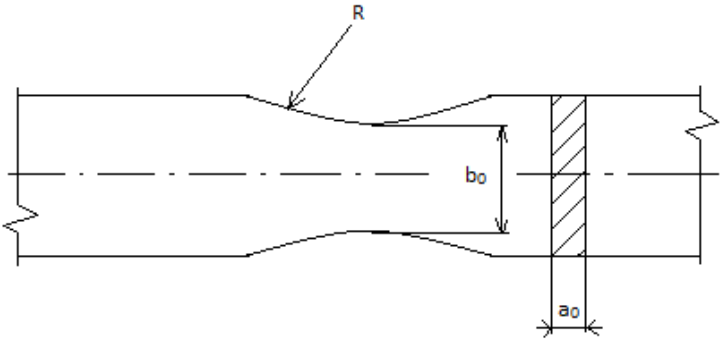
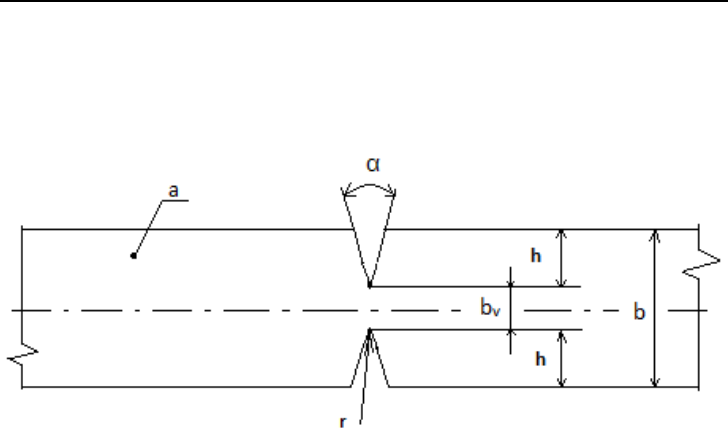
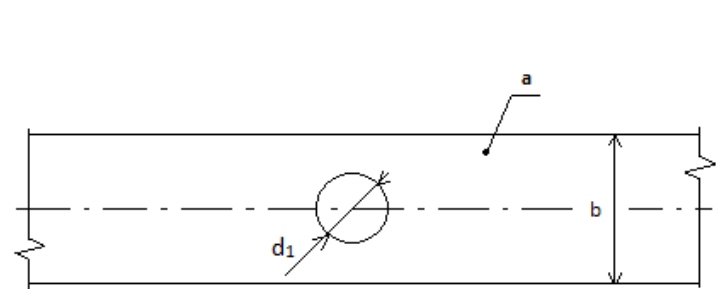
Vzorky byly nejdřív ve střední části předbroušeny na pásové brusce, tím byly odstraněny vnější zoxidované vrstvy, které vznikly skladováním plechů. Dále byly pomocí

kotouče s brusným plátnem po obvodě předbroušeny boky vzorku, tak aby byla odstraněna tepelně ovlivněná zóna po vypálení a byly sraženy hrany vzorku.

Dále následovalo ruční broušení na metalografických papírech v řadě 80-150-240-400-600-800-1200. Přičemž poslední broušení bylo nutné provést podélně na vzorek, aby nebyly ponechány stopy, které by mohly způsobit předčasný růst únavového poškození.

Vzhledem k ručnímu leštění bylo nutno všechny vzorky individuálně proměřit pomocí kalibrovaných měřidel, které byly zapůjčeny od KTO, aby bylo možno relevantně stanovit výchytku stroje.

3.5 Typy zkušebních těles

<p>Hladká o proměnlivém průřezu</p>		<p>Pro namáhání: Tah-tlak</p> <p>Ohyb</p> $\frac{R}{b_0} > 5$
<p>Vrubované tyče ploché (s vrubem / s otvorem)</p>		<p>r=0,25mm; (0,5mm), (ostrý vrub) r=(1mm); 2mm, (mírné vruby) h:b=0,25 $\alpha=60^\circ$</p> <p>Pro namáhání: tah-tlak</p> <p>ohyb</p>
		<p>$d_1:b=0,1$ $d_1 < a$</p> <p>Pro namáhání: Tah-tlak</p> <p>ohyb</p>

Tab. 3 - zkušební tělesa. [10]

4 Chemická analýza

Jelikož o těchto materiálech není známo příliš mnoho, byly provedeny některé standartní materiálové testy. Jako první byla provedena chemická analýza vzorků. Pomocí této zkoušky lze předpovědět zejména vývoj mikrostruktury a chování materiálu při provozu. Díky dostupnosti byla provedena v laboratoři KMM pomocí přístroje LECO GDS500A.

4.1 Přístroj GDS500A

Atomový emisní spektrometr GDS500A (obr. 20) pracuje na principu doutnavého výboje a díky vybavení detektory CCD nabízí technologii vyvinutou speciálně pro rutinní prvkovou analýzu kovových materiálů. Vyznačuje se vynikajícími analytickými vlastnostmi jako je stabilita, přesnost. Díky svým parametrům je často využíván v analýze oceli, surového železa a litiny (včetně šedé litiny) hliníku, mědi, zinku, niklu, kobaltu, wolframu, titanu a jejich slitin. Dovoluje i analyzovat slitiny s nízkým bodem tání, automatové oceli s vysokým obsahem síry a dokonce i materiály vyrobené práškovou metalurgií a jiné obtížně analyzovatelné materiály. [18]

GDS500A pracuje na následujícím principu: Ve spektrálním zdroji využívajícím doutnavého výboje je povrch vzorku rovnoměrně rozprašován. Tento proces nezatěžuje materiál vzorku vysokými teplotami, díky čemuž je spektroskopie s doutnavým výbojem (GDS) vhodná i pro citlivé součásti. Pomocí GDS lze rychle získat kompletní chemické složení v rozsahu od jednotek ppm do 100 % během velmi krátké doby. Spektrometr GDS500 má spojitý spektrální rozsah od 165 do 460 nm. Lze analyzovat objemové vzorky, plechy, dráty, dokonce i vzorky zalité nebo zalisované do tablety. Pro nestandardní tvary vzorku existují speciální držáky. [18]



Obr. 20 - GDS500A. [18]

4.2 Získané výsledky chemické analýzy

Z naměřených výsledků (tab. 4) je možno vyčíst, že chemická analýza odpovídá předepsanému chemickému složení výrobcem (Gamaocel, s.r.o.) s drobnými odchylkami. Také se neuvádí, že je v materiálu obsaženo určité množství dalších mikrolegur jako měď, niob a další. Celé chemické složení dle výrobce je uvedeno na jeho internetových stránkách nebo v kapitole věnované zkoušeným materiálům (viz. 3.3).

Materiál	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Cu %	Nb %
S355J2+N	0,123	0,019	1,423	0,019	0,008	0,031	0,014	0,019	0,002
HARDOX 500	0,177	0,254	0,678	0,009	0,001	0,586	0,042	0,007	0,01
HARDOX 450	0,065	0,514	1,367	0,007	0,003	0,055	0,046	0,007	0,016

Materiál	Mo %	Al %	B %
S355J2+N	0,009	0,041	0,001
HARDOX 500	0,021	0,055	0,001
HARDOX 450	0,030	0,035	0,001

Tab. 4 - Naměřené hodnoty prvkového složení.

4.3 Vliv dalších prvků na chování materiálu

Ve všech ocelích se kromě železa a uhlíku, který má rozhodující vliv na vlastnosti, vyskytují ještě další doprovodné kovové i nekovové prvky, které pocházejí ze surovin používaných k výrobě a přecházejí do oceli v různých fázích výroby, nebo jsou úmyslně přidávány.

Dle toho jaký mají prvky vliv na vlastnosti ocelí, rozdělují se na škodlivé (nečistoty) a prospěšné. Přítomnost škodlivých prvků není v ocelích zpravidla vítána, protože zhoršují její vlastnosti. Jinak tomu je například u automatových ocelí, kde je používáno S a Pb pro zlepšení obrobiteľnosti. Dále jsou prvky přísadové, které výrazně mění vlastnosti ocelí a překrývají i vliv přítomného uhlíku. Označujeme je jako legury. [1]

4.3.1 Rozdělení prvků

- a) škodlivé - fosfor, síra, dusík, kyslík, vodík
- b) prospěšné - mangan, křemík, hliník, (mnohdy ve zvláštních případech i fosfor, síra a měď)
- c) legující - chrom, nikl, mangan, křemík, molybden, wolfram, vanad, hliník, titan, niob, kobalt, měď

V chemickém složení zkoušených plechů se vyskytují tyto podstatné prvky: křemík, mangan, fosfor, síra, chrom, nikl, molybden, bor, niob a další, které byly zjištěny chemickou analýzou.

4.3.2 Vlastnosti jednotlivých prvků

- a) fosfor - do ocelí se dostává jako součást surovin vsázkových, u běžných ocelí bývá jeho obsazení pod 0,04 % a u ocelí HARDOX 0,025 %
 - jeho přítomnost snižuje pevnost a tvrdost, zvyšuje přechodovou teplotu a zhoršuje svařitelnost [16]
- b) síra - jako fosfor se do ocelí dostává při výrobě a její množství závisí na druhu výroby
 - většinou bývá zastoupen až 0,07 % u ocelí HARDOX 0,01%
 - podstatně zhoršuje tvařitelnost, mechanické vlastnosti, svařitelnost, korozivzdornost a schopnosti oceli vhodné k cementování
 - naopak působí pozitivně na obrobiteľnost [16]

- c) mangan - jeho hodnota u ocelí HARDOX je maximálně 1,6 %, což odpovídá nízkolegovaným ocelím
- zhoršuje difúzi uhlíku a rozšiřuje oblast austenitu
 - je používán jako dezoxidační přísada společně s hliníkem a dalšími prvky
 - zvětšuje mez kluzu, pevnost v tahu, součinitel teplotní roztažnosti, sklon oceli k hrubnutí zrna při ohřevu nad překrytizační teploty
 - zlepšuje tvařitelnost oceli za studena, odolnost oceli proti opotřebení a zmenšuje tepelnou vodivost [16]
- d) křemík - dezoxidační prvek, který je zastoupen u ocelí HARDOX maximálně 0,7 %
- při obsahu nad 1 % zhoršuje tvařitelnost ocelí a houževnatost
 - zvětšuje pevnost v tahu, tvrdost, permeabilitu, odolnost vůči oxidaci za zvýšených teplot a hysterézní ztráty a sklon k magnetickému stárnutí
 - zmenšuje elektrickou a tepelnou vodivost a rychlost difúze uhlíku v železe [16]
- e) chrom - u HARDOX 500 maximálně 1 % a u HARDOX 450 maximálně 0,3 %
- při vysokém obsahu chromu se vyskytují intermediální fáze σ s tvrdostí až 1000 HV, které jsou stabilní od teploty 460°C až po teplotu tání
 - patří do skupiny feritotvorných prvků, chromové oceli jsou odolné proti popouštění
 - zvyšuje pevnost a tvrdost, aniž by byla snížena houževnatost, prokalitelnost, žárovevnost a korozivzdornost
 - desoxidační prvek zhoršující tvařitelnost a elektrickou a tepelnou vodivost [16]
- f) nikl - u ocelí HARDOX maximálně 0,25 %
- austenitotvorný prvek, maximální rozpustnost v železe je při 475°C a to 6,1±0,5%
 - zpomaluje fázovou přeměnu z $\gamma > \alpha$
 - velké odmísení u niklových ocelí, které se neúplně odstraní při dlouhých výdržích za vysokých teplot
 - zvýšení prokalitelnosti, pevnosti, korozivzdornosti a houževnatosti hlavně za nízkých teplot
 - nevýhodou je vysoká cena s porovnáním s dosaženými vlastnostmi [16]
- g) molybden - u HARDOX je jeho hodnota maximálně 0,25 %
- patří mezi feritotvorné prvky
 - část molybdenu je rozpouštěna ve feritu a zbytek tvoří karbidy
 - snižuje počátek a konec martenzitické přeměny, po zakalení zvyšuje stabilitu martenzitu
 - vliv na mechanické vlastnosti ocelí má stejný jako chrom [16]
- h) bor - u HARDOX je jeho hodnota maximálně 0,004 %
- zjemňuje strukturu a zlepšuje prokalitelnost (nejlépe ze všech prvků)
 - atomy boru se ukládají přednostně na hranicích zrn, kde zpomalují difúzi atomů uhlíku, tím se zvyšuje prokalitelnost, protože zvyšuje transformaci perlitu [16]
- i) niob - zvyšuje prokalitelnost oceli
- důležitá feritotvorná přísada do legovaných ocelí, díky své afinitě k uhlíku zabraňuje vzniku karbidů chromu v oceli a tím omezuje tvorbu mezikrystalické koroze
 - niobové nerezavějící oceli s 0,5 - 1 % Nb jsou žáruvzdorné a korozivzdorné
 - niob tvoří s uhlíkem karbid NbC
 - po precipitačním vytvrzení výrazně zvyšuje mez kluzu [16]

Vzhledem k bainitické mikrostruktuře (viz. 7.1) je u ocelí HARDOX pozoruhodný velmi nízký obsah C. K tomuto výsledku zřejmě přispívá ještě obsah Niobu, který výrazně zvyšuje prokalitelnost, zda je obsah Boru u této oceli záměrný nelze s určitostí říci. Prokalitelnost zvyšuje ještě obsah chromu a molybdenu. Z velmi nízkého obsahu mědi u ocelí HARDOX lze usoudit, že se jedná o materiál vyráběný především z nových čistých surovin, zřejmě přímo z železné rudy, jelikož měď nelze běžnými způsoby z taveniny při přetavování šrotu odstranit. Tyto oceli vykazují taktéž velmi nízký obsah síry a fosforu. Polotovár je vyráběn přímou redukcí, která probíhá ve vysoké peci.

Ocel S355J2+N byla zřejmě vyrobena především přetavením šrotu s následnou úpravou chemického složení zejména z důvodu úspory nákladů, jelikož ruda je oproti druhotným surovinám čistá bez škodlivých příměsí, jako je Cu, Sn, As a dalších, ale velmi drahá.

5 Mechanické zkoušky

5.1 Zkoušky tvrdosti

Na zkoušených třech materiálech byly provedeny zkoušky tvrdosti podle Vickerse (HV), Brinella (HB) a Rockwella (HRC). Informace o jednotlivých zkouškách a jejich výsledcích následují:

5.1.1 Zkouška tvrdosti dle Brinella (ČSN 42 0371-78)

V této zkoušce je do zkoušeného materiálu vtisknuta, definovanou silou F , kalená ocelová kulička o průměru D . Tvrdost je vyjádřena poměrem zatížení k ploše kulovitého vtisku, stanoví se ze vztahu:

$$HB = \frac{0,102 F}{A} \quad (1)$$

V tomto vztahu F značí zátěžnou sílu a A plochu vtisku, která se vypočítá následujícím vztahem:

$$A = \frac{\pi D}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) \quad (2)$$

Mezi tvrdostí HB a pevností v tahu R_m je přímá závislost: $R_m = k HB$, kde k je konstanta, která je závislá na zkoušeném materiálu. [1]

Zkouška tvrdosti dle Brinella byla provedena ocelovou kuličkou o $\varnothing d = 10$ [mm], zatížením $m = 1\,000$ [kg] s výdrží $T = 10$ [s]. Byly naměřeny následující poloměry vtisků:

Materiál	1. Vtisk [μm]	2. Vtisk [μm]	3. Vtisk [μm]
HARDOX 500	814,09	826,89	826,11
HARDOX 450	851,72	896,32	843,51
S355J2+N	989,56	985,13	983,35

Tab. 5 – poloměry vpichů u HB.

Přepočet dle daného vzorce na HB:

$$HB_{500} = \frac{0,102 F}{A_{500}} = \frac{0,102 * 10\,000}{2,139} = 476,86 \text{ HB}$$

$$HB_{450} = \frac{0,102 F}{A_{450}} = \frac{0,102 * 10\,000}{2,364} = 431,47 \text{ HB}$$

$$HB_{S355J2+N} = \frac{0,102 F}{A_{S355J2+N}} = \frac{0,102 * 10\,000}{3,085} = 330,63 \text{ HB}$$

5.1.2 Zkouška tvrdosti dle Vickerse (ČSN 42 0374-78)

Vnikacím tělesem u této zkoušky tvrdosti je diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136°. Tvrdost je vyjádřena jako poměr zatížení vnikacího tělíska F k ploše vtisku. Tato zkouška má několik pevnostních výpočtů:

$$HV = \frac{0,102 * 2F \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \quad (3)$$

$$HV = 0,189 \frac{F}{d^2} \quad (4)$$

$$HV = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (5)$$

Kde F je zatěžovací síla a d je aritmetický průměr délek úhlopříček vtisku. Výsledné číslo je bezrozměrné ovšem za něj se píše HV. Zatížení je voleno libovolně a rozměry vtisků jsou velmi malé, proto se většinou zkouší na broušeném materiálu. [1]

5.1.3 Zkouška tvrdosti dle Rockwella (ČSN 42 0372-81, ČSN 42 0373-78)

Vnikacím tělískem je diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° a zaoblením hrotu 0,2 mm nebo kalená ocelová kulička o průměru 1,5875 mm. Měří se hloubka vtisku dosažená za definovaných podmínek vtlačováním vnikacího tělíska a při vyloučení vlivu povrchu zkoušeného tělesa a jeho dopružování.

Postup měření je následující: Vnikací těleso se zatíží předběžným zatížením F_0 , poté se nastaví stupnice hloubkoměru v zatíženém vztahu do počáteční polohy. Dále se uplatní přidavné zatížení F_1 . Po následném odlehčení už zbývá jen odečíst z hloubkoměru přímo tvrdost v příslušné stupnici. [1]

Tabulka naměřených hodnot tvrdosti:

Materiál	HRC	HV 30	HB1000/10/10
S355J2+N	<20	166±1	330±1
HARDOX 450	49 ±1	405±10	432±14
HARDOX 500	48 ±1	441±7	487±10

Tab. 6 - Tabulka naměřených hodnot tvrdosti.

Přepočet hodnot mezi jednotlivými metodami je velmi složitý a nespolehlivý.

Z naměřených hodnot vyplývá značný rozdíl mezi hodnotami naměřenými podle metody Vickers a Rockwell. Pokud bude předpokládáno, že hodnota HV bude hodnota výchozí, tak podle přepočtu by měly být hodnoty tvrdosti HRC zhruba o 5 HRC nižší.

5.2 Tahová zkouška

Výrobce ocelí HARDOX udaná hodnota tahu je větší než 1000 MPa. Z jejich výsledků je možno početně určit σ_c v ohybu.

Z tab. 7 je zřejmé, že pevnost ocelí HARDOX se pohybuje kolem 2000 respektive 2200 MPa, což je čtyři a vícekrát než u referenční oceli S355J2+N.

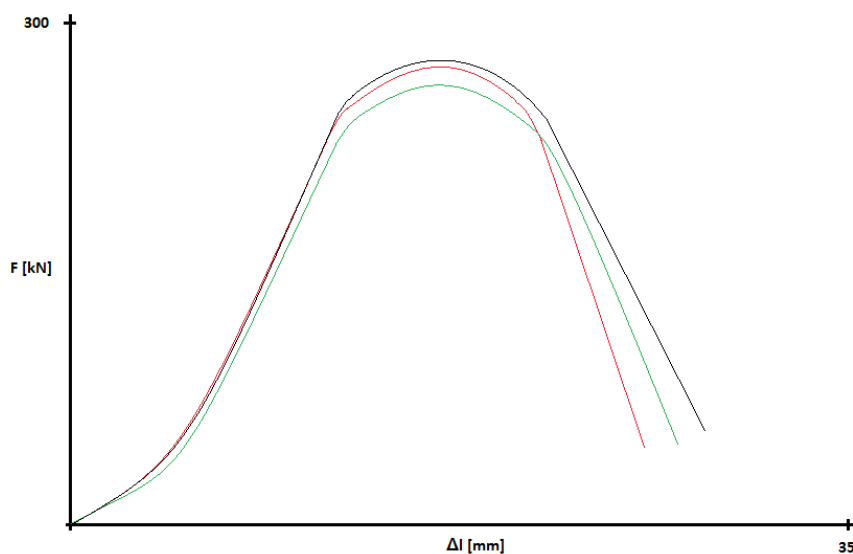
Diagramy tahové zkoušky mezi jednotlivými zkoušenými materiály vykazují značné rozdíly. U referenční oceli je diagram s jasně viditelnými jednotlivými mezemi. Zatímco u obou ocelí sledovaných je v diagramu zachyceno chování jako u tvrdých ocelí, to znamená, že nejsou viditelné jednotlivé meze a mez kluzu by se musela zjistit smluvně.

Tabulka naměřených hodnot z tahové zkoušky:

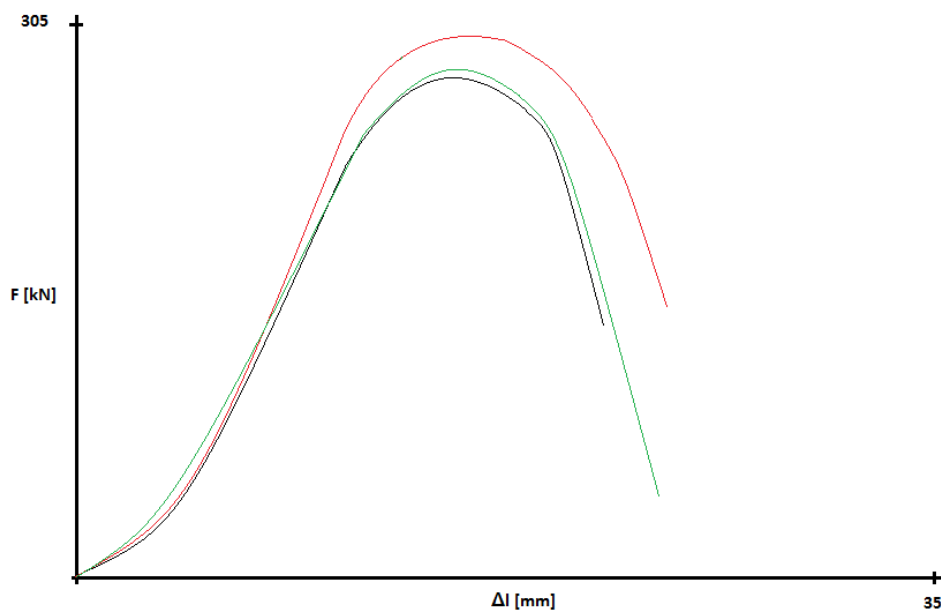
Vzorek č.	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Plocha [mm ²]	Max. zatížení [kN]	Pevnost v tahu [MPa]
355-1	3,90	25,2	98,28	51,20	521
355-2	3,90	25,2	98,28	42,26	430
355-3	3,90	25,2	98,28	52,00	529
450-1	6,05	25,0	151,20	299,70	1982
450-2	6,05	25,0	151,20	304,00	2011
450-3	6,05	25,4	153,60	300,00	1953
500-1	5,02	25,5	128,00	288,50	2254
500-2	5,02	25,2	126,50	287,50	2273
500-3	5,10	25,4	129,50	284,00	2193

Tab. 7 – Tabulka naměřených hodnot pevnosti v tahu.

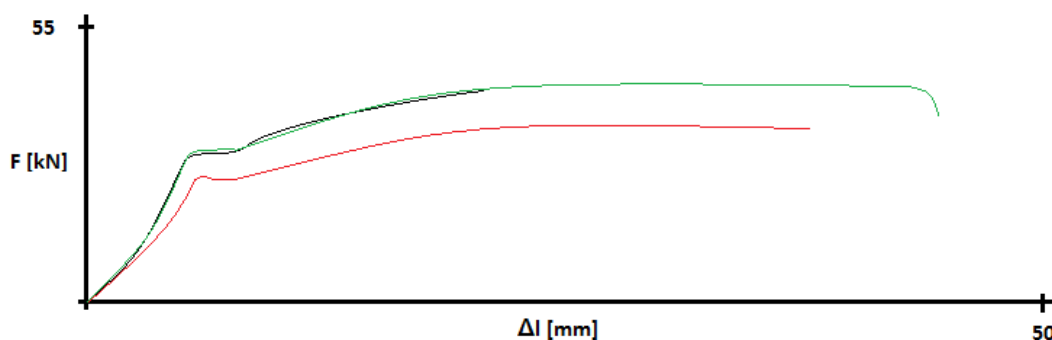
Tahové diagramy pro jednotlivé materiály: (každá barva znázorňuje jedno měření)



Graf 1 – tahový diagram oceli HARDOX 500.



Graf 2 – tahový diagram oceli HARDOX 450.



Graf 3 – tahový diagram oceli S355J2+N.

Vztahy mezi pevnostmi v ohybu, tahu, tlaku a krutu:

Mez únavy se u konstrukčních ocelí s hladkým povrchem a s mezí pevnosti $R_m = (500 - 1000)$ MPa odhaduje, tímto způsobem: [19]

a) Tah - tlak: $\sigma_c = 0,36R_m + 13$ (6)

b) Míjivý tah: $\sigma_c = 0,59R_m + 38$ (7)

c) Krut: $\sigma_c = 0,21R_m + 39$ (8)

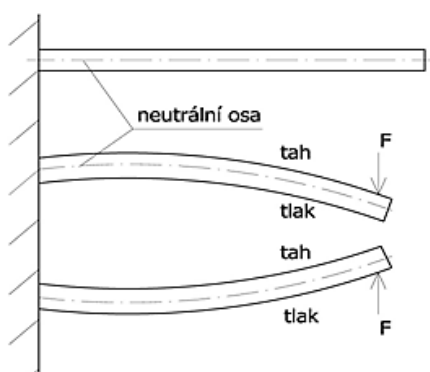
d) Míjivý krut: $\sigma_c = 0,10R_m + 48$ (9)

e) Ohyb za rotace: $\sigma_c = 0,36R_m + 44$ (10)

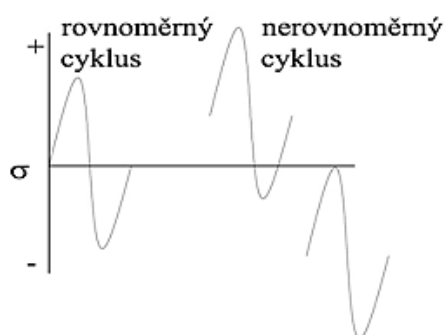
6 Kalibrace zkušebního stroje

Jako zkušební zařízení byl použit únavový stroj Carl Shencck typu PWYG. Ten umožňuje zkoušet únavu materiálu na plochých vzorcích namáhaných střídavým ohybem, tak kruhových vzorcích namáhaných krutem. Při použití speciálního vybavení je též možno zkoušet vzorky kruhové ohybem, nebo ploché šikmým ohybem, popřípadě i za zvýšené teploty. Pro dosažení kvalitních výsledků bylo nutno stroj kalibrovat.

Pro zkoušení vzorků byl zvolen plochý ohyb. Vzhledem k charakteru materiálu, kdy dochází ke střídavému namáhání povrchových vrstev tahem a tlakem, je nutno věnovat pečlivému seřízení značnou pozornost. Základním hnacím prvkem stroje je řízený stejnosměrný elektrický motor, který přes excentr roztáčí páku, která ohýbá měřený vzorek vždy z jedné krajní polohy do druhé. To znamená, že každá strana vzorku přechází plynule z tahu do tlaku. Základem je použití rovnoměrného cyklu, kdy je napětí na obou stranách cyklu stejné a ve středu bude na vrchní straně vzorku teoreticky nulové napětí. Lze použít i nerovnoměrné nastavení kdy je použit cyklus nerovnoměrný, kdy je jedna půlvlna zatěžovací sinusoidy menší než druhá nebo lze použít cyklus jednostranný, kde bude jedna strana vzorku namáhána vždy na tah a druhá na tlak, to by znamenalo, že v druhé úvrati bude na obou površích teoreticky nulové napětí. [11]



Obr. 21 - namáhání vzorků.



Obr. 22 - rovnoměrný a nerovnoměrný cyklus namáhání.

Velikost výchylky a tím i velikost namáhání je nastavována pomocí plynulého přestavení excentru, který přenáší namáhání na páku a ta posléze přes uchycení do kleštin ohýbá vzorek.

Na druhé straně je vzorek uchycen přes kleštinu do měřícího elementu. To je složena z pevného pouzdra, které je uchyceno k šasi zkušebního stroje. Toto upevnění je vytvořeno ze sady tenkých plechů, které jsou umístěny tak, aby vyrovnávaly dilatace vzorků ve dvou osách.

Tyto dilatace vznikají v důsledku Hookeova zákona. Díky natažení vzorku se mění jeho délkový rozměr. Toto musí být kompenzováno příčným zúžením.

$$\eta = \frac{\Delta b}{b} = \mu \varepsilon = \mu \frac{\sigma}{E} \quad (11)$$

Kde η je součinitel poměrného zúžení, b je příčný rozměr, μ je konstanta úměrnosti, tzv. Poissonovo číslo, které je u ocelí rovno přibližně 0,3, σ je napětí ve vzorku a E je modul pružnosti, který je u ocelí roven cca $2,1 \times 10^5$ MPa. Pokud by toto vyrovnávání nebylo na stroji přítomno, přičítala by se k měřenému napětí ještě nezanedbatelná chyba v důsledku přídavného namáhání do dvou dalších stran a vznikala by v místě trojosá napjatost, jejíž velikost navíc by šla jen těžko stanovit.

Uvnitř pouzdra je jednostranně uchycená měřící torzní tyč, která je připojena na druhou kleštinu, v níž je uchycen vzorek. K této tyči je připevněna páka, která se vychyluje tím víc, čím je větší zkroucení tyče a tato výchylka je měřena pomocí číselníkového úchylkoměru (hodinek).

Tento systém je nutno před každou zahájenou řadou testů nakalibrovat tak, aby byly výsledky testů relevantní. Kalibrace byla provedena tím, že do měřící kleštiny do osy otáčení

stroje je upevněna tyč stanovené délky, na kterou jsou posléze navěšovány závaží a je měřena výchylka na úchylkoměru.

Ze změřené délky tyče a tíhy závaží lze již snadno vypočítat zatěžovací moment M_0 [Nm].

Byla použita závaží o váze 2x1,5 kg a 2x5 kg, z nichž byla složena řada 1, 5, 3, 8 a 13 kg. Měřicí tyč byla dlouhá 0,5 m. Z číselníkového úchylkoměru s tisícinovým dělením s platným certifikátem byly odečítány naměřené hodnoty. Výsledná hodnota, která je vyjádřena jako Nm/dílek na hodinkách s tisícinovým dělením byla získána ze vzorce.

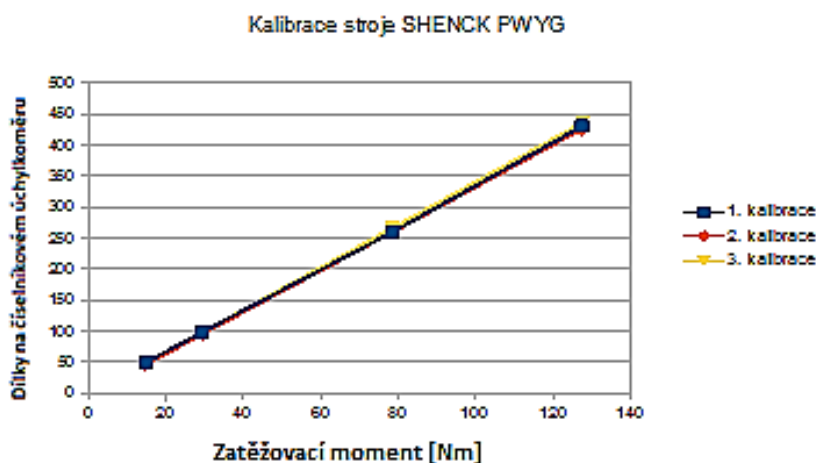
$$x = \frac{F_{\text{zatížení}} * d_{\text{rameno}}}{n_{\text{dílků}}} \quad (12)$$

Tabulka naměřených hodnot při kalibraci zkušebního stroje:

zatížení [kg]	přepočet [N]	Naměřené dílky	přepočet Nm/dílek	naměřené dílky	přepočet Nm/dílek	naměřené dílky	přepočet Nm/dílek
1,5	14,715	48	0,153281	45	0,163501341	45	0,1635013
3	29,43	98	0,150153	95	0,154894737	97	0,1517010
8	78,48	259	0,151506	259	0,151505792	265	0,148075
13	127,53	430	0,148291	426	0,149683099	435	0,1465862

Tab. 8 – Hodnoty z kalibrace měřícího stroje.

Z těchto hodnot při nejvyšším zatížení byl proveden výpočet aritmetického průměru a ten byl stanoven na 0,1482 Nm/dílek na číselníkovém úchylkoměru s tisícinovým rozdělením stupnice na 1 mm. Ze získaných hodnot byl proveden graf, který znázorňuje, že linearita měřicí tyče je vysoká. [11]



Graf 4 – Graf kalibrace stroje Carl Shenck typu PWYG.

Stroj umožňuje testování vzorků plochým ohybem o tloušťkách 5 - 12 mm. Aby bylo zajištěno, že neutrální osa bude vždy uprostřed vzorku, jsou zkušební čelisti vybrané a upínací plochy jsou 7,5 mm pod osou stroje. Na dorovnání do středu vzorku jsou dodávány přesně zabroušené podložky, které tyto nesoulady vyrovnávají. Zkoušené vzorky měly všechny tloušťku 6 mm, jelikož je nutné, aby osa byla uprostřed vzorku, byla použita síla podložky 4,5 mm dle vzorce:

$$x = 7,5 - \frac{S_{\text{vzorku}}}{2} \quad (13)$$

Nastavení velikosti výchylky, která značí zatížení vzorku je provedeno podle vzorce pro napětí v ohybu. V rámci měření bylo vše provedeno v rámci Hookeova zákona:

$$\sigma = \frac{M_o}{W_o} \quad (14)$$

Kde σ [MPa] je stanovené napětí, M_o [Nm] je moment a W_o [mm³] je modul průřezu materiálu v ohybu. Ten lze vypočítat dle vzorce:

$$W_o = \frac{b * h^2}{6} \quad (15)$$

Kde b je šířka vzorku a h výška vzorku ve směru vektoru ohybu. Jelikož je znám průřezový modul, který lze změřit pomocí posuvného měřítka a je známo napětí, které je třeba nastavit a přepočítat na dílky na číselníkovém úchylkoměru, je použit pro nastavení tento vzorec:

$$M_o = \sigma * W_o \rightarrow n_{\text{dílků}} = \frac{M_o}{x} \quad (16)$$

Kde $n_{\text{dílků}}$ je hodnota kolik dílků připadá na dané zatížení a hodnota x (Nm/dílek) pochází z aritmetického průměru z kalibrace. Při předchozí kalibraci byla změřena hodnota 0,144 Nm/1 dílek. Nynější výsledek 0,149 Nm/1 dílek lze považovat měřenou výchylku za velmi stabilní. [11]

7 Vyhodnocení experimentálního programu

7.1 Makrostruktura

Aby bylo možno zjistit, co možná nejpodrobnější materiálové charakteristiky, byly provedeny metalografické výbrusy vzorků materiálu, jak v podélném, tak příčném směru.

Vzorky byly odděleny na metalografické pile, posléze zalaty do tablety a byly broušeny na metalografických papírech až do drsnosti 1200. Poté byly vyleštěny pomocí diamantové pasty o drsnosti zrna 3 a 1 μm .

Po dosažení dostatečné kvality výbrusu byly vzorky naleptány 3% Nitalem po dobu přibližně šesti sekund. Z těchto vzorků byly zhotoveny snímky z podélného i příčného řezu. Následně proběhla další dvě leptání, která byla inspirována odborným článkem *Color tint-etching for Multiphase Steels*.

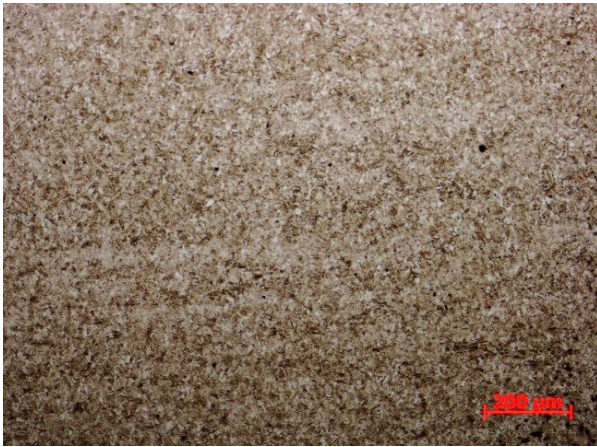
Tabulka použitých leptadel:

Typ leptadla	Historie struktury
1 % Na ₂ S ₂ O ₅ s 4 % kyselinou pikrovou	Ferit – žlutá/modrá, bainit – hnědá, zbytkový austenit a martenzit bílá
4 % kyselina pikrová s alkoholem, 10 % Na ₂ S ₂ O ₅ s vodou	Ferit – hnědá, martenzit a austenit - bílá

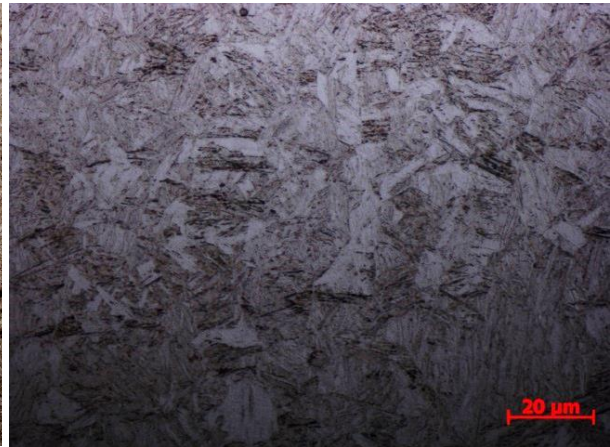
Tab. 9 – leptadla [20]

Leptáno v 3 % Nitalu:

a) HARDOX 500 - podélný řez

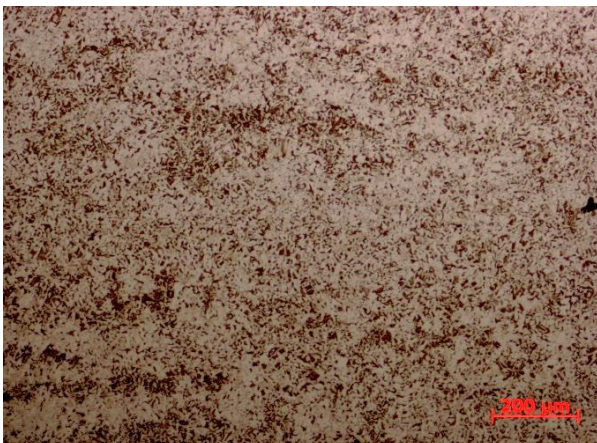


Obr. 23 - HARDOX 500.

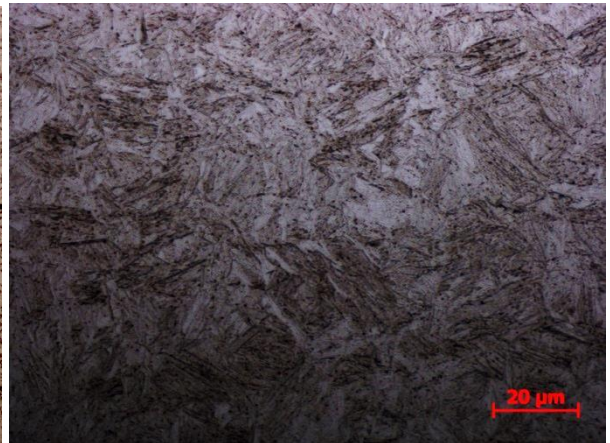


Obr. 24 - HARDOX 500.

b) HARDOX 500 - příčný řez



Obr. 25 - HARDOX 500.

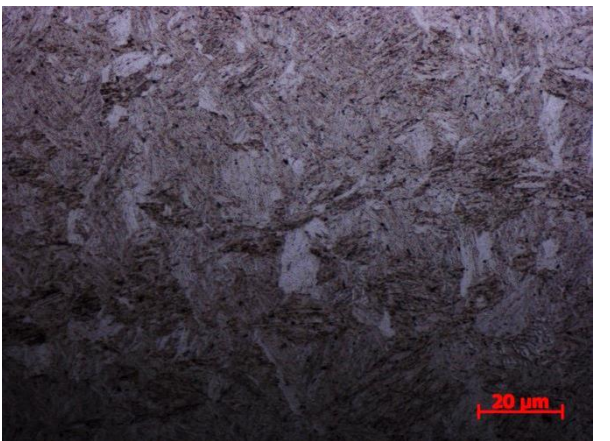


Obr. 26 - HARDOX 500.

c) HARDOX 450 - podélný řez

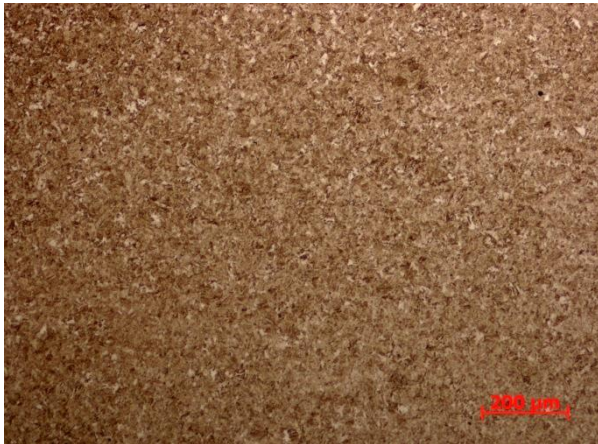


Obr. 27 - HARDOX 450.

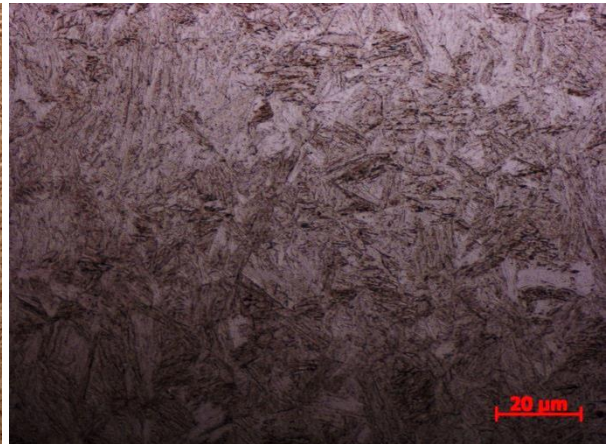


Obr. 28 - HARDOX 450.

d) HARDOX 450 - příčný řez

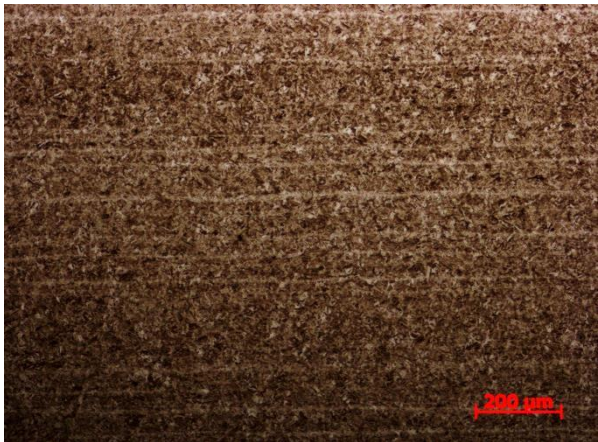


Obr. 29 - HARDOX 450.

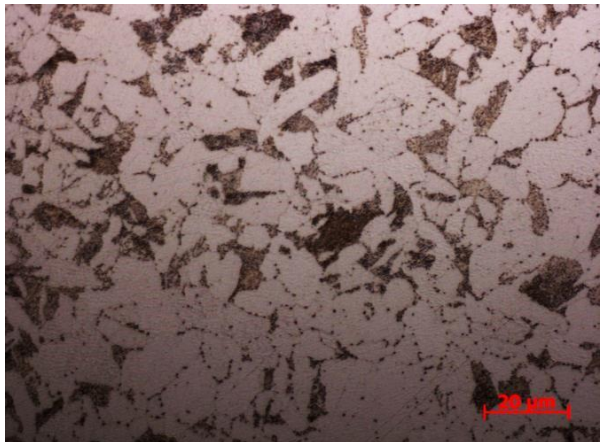


Obr. 30 - HARDOX 450.

e) S355 - podélný řez



Obr. 31 - S355J2+N.

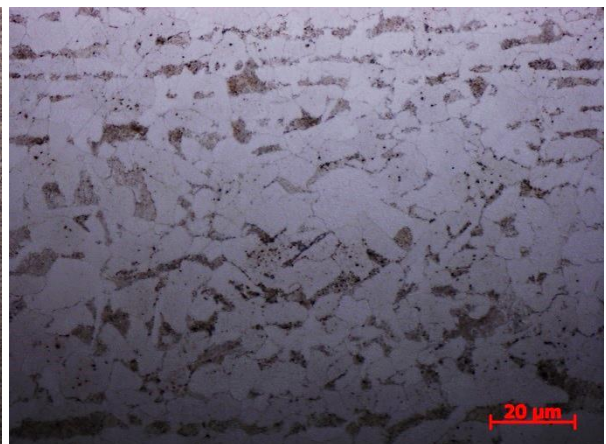


Obr. 32 - S355J2+N.

f) S355 - příčný řez



Obr. 33 - S355J2+N.



Obr. 34 - S355J2+N.

U oceli S355J2+N je dobře rozeznatelná feriticko-perlitická struktura, u které jsou v příčném řezu viditelné roviny perlitu. U podélného řezu i příčného řezu je evidentní vysoká

řádkovitost, která je viditelná po celé ploše řezu. Tato pravidelnost s největší pravděpodobností vznikla při výrobě zkoušených plechů. Tyto plechy se vyrábějí metodou řízeného tváření (válcování) za studena.

U oceli HARDOX je patrná velmi jemnozrná bainiticko – martenzitická struktura, kde se vyskytují i malé plošky zbytkového austenitu. Ta vzniká vysokým stupněm protváření, která přispívá k výborným mechanickým vlastnostem.

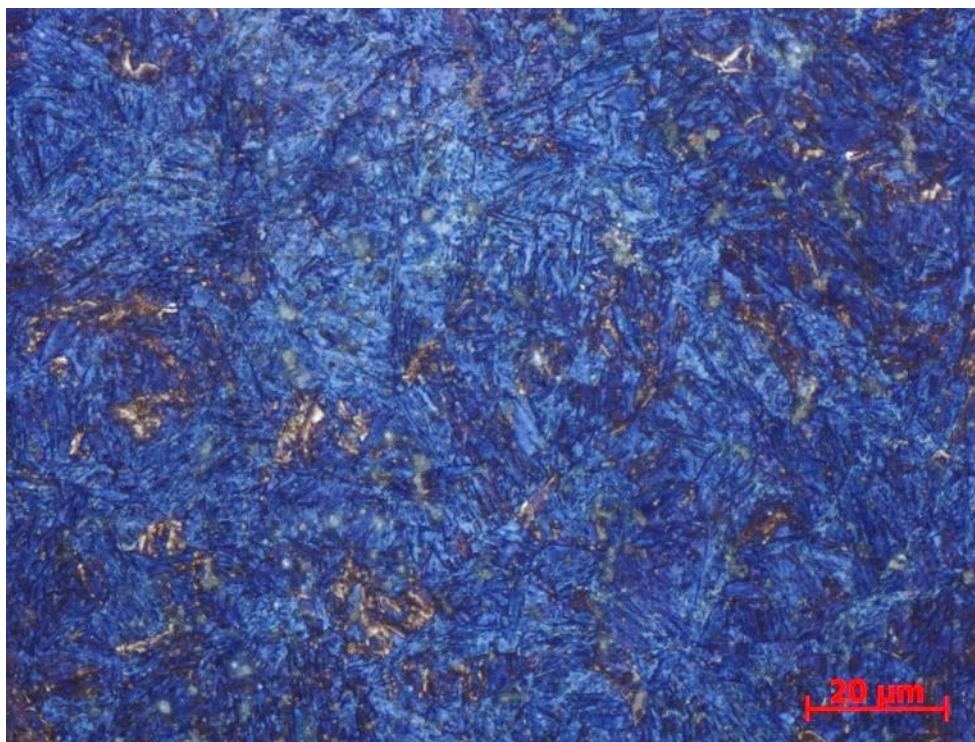
Jako druhé bylo provedené leptání v leptadle složeném z 1 % $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ s 4 % kyselinou pikrovou dolité destilovanou vodou. Při tomto leptání bylo dosaženo neuspokojivých výsledků, protože pozorovaný materiál se nedal dobře naleptat. Přesněji v leptadle korodoval. Nebylo tedy možné dosáhnout uspokojivých vypovídajících fotografií, které by bylo vhodné dále publikovat.

Třetí leptání bylo dvojitě, první směs byla 4 % kyselina pikrová s alkoholem, druhý byl 10 % $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ dolitý obyčejnou vodou. Z tohoto leptání vzešly mnohem uspokojivější výsledky než z druhého leptání.

Na Obr. 37 a 38 jsou pozorovány modré, hnědé a bílé úseky. Modrý je martenzit, hnědý bainit a bílou barvou je viditelný zbytkový austenit. U srovnávacího vzorku byl ještě více zvýrazněn perlit ve feritické matici.

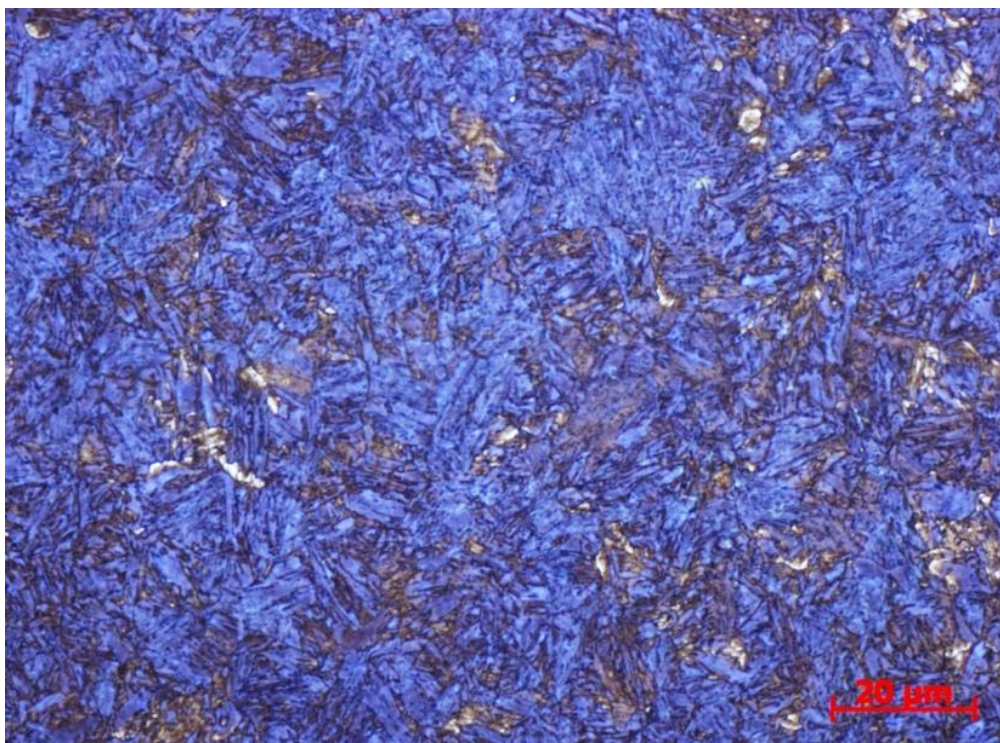
Dvojí leptání: 4 % kyselina pikrová s alkoholem, 10 % $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ s vodou:

a) HARDOX 500



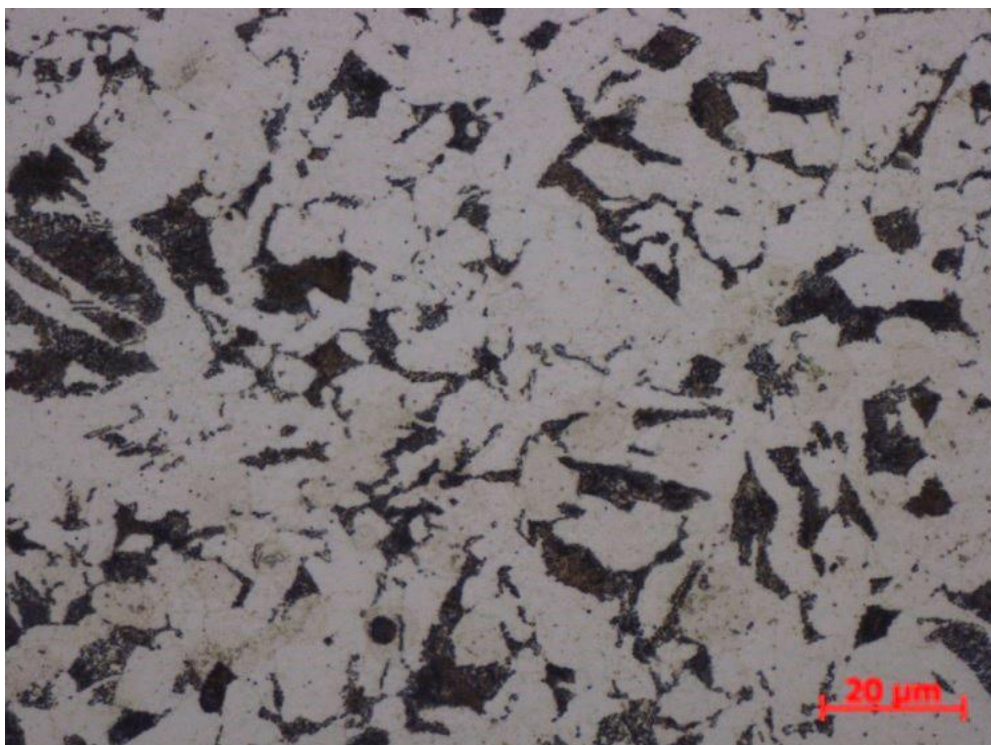
Obr. 35 – HARDOX 500 – barevné leptání.

b) HARDOX 450



Obr. 36 – HARDOX 450 – barevné leptání.

c) S355J2+N



Obr. 37 – S355J2+N – barevné leptání.

7.2 Tabulky naměřených hodnot a křivky únavy

Podle předpisu upravené vzorky byly uchyceny do kleštín a na stroji byla nastavena předepsaná deformace, která odpovídá zkušebnímu napětí. Na všechny vzorky byla použita totožná frekvence zatížení a to 800 kmitů za minutu. Stroj umožňuje víc než jedenkrát vyšší frekvenci, avšak v důsledku značného hluku vznikajícího již při cca 1000 kmitech za minutu nelze nasadit vyšší rychlost. Toto je z důvodu, že zkušební stroj je umístěn v halové laboratoři, kde nebylo vybudováno odhlučnění.

Odpojení stroje bylo provedeno automaticky po přelomení vzorku.

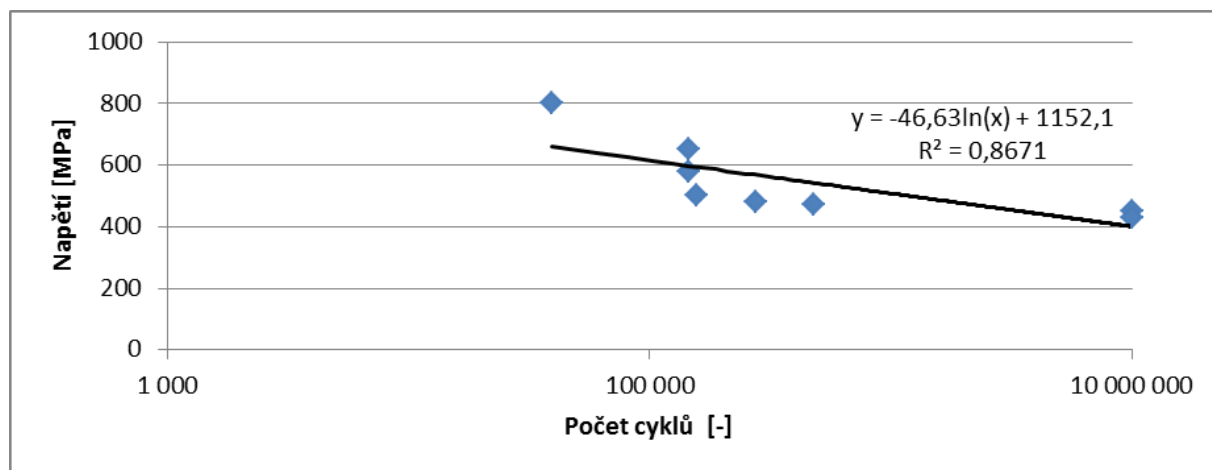
Při stanovení zatížení bylo postupováno od maximálního možného zatížení. To bylo získáno tak, že stroj byl nastaven na maximální možnou výchylku. Při překročení meze kluzu již nelze nastavit vyšší výchylku a ta byla u prvního vzorku nastavena. Po přelomení vzorku byla hodnota napětí plynule snižována, aby bylo možno změřit požadovanou hodnotu únavové životnosti.

7.2.1 Hladké o proměnlivém průřezu

a) HARDOX 500

Číslo měření	Napětí [MPa]	Počet cyklů [-]
1.	800	39 500
2.	650	145 900
3.	580	145 900
4.	500	156 000
5.	470	483 000
6.	450	10 000 000
7.	480	275 000
8.	430	10 000 000

Tab. 10 - HARDOX 500.

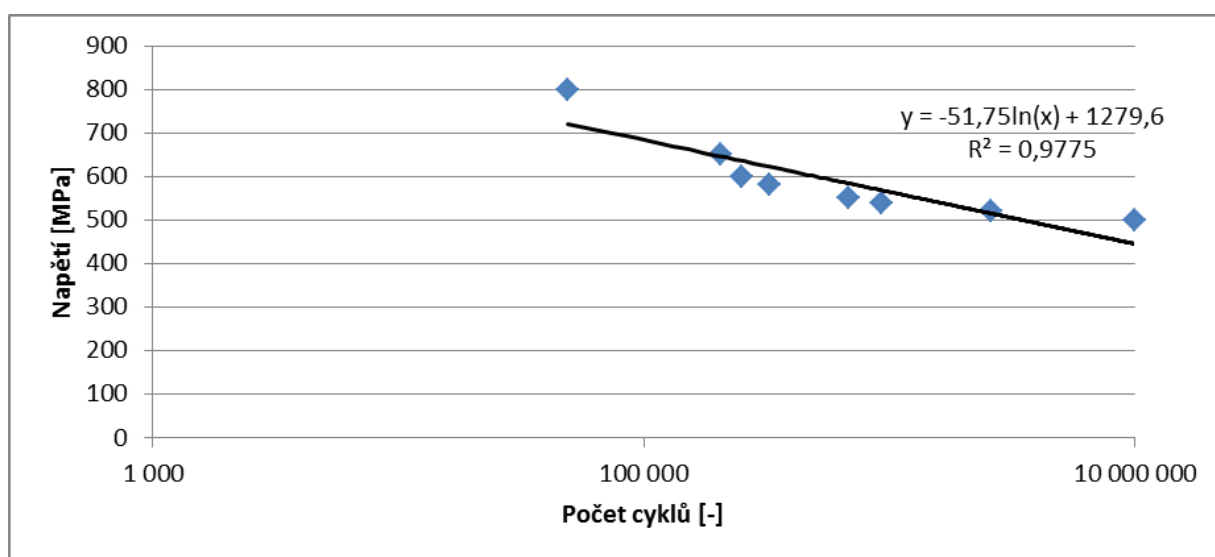


Graf 5 - HARDOX 500.

b) HARDOX 450

Číslo měření	Napětí [MPa]	Počet cyklů [-]
1.	800	48 900
2.	650	205 800
3.	600	249 300
4.	580	324 700
5.	550	682 900
6.	540	925 600
7.	520	2 609 000
8.	500	10 000 000

Tab. 11 - HARDOX 450.

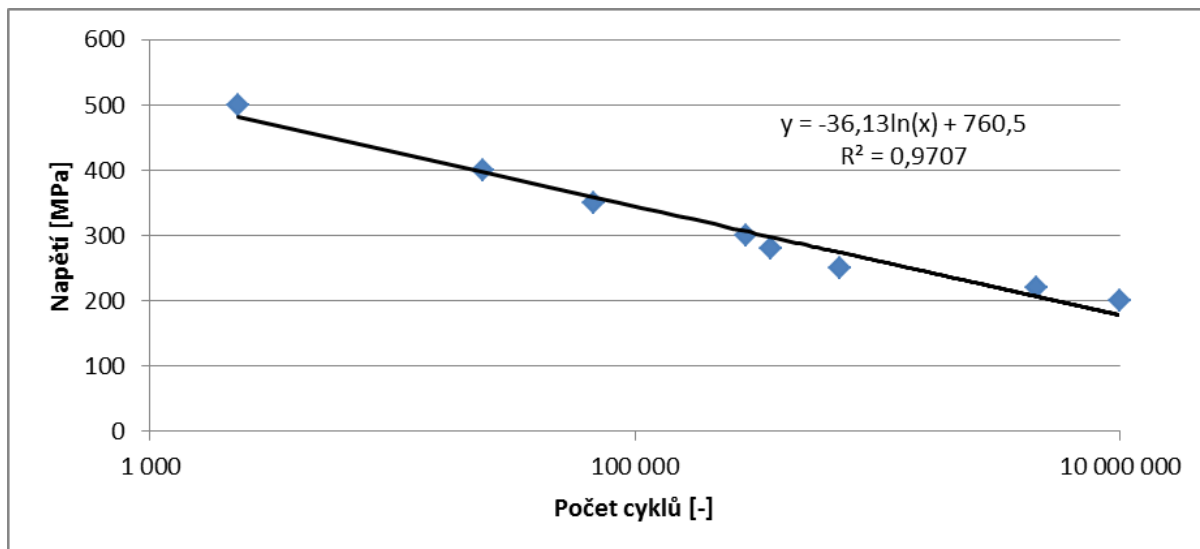


Graf 6 - HARDOX 450.

c) S355J2+N

Číslo měření	Napětí [MPa]	Počet cyklů [-]
1.	500	2 300
2.	400	23 600
3.	350	67 400
4.	300	288 400
5.	280	361 200
6.	250	698 500
7.	220	4 518 600
8.	200	10 000 000

Tab. 12 – S355J2+N.



Graf 7 – S355J2+N.

7.2.2 Vrubované tyče ploché s vrubem

a) HARDOX 500

Číslo měření	Napětí [Mpa]	Počet cyklů
1.	250	165 100
2.	220	1 094 400
3.	200	10 000 000
4.	210	1 195 000

Tab. 13 – HARDOX 500.

b) HARDOX 450

Číslo měření	Napětí [Mpa]	Počet cyklů
1.	400	65 500
2.	350	95 600
3.	300	113 900
4.	250	196 700

Tab. 14 – HARDOX 450.

c) S355J2+N

Číslo měření	Napětí [Mpa]	Počet cyklů
1.	200	298 550
2.	240	111 300
3.	180	681 200
4.	160	649 000

Tab. 15 - S355J2+N.

7.2.3 Vrubované tyče ploché s otvorem

a) HARDOX 500

Číslo měření	Napětí [Mpa]	Počet cyklů
1.	370	628 300
2.	230	10 000 000
3.	410	494 600
4.	370	567 300
5.	330	698 500
6.	270	1 422 200

Tab. 16 – HARDOX 500.

b) HARDOX 450

Číslo měření	Napětí [MPa]	Počet cyklů
1.	480	283 300
2.	460	Prasknutí v uchycení
3.	400	420 800
4.	350	674 300
5.	300	1 203 100
6.	250	10 000 000

Tab. 17 – HARDOX 450.

c) S355J2+N

Číslo měření	Napětí [MPa]	Počet cyklů
1.	180	3 999 200
2.	160	6 234 500
3.	140	10 000 000
4.	220	368 800
5.	200	650 300
6.	240	187 200

Tab. 18 - S355J2+N.

8 Diskuse výsledků

Námětem této bakalářské práce bylo prozkoumání vybraných vlastností ocelí typu HARDOX, jelikož o nich není příliš mnoho údajů známo. A to zejména o použitelnosti pro výrobu specifických strojních dílů, kde by mohly být využity mnohé přednosti tohoto typu materiálu. Nebylo cílem provést kompletní testy těchto slitin, např.: rázová zkouška, jelikož touto se zabývá v současnosti jiné pracoviště.

Na úvod byla sledována tvrdost jednotlivých materiálů, kde pomocí kalibrovaných tvrdoměrů bylo zjištěno, že v tomto testu nejtvrdějším materiálem je HARDOX 500 s tvrdostí

441 HV, dále HARDOX 450 s 405 HV a srovnávací ocel S335J2+N, která má hodnotu tvrdosti 166 HV.

Tahovou zkouškou bylo zjištěno, že pevnost v tahu materiálu S355J2+N se pohybuje kolem 500 MPa. Za to u ocelí HARDOX bylo dosaženo mnohem větších hodnot, kdy ocel HARDOX 450 má mez pevnosti kolem 2000 MPa a HARDOX 500 až téměř 2200 MPa.

Na snímcích metalografických výbrusů je patrná u ocelí HARDOX velmi jemnozrnná bainiticko-martenzitická struktura, která vzniká vysokým stupněm protváření, což přispívá k výborným mechanickým vlastnostem. Dále je možné spatřit i místa zbytkového austenitu. Naopak u srovnávací oceli S355J2+N je dobře rozeznatelná feriticko-perlitická struktura, u které jsou v příčném i podélném řezu viditelné roviny perlitu, které vznikají při výrobě (válcování za studena).

Hodnota meze únavy pro ocel HARDOX 500 byla naměřena 450 MPa, u HARDOX 450 se pohybuje v okolí 500 MPa a u srovnávací oceli S355J2+N 200 MPa. Pozoruhodným výsledkem je to, že u oceli HARDOX 450 byla naměřena vyšší hodnota meze únavy na hladké zkušební tyči než u HARDOX 500, přitom podle předpokladu by to mělo být naopak.

Výsledné hodnoty meze únavy jednotlivých materiálů byly ověřeny ještě jedním vzorkem při stejném zatížení. Tyto vzorky potvrdily správnost naměřených hodnot.

U plochých vrubovaných tyčí lze pozorovat díky otvoru rapidní pokles v hodnotách meze únavy, kdy je až o 50 % nižší. Na základě toho, bylo prokázáno, že tyto materiály jsou použitelné, avšak citlivé na vruby. Vrubované tyče ploché byly zkoušeny pouze orientačně. Ovšem i to stačilo k ověření hodnoty meze únavy, zjištěné u tyčí hladkých o proměnlivém průřezu, kdy hodnota u oceli HARDOX 450 byla zjištěna vyšší než u HARDOX 500, což je proti předpokladu.

V průběhu zkoušení došlo u dvou vzorků k předčasnému zastavení stroje zřejmě v důsledku kolísání proudu. Tyto vzorky byly z dalšího měření vyloučeny. U vzorku oceli HARDOX 450 vrubovaného s otvorem došlo v jednom případě k předčasnému porušení v místě uchycení. To bylo zřejmě způsobeno nekvalitní úpravou povrchu vzorku, proto byl od této chvíle kladen ještě větší důraz na správné opracování povrchu zkušebních vzorků.

Díky nízkému obsahu C a ostatních legujících prvků je zaručena zaručeně podmíněná svařitelnost. Tyto oceli jsou citlivé na vnesené teplo, při nedodržení tohoto parametru hrozí značná degradace vlastností.

Při konstrukci součásti hraje velmi důležitou roli výchozí cena materiálu. V případě těchto mikrolegovaných otěruvzdorných ocelí je cena posazena v průměrném rozmezí 2-2,5x výše než při použití „tradičních“ slitin, jako jsou S235 a S355. Toto lze však vyvážit možností použití menší tloušťky při zachování stanovené pevnosti konstrukce. Jediným limitujícím faktorem by byla tuhost.

9 Závěr

Materiály typu HARDOX by se na základě zjištěných výsledků mohly bez problémů uplatnit i v konstrukci strojních dílů dynamicky namáhaných, kde by to dovolil charakter vyráběného polotovaru (pouze plechy). Ve většině případů by dokonce svými vlastnostmi byly mnohem vhodnější volbou než doposud používané typy materiálů.

Hlavním problémem, který limituje používání těchto materiálů v praxi je jejich cena, která dosahuje mnohem vyšších hodnot než tradičně používané materiály pro dané konstrukce.

Použitá literatura

- [1] Pluhař, Jaroslav a kolektiv, *Nauka o materiálech*, SNTL, Praha (1989), 04-205-89
- [2] Schijve, J.: *Fatigue of structures and materials*. Vydavatel Springer, 2. vydání, 2009, ISBN 978-1-4020-6807-2
- [3] VŠCHT v Praze, *Korozní praskání*, on-line:
http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/koroze_korozni_praskani/teorie.htm [cit. 8. 12. 2014]
- [4] Katedra materiálového inženýrství, Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita v Žilině, *Vliv úprav povrchu na únavovou odolnost konstrukčních materiálů*, přednáška z podzimní škola, Plzeň (2013)
- [5] Ing. Jiří Dvořák, Znalecká kancelář, on line: <http://znalec.indus3.net/portfolio.htm> [cit. 19. 3. 2015]
- [6] Kratochvíl, on-line: http://www.sps-ko.cz/documents/MEC_kratochvil [cit. 26. 11. 2014]
- [7] Drik Biermann, Erman Tekkaya, Sascha Rausch a Volker Franzen, *MM Das Industriemagazin č. 36*, MM Spektrum, technický měsíčník (2012) on-line:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/nastaveni-vlastnosti-povlaku-na-tvarecim-nastroji.html> [cit. 8. 12. 2014]
- [8] Octopus Tools (2008), on line:
http://www.octopustools.com/Valeckovani/info_valeckovani.php [cit. 7. 11. 2014]
- [9] Bc. Vratislav Urban, diplomová práce, téma: *Vliv velikosti tepla na vybrané vlastnosti svaru jemnozrnné oceli*, BRNO (2011), on-line:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=44371 [cit. 7. 11. 2014]
- [10] ČSN 42 0363, *Zkouška únavy kovů – metodika zkoušení*, (1.1.1987)
- [11] Carl Schenck catalogue, Flachbiege – und Torsions – Maschinen
- [12] Materiály firmy SSAB Oxelösund AB, on-line: <http://www.ssab.com/> [cit. 17. 4. 2015]
- [13] Materiály firmy Gamaocel, s. r. o., on-line: <http://www.gamaocel.cz> [cit. 20. 2. 2015]
- [14] DIY Treade, on-line: http://www.diytrade.com/china/pd/11003475/Armox_500_Armox_600_Armox_Advance_domex_500.html [cit. 5.6. 2015]
- [15] Materiály firmy SEYFETTIN PLOT, on-line: <http://seyfettinpolat.com.tr/en/zirh.html> [cit. 20. 4. 2015]

[16] Vliv legovacích prvků na vlastnosti ocelí, <http://svanda.webz.cz/vyuka/legury.htm>
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=67410 [cit. 19. 3. 2015]

[17] SvarInfo, *Oceli HARDOX, WELDOX a jejich svařování*. (2008), on-line:
<http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008061801> [cit. 26. 11. 2014]

[18] Leco Instrumente Plzeň s r.o., on-line: <http://cz.leco-europe.com/product/gds500a/> [cit. 19. 3. 2015]

[19] https://VZM8_UnavaMaterialu.pdf [cit. 19. 3. 2015]

[20] Amar K. De, John G. Speer, David K. Matlock, *Color tint-etching for Multiphase Steels*, Advancedmaterials and processes, Colorado, Únor 2003

[21] Materiály firmy Gamaocel, s. r. o. Dostupné na adrese: <http://www.gamaocel.cz> [cit. 23. 4. 2015]

[22] Ivan Mika, *Hardox - otěruvzdorný plech* (2009), on-line: <http://stavebni-technika.cz/clanky/hardox-oteruvzdorny-plech/> [cit. 23. 4. 2015]

[23] Materiály firmy JKZ Bučovice a.s., on-line: <http://jkz.cz/node/187> [cit. 20. 4. 2015]