

Vliv atmosféry tepelného zpracování na testovanou ocel

Bc. Jan Simon

Diplomová práce
2020

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Simon**
Osobní číslo: **T18316**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Vliv atmosféry tepelného zpracování na testovanou ocel**

Zásady pro vypracování

- 1) Vypracujte literární rešerši na dané téma
- 2) Vytvořte vzorky v různých prostředích atmosféry
- 3) Proveďte stanovené zkoušky
- 4) Výsledky zkoušek zpracujte a vyhodnotte

Forma zpracování diplomové práce: **Tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MACEK, Karel, Petr ZUNA a Jiří JANOVEC. *Tepelné úpravy kovových materiálů*. Vyd., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 100 s. ISBN 80-01-02287-0.

HAZLINGER, Marián a Roman MORAVČÍK. *Chemicko-tepelné spracovanie materiálov*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2013, 171 s. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3924-5.

HLUCHÝ, Miroslav, Rudolf PAŇÁK a Oldřich MODRÁČEK. *Strojírenská technologie 1. 2. díl, Metalografie a tepelné zpracování*. Ve Scientii 2. vyd. Praha: Scientia, 1998, 165 s. ISBN 80-7183-140-9.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Řezníček, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 5. března 2020

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne: 26.4.2020

Jméno a příjmení studenta: Jan Simon

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se v teoretické části zabývá základními druhy tepelného zpracování pro automobil. Jsou zde uvedeny a popsány materiály, které budou použity pro diplomovou práci. Součástí je rozdělení chemicko-tepelného zpracování a měření mechanických vlastností v dané firmě.

V praktické části je řešena funkce a postup výroby zkušebních vzorků – stabilizátorů. Součástí jsou naměřená, zpracovaná a vyhodnocená data, která byla získána na vzorcích z materiálu 34MnB5 s různým stupněm nauhličení v plynné atmosféře při zušlechťování.

Klíčová slova: stabilizátor, zušlechťování, nauhličení, ocel

ABSTRACT

The master thesis deals in the theoretical part with basic types of heat treatment for automotive, materials that will be processed.

The practical part describes the function and procedure of production of test samples – stabilizer bars. Measured, processed and evaluated data, which were obtained on samples from 34MnB5 material with different degree of carburization in gaseous atmosphere during refining, are included.

Keywords: stabilizer, heat treatment, carbonization, steel

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Martinu Řezníčkovi, Ph.D. za aktivní a příjemnou spolupráci. Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu projektu panu Ing. Markovi Zajíčkovi, vedoucímu metalografické laboratoře panu Ing. Martinu Petrencovi, Ph.D. za skvělou spolupráci při řešení této problematiky.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELÍ PRO AUTOMOTIV	11
1.1 MATERIÁLY 26MnB5 A 34MnB5	11
1.2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	12
1.3 ŽÍHÁNÍ	13
1.3.1 Žíhání bez překrystalizace.....	14
1.3.2 Žíhání s překrystalizací	15
1.4 KALENÍ	15
1.4.1 Kalení základní-martenzitické.....	16
1.4.2 Lomené kalení	16
1.4.3 Termální kalení	17
1.4.4 Izotermické kalení	17
1.4.5 Kalení s zamrazováním	18
1.5 POPOUŠTĚNÍ	19
2 CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ PRO AUTOMOTIV	21
2.1 TEORETICKÝ ROZBOR CHEMICKO-TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ	21
2.2 CEMENTOVÁNÍ	22
2.3 CEMENTAČNÍ PROSTŘEDÍ.....	22
2.4 NITROCEMENTOVÁNÍ	25
2.5 NITRIDOVÁNÍ	25
2.6 KARBONITRIDOVÁNÍ	25
3 ZKOUŠENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOVŮ	26
3.1 TEORETICKÝ ROZBOR MECHANICKÝCH ZKOUŠEK.....	26
3.2 TVRDOST	26
3.3 ZKOUŠKY PRO MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI	27
3.3.1 Zkouška dle Brinella	27
3.3.2 Zkouška dle Vickerse	28
3.3.3 Zkouška dle Rockwella	29
3.3.4 Zkouška dle Knoopu	30
3.4 ÚNAVA MATERIÁLU	30
3.4.1 Mez únavy	30
3.4.2 Rozdělení únavy a únavový lom	31
3.4.3 Vlivy na mez únavy	33
3.5 ZKOUŠKY ÚNAVY	34
3.5.1 Zkoušky vysokokmitové únavy	34
3.5.2 Zkoušky nízkokmitové únavy	36

3.6	ZBYTKOVÉ NAPĚTÍ	36
3.6.1	Druhy zbytkových napětí	37
3.6.2	Způsoby měření zbytkového napětí	37
II	PRAKTICKÁ ČÁST	40
4	CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE	41
5	POPIS A RŮZNÉ DRUHY VZORKŮ-STABILIZÁTORŮ	42
5.1	POPIS MECHANIZMU	42
5.2	DRUHY KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ	42
5.2.1	U stabilizátor	43
5.2.2	Stabilizátor s táhlem	43
6	POPIS TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU PRO VÝROBU VZORKŮ-STABILIZÁTORŮ	44
6.1	PROCES OHÝBÁNÍ	44
6.2	PROCES ZUŠLECHŤOVÁNÍ	45
6.3	PROCES ROVNÁNÍ	47
6.4	PROCES VNITŘNÍHO TRYSKÁNÍ	47
6.5	PROCES ZALISOVÁNÍ KONCŮ	50
6.6	PROCES VNĚJŠÍ TRYSKÁNÍ	52
7	MECHANICKÉ ZKOUŠKY A JEJICH VYHODNOCENÍ.....	53
7.1	ZKOUŠKA ÚNAVY	53
7.1.1	Zkouška únavy 34MnB5 + nauhličení 0,5%C	54
7.1.2	Zkouška únavy materiálu 34MnB5 + 0,8%C.....	57
7.2	ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI DLE VICKERSE	58
7.2.1	Zkouška mikrotvrlosti 34MnB5 + nauhličení 0,5%C	60
7.2.2	Zkouška mikrotvrlosti 34MnB5 + nauhličení 0,8%C	61
7.3	ZKOUŠKA SLOŽENÍ POVRCHOVÉ VRSTVY	62
7.3.1	Zkouška složení povrchové vrstvy 34MnB5 + nauhličení 0,5%C.....	62
7.3.2	Zkouška složení povrchové vrstvy 34MnB5 + nauhličení 0,8%C.....	63
7.4	ZKOUŠKA ZBYTKOVÉHO NAPĚTÍ.....	64
7.4.1	Zkouška zbytkového napětí 34MnB5 + nauhličení 0,5%C	65
7.4.2	Zkouška zbytkového napětí 34MnB5 + nauhličení 0,8%C	66
8	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	68
	ZÁVĚR	74
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	76
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	79
	SEZNAM OBRÁZKŮ	80
	SEZNAM TABULEK.....	83

ÚVOD

Trend automobilu se ubírá čím dál více cestou ekologie. Hlavním úkolem je zachovat funkčnost všech komponent při současném snížení hmotnosti. Pomocí tohoto faktu je zapříčiněna menší spotřeba pohonných hmot osobních automobilů, čímž se dostáváme k nižší emisivitě všech osobních vozidel. Za příklad je možno uvést výměnu plného stabilizátoru za stabilizátor dutý s kruhovým profilem a následná změna tloušťky stěny. Při této změně vstupního materiálu musíme následně zadat projekty, které nám optimalizují linku, aby tyto vyrobené automobilové stabilizátory zaručovaly funkčnost.

Součástí celého výrobního procesu, který zahrnuje operace výrazně i méně ovlivňující životnost a výsledné vlastnosti, je tepelné zpracování. Toto tepelné zpracování se skládá z kalení a následného popuštění. Samotné kalení slouží k zpevnění povrchové vrstvy a následné popuštění k odstranění zbytkového napětí. Nejdůležitějším krokem je kalení, kde při ohřevu na specifickou kalící teplotu dochází ke změně struktury a díky tomuto ději také k samovolné difúzi uhlíku v materiálu.

Pomocí regulace plynné atmosféry, která je na bázi uhlíku, je možno tuto difúzi ovlivnit takovým způsobem, že oduhličení i nauhličení povrchové vrstvy se mění skokově. Samotné řízení plynné atmosféry je z velké míry ovlivněno obsahem uhlíku v materiálu. Touto hodnotou se pak odvíjí koeficient C_p plynné atmosféry. Při malých rozdílech těchto uhlíkových potenciálů se v materiálu téměř nic nestane, při větších rozdílech dochází k difúzi, tzn. k oduhličení nebo nauhličení.

Pro získání potřebných informací, ke spolehlivému vyhodnocení mechanických vlastností a především vliv plynné atmosféry, bývá použit následující pracovní postup. Prvním krokem je vytvoření CAE modelu, kde při požadované životnosti a zatížení pomocí softwaru je zjištěno, jak nastavit kmitací zařízení. Pomocí zkoušky únavy je zjištěno, které místo daného stabilizátoru je kritické. Následující zkoušky tvrdosti, povrchové struktury a zbytkového napětí bude prováděno právě v tomto místě, které je označeno jako kritické.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELÍ PRO AUTOMOTIV

V současné době se trendy v oblasti automobilu ubírají především směrem ekologičnosti což znamená vhodnou volbou materiálu a parametrů tepelného zpracování tak, aby splňoval požadavky zákazníka a měl co nejmenší hmotnost. Redukce hmotnosti zaručuje nižší spotřebu paliva, tudíž nižší produkci nežádoucích zplodin.

Pro tepelné zpracování byly použity interní firemní materiály s názvy 26MnB5 a 34MnB5. Tyto materiály byly zušlechťovány za daných teplot. [13]

1.1 Materiály 26MnB5 a 34MnB5

Tyto materiály jsou nejčastěji používané pro výrobu stabilizátorů, které se liší tloušťkou, tvarem apod. Používané materiály jsou legované především bórem, který zaručuje dobrou tvárnost při válcování za tepla a vysokou tvrdost po zušlechťení. Zkoumané pevnostní charakteristiky se odvíjí při různé kombinaci bóru, manganu a v tomto případě především uhlíku. Dále se odvíjí od druhu tepelného zpracování, teploty ohřevu a rychlosti ochlazování.

Základní pevnostní charakteristiky a chemické složení materiálu 26MnB5 jsou uvedeny v následujících tabulkách. [13]

Tab. č.1 Pevnostní charakteristiky materiálu 26MnB5 [13]

	Podélné [MPa]	Příčné [MPa]
Mez kluzu $R_{e0,2}$	340-540	360-580
Mez pevnosti v tahu R_m	580-740	580-740

Tab. č.2 Chemické složení materiálu 26MnB5 [13]

	min [%]	max [%]
C	0,23	0,27
Si	0,15	0,35
Mn	1,1	1,4
P	-	0,023
S	-	0,01
Al	-	0,08
N	-	0,01
Cr	0,1	0,25
Ti	0,015	0,045
B	0,0015	0,004

K provedení tohoto výzkumu byl použit materiál 34MnB5, kde můžeme vidět z Tab.č.4 obsah uhlíku pohybující se kolem 0,33-0,37%C, který je pro tuto diplomovou práci nejdůležitější.

Tab. č.3 Pevnostní charakteristiky materiálu 34MnB5

	Podélné [MPa]	Příčné [MPa]
Mez kluzu $R_{e0,2}$	320-600	340-610
Mez pevnosti v tahu R_m	580-820	580-820

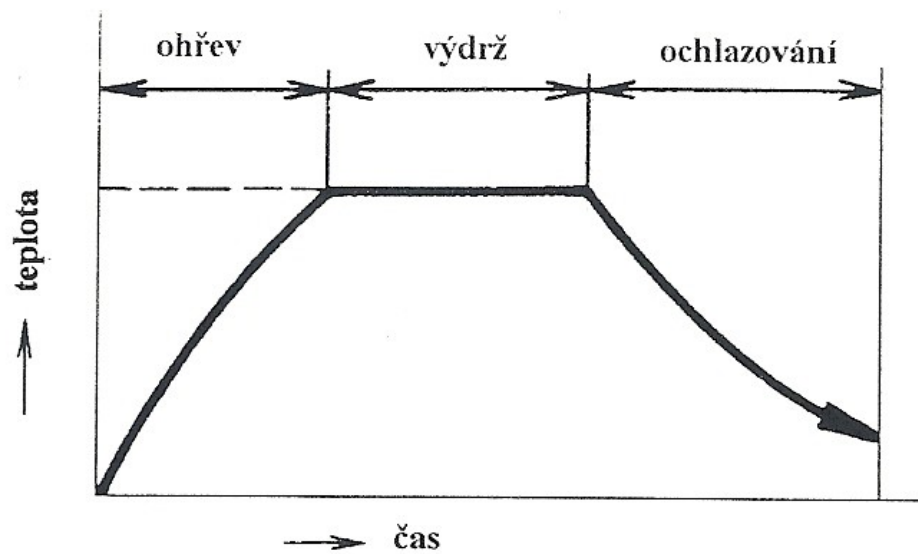
Tab. č.4 Chemické složení materiálu 34MnB5

	min [%]	max [%]
C	0,33	0,37
Si	0,15	0,35
Mn	1,15	1,45
P	-	0,02
S	-	0,01
Al	0,015	0,06
N	-	0,01
Cr	0,05	0,2
Ti	0,015	0,06
B	0,0015	0,0045

1.2 Teplené zpracování

V této kapitole budou stručně popsány jednotlivé druhy tepelného zpracování, s kterým se můžeme setkat v běžném automobilovém průmyslu.

Veškeré tepelné zpracování spočívá v ohřevu na danou teplotu, časovou výdrž na této teplotě a následujícím ochlazení, které způsobuje změnu struktury a mechanických vlastností. Na Obr. č.1 můžeme vidět diagram tepelného zpracování, kde se mění jednotlivé proměnné podle požadavků na výsledné mechanické vlastnosti.



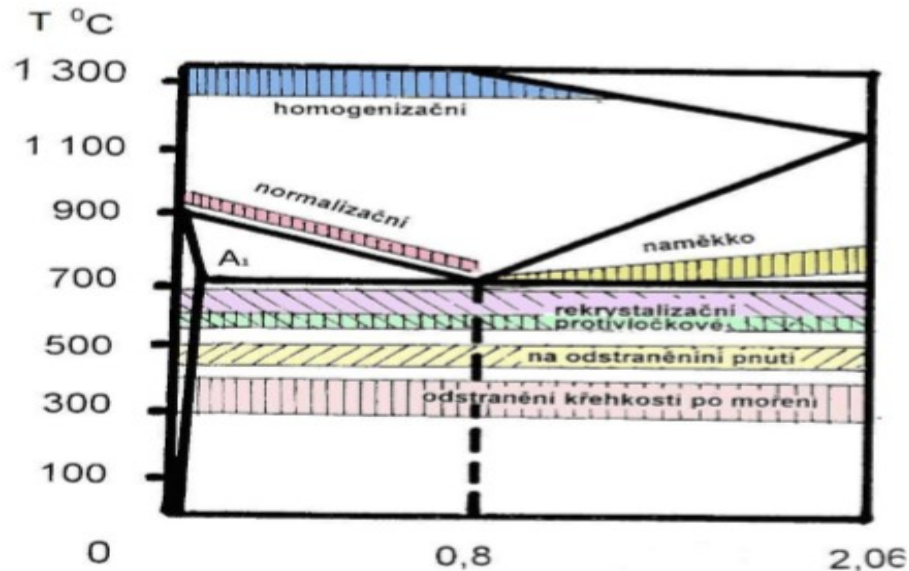
Obr. č.1 Diagram tepelného zpracování ocelí [5]

Podle přesné specifikace teplot ohřevu, času výdrže a rychlosti nebo prostředí ochlazování jsou známy tyto druhy tepelného zpracování: - Žihání

- Kalení
- Popouštění
- Chemicko-tepelné zpracování [5]

1.3 Žihání

Žiháním nazýváme postup při tepelném zpracování, při kterém se výrobky ohřívají na určité teplotu a po výdrži následuje pomalé ochlazování. Cílem je pak dosažení určité úrovně rovnovážného stavu. Účel žihání bývá různý a závisí nejen na druhu oceli, ale i na předcházejících výrobních operacích. Jedná se o homogenizaci, dosažení nízké tvrdosti, snížení zbytkového pnutí, zotavení zdeformovaných zrn apod. Oblasti teplot základních způsobů žihání v rovnovážném diagramu Fe-Fe₃C jsou uvedeny na Obr. č.2. [5]



Obr. č.2 Žihací teploty uhlíkových ocelí [5]

1.3.1 Žihání bez překrystalizace

Jedná se o žihání, při kterých obvykle teplota žihání nepřesáhne teplotu A_{c1} . V ocelích se hlavně mění rozpustnost uhlíku a dusíku, rozpadají se nerovnovážné fáze.

a) Žihání ke stabilizaci rozměrů

Úkolem tohoto tepelného zpracování je dosažení co největší stability rozměrů, zejména kalibrů a měřidel. U nízkouhlíkových ocelí probíhá ohřev na teplotu kolem $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ a výdrž po dobu cca 200 h a následujícího ochlazení. U ocelí s vyšším obsahem legujících prvků se používá teplot až $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ a doby výdrže až 500 h.

b) Žihání ke snížení zbytkových pnutí

Principem tohoto zpracování je snížení zbytkových pnutí vzniklých při předešlých operacích jako je mechanické opracování, svařování bez změny struktury a bez podstatných změn původních mechanických vlastností. Samotné zpracování sestává z pomalého ohřevu na žihací teplotu výdrž 1 až 2 h a z pomalého ochlazování.

c) Žihání rekrytalizační

Úkolem je obnovení tvárných vlastností oceli po tváření za studena. Tedy odstranění protažených zrn a zpevnění způsobeného tvářením za studena za současného vzniku nových feritických zrn.

d) Žihání naměkko

Účelem tohoto žihání je zpravidla převedení lamelárního perlitu na globulární. U ocelí s obsahem uhlíku nad 0,4%, u eutektoidních a nadeutektoidních ocelí dochází ke snížení tvrdosti a tím ke zlepšení následné obrobitelnosti za studena. Rovněž je snahou dosáhnout větší homogenizace struktury vhodné pro následující kalení.

1.3.2 Žihání s překrystalizací

Jedná se o žihání nad teplotu fázových přeměn, kdy dochází k úplné nebo částečné austenitizaci. Toto žihání odstraňuje strukturní nepravidelnosti, které vznikly důsledkem předcházejících technologických operací.

a) Normalizační žihání

Úkolem normalizačního žihání je především dosažení jemnozrnné a rovnoměrné struktury tvořené obvykle směsí feritu a perlitu.

Samotné tepelné zpracování se skládá z co nejrychlejšího ohřevu na teplotu 30 až 50°C nad A_{c3} , A_{c1} resp. A_{cm} krátkého teplotního vyrovnání v celém průřezu a následném ochlazení na vzduchu.

b) Homogenizační žihání

Úkolem homogenizačního žihání je vyrovnat co nejvíce nestejnou chemickou složení ocelí difuzí. Velikost nestejnoměrnosti závisí na tvaru litého či tvářeného polotovaru a týká se především nečistot a plynů.

c) Žihání pro zhrubnutí zrna

Účelem tohoto žihání je zvětšení austenitického zrna. Vlastní postup se skládá z austenitizace na značně vyšších než A_{c3} (950 až 1000 °C) a dalšího ochlazování obvykle v peci. Toto zpracování se používá ve zvláštních případech, jako u ocelových plechů pro elektrotechniku, u ocelí k cementování apod. [5]

1.4 Kalení

Kalení se především využívá ke zvýšení tvrdosti oceli vytvořením částečně nebo zcela nerovnovážné struktury. Kalením nazýváme postup tepelného zpracování, při kterém se součást ohřeje na austenitizační teplotu (zpravidla u podeutektoidních ocelí 30 až 50 °C nad

Ac₃, u nadeutektoidních ocelí nad Ac₁, u ocelí s vysoce stabilními karbidy na teploty podstatně vyšší), po výdrži na této teplotě následuje ochlazení větší rychlosti než kritickou. Základní strukturou kalených ocelí je teda martenzitická nebo bainitická.

Martenzitická přeměna probíhá při výrazném přechlazení austenitu za nízkých teplot, kdy už není možná difúze nejen substitučních prvků, ale ani difúze uhlíku. Charakter procesu je podobný plastické deformaci a proto bývá nazýván stříhovou přeměnou.

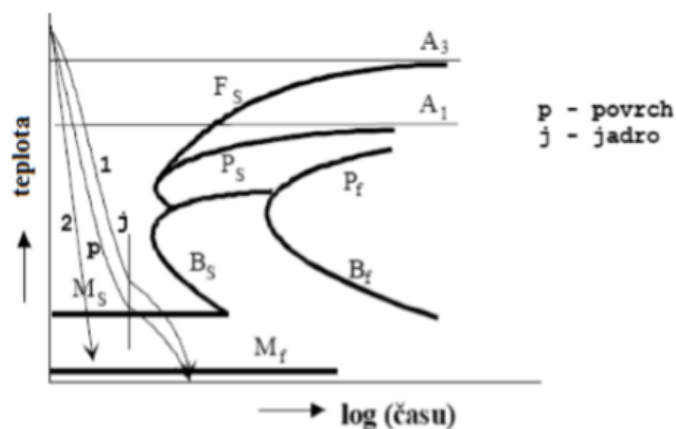
Bainitická přeměna má některé typické znaky perlitické přeměny, jinými znaky se podobá přeměně martenzitické. S perlitickou přeměnou se shoduje tím, že začíná až po určité inkubační periodě, jejím produktem je směs feritu a karbidů a tvorba bainitu se může uskutečňovat jak izotermicky, tak anizotermicky. [6]

1.4.1 Kalení základní-martenzitické

Základní kalení je nejjednodušší a nejčastější způsob kalení. Po ohřevu na správnou kalicí teplotu následuje ihned plynulé (nepřetržitě) ochlazení až na teplotu ochlazovacího prostředí. Takto zakalené předměty se pak popouští, protože zde dochází ke vzniku velkého množství vnitřního pnutí.

1.4.2 Lomené kalení

Účelem tohoto ochlazování je zmenšení ochlazovací rychlosti v průběhu přeměny austenit-martenzit a tím zmenšování tepelných strukturních pnutí. Lomené kalení spočívá v nepřetržitěm ochlazování v oblasti teplot nad M_s z prostředí s větší ochlazovací rychlostí do prostředí s menší ochlazovací rychlostí. Tak může být kalený předmět ochlazován ve vodě a v oleji, nebo v oleji a na vzduchu. [6]



Obr. č.3 Lomené kalení (1), Martenzitické kalení (2) [6]

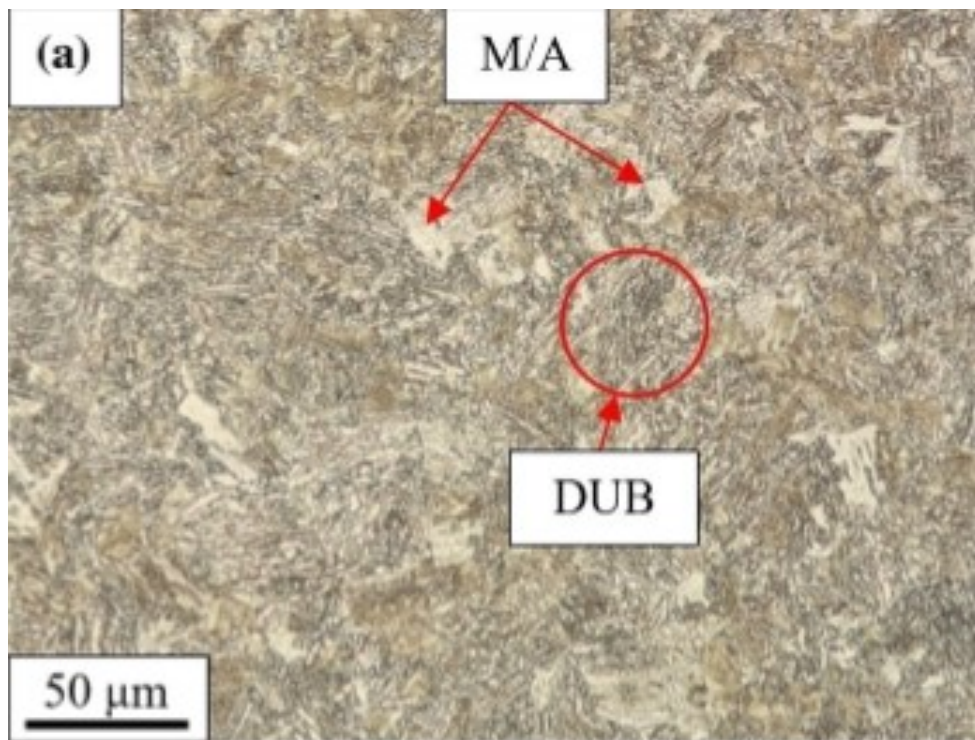
1.4.3 Termální kalení

Toto kalení má za úkol oddělit tepelné a strukturní pnutí a tím zmenšit jejich společný účinek. Vlastní postup termálního kalení spočívá v martenzitzickém kalení s ochlazovací rychlostí větší než kritickou v teplé lázni na teplotu nad M_s , výdrž do vyrovnání teploty, pokud možno v celém průřezu kaleného předmětu, aniž by nastala přeměna na bainit a dochlazení na teplotu pokojovou.

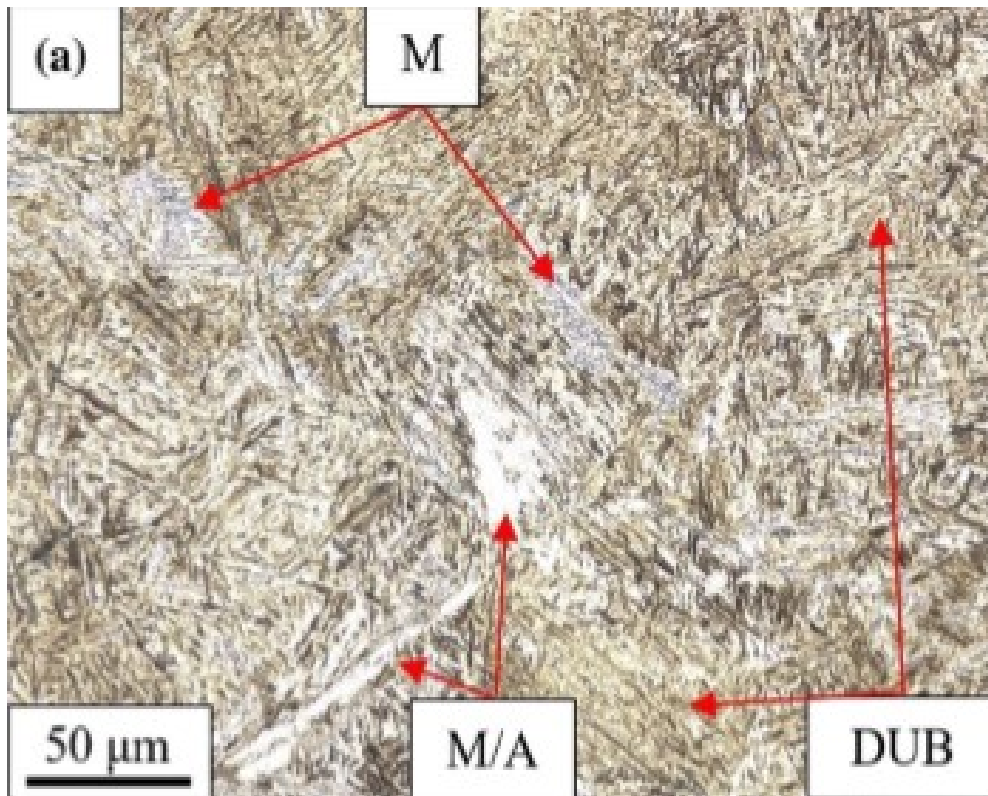
1.4.4 Izotermické kalení

Je to druh kalení, při kterém teplota lázně leží pod teplotou M_s příslušné oceli. Výsledná struktura je pak tvořena směsí bainitu, martenzitu a zbytkového austenitu. Takovou strukturu lze získat u ocelí s vhodným tvarem diagramu IRA při plynulém ochlazování. [6]

Při použití různých druhů izotermického kalení se mění mikrostruktura a tvrdost bainitické oceli. Při změnách teplot a časů se mění objemové frakce zadržného austenitu, a především obsah uhlíku. Při snížení izotermické teploty dochází ke zvýšení koncentrace uhlíku v austenitu. Dochází také ke zvětšení morfologie austenitu, jak vidíme na Obr. č.4 a č.5.[16]



Obr. č.4 Surový materiál–DUB-degenerovaný austenit, M/A–fáze austenit martenzitzit [16]



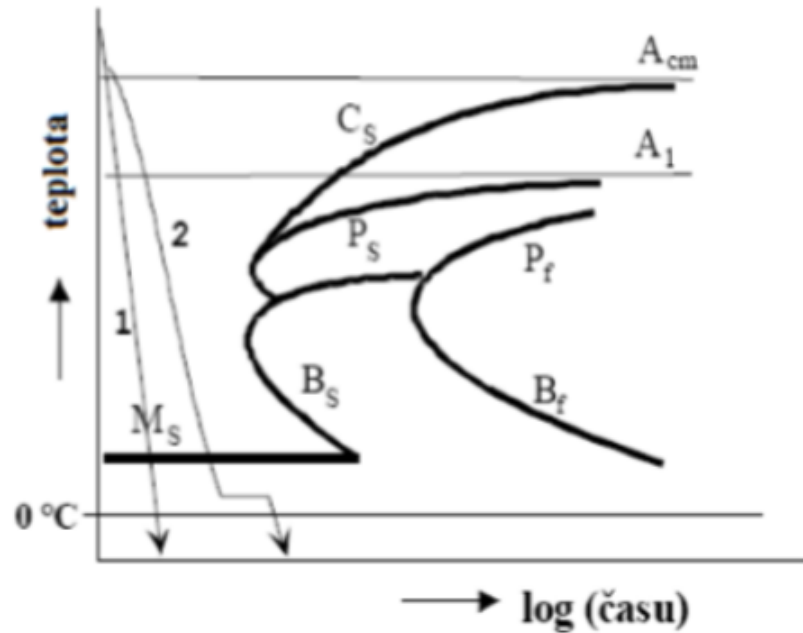
Obr. č.5 Izotermicky zakalený materiál [16]

1.4.5 Kalení s zamrazováním

U kalení se zamrazením dochází ke zmenšení množství zbytkového austenitu a tím i zvýšení tvrdosti a zlepšení rozměrové stability. Je důležité pro oceli, které mají teplotu M_f nižší než $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zmrazování má proběhnout v nejkratší době po martenzitickém kalení, aby se zbytkový austenit nestabilizoval.

Jako ochlazovací médium se obvykle používá směs lihu a tuhého oxidu uhličitého (suchý led) nebo tekutého dusíku. Přímé ochlazení kaleného předmětu z austenitizační teploty ve zmrazovací lázni je spojeno se vznikem značných zbytkových pnutí a jimi vyvolaných deformací.

Zmrazování se provádí na různou teplotu. Jedná se z pravidla o teploty -40°C , -70°C , -120°C . Vysoce legované oceli se zmrazují až na -196°C . Pro účely zmrazování se v praxi používá nádob s již uvedenými látkami, které způsobí toto výrazné podchlazení. [6]

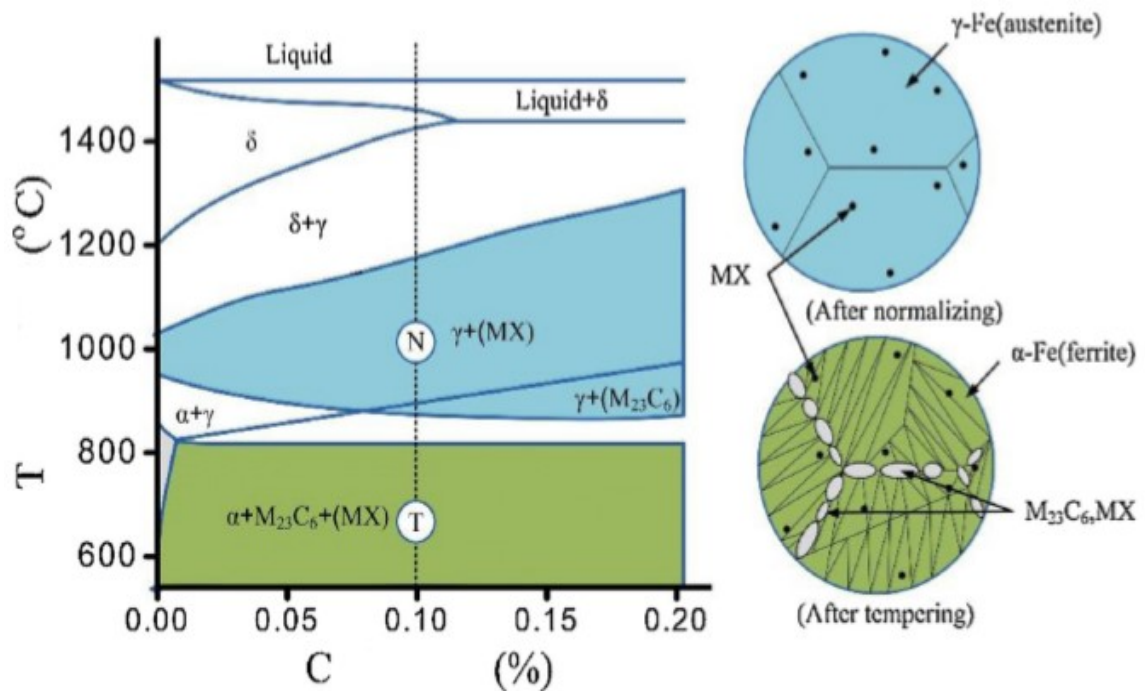


Obr. č.6 Kalení s zamrazováním [6]

1.5 Popouštění

Popouštění je ohřev zakaleného předmětu na určenou teplotu pod A_1 , výdrž na této teplotě k vytvoření potřebných struktur blíží se k rovnovážnému stavu u ocelí s martenzickou nebo bainitickou strukturou a další ochlazení na teplotu okolí způsobem vhodným pro danou ocel. Slouží především ke snížení křehkosti a vnitřního pnutí dané součásti a naopak ke zvýšení houževnatosti, ale snížení tvrdosti. Po zakalení se nejčastěji popouští nástroje, které jsou namáhány rázy. [6]

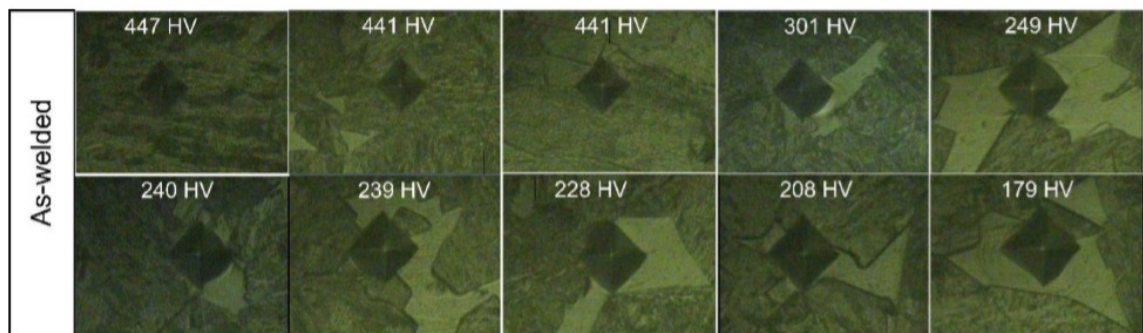
Pro svařovaný materiál jsme nuceni využít tepelné zpracování nižších teplotních šoků, protože svařené materiály jsou velice náchylné z důvodu praskání v oblasti svaru, proto volíme zušlechťování nebo popouštění, podle druhu materiálu. Z předešlých výzkumů jsme schopni konstatovat, že při popouštění svařovaného materiálu, což je i v našem případě (svařovaná válcovaná trubka za studena), při teplotě 760 °C po dobu dvou hodin a následném ochlazením na vzduchu vznikne vyšší stupeň heterogenní mikrostruktury viz Obr. č.7 a naměřená tvrdost dle Vickerse se zvedne z 179 HV na 301 HV. [15]



Obr. č.7 Oblast heterogenity struktury při popouštění [15]

Toto tepelné zpracování bylo zvoleno z důvodu snížení zbytkového napětí, stabilizování martenzitické struktury a zvýšení houževnatosti, kterou jsme schopni určit pomocí Scharpyho kladiva.

Měření tvrdosti probíhalo se zatížením 500g po dobu 10 sekund, při měření surového materiálu se tvrdost pohybovala kolem 404-480 HV. Oblast kolem svařovaného materiálu se pohybovala v rozmezí 240-281 HV. Naměřené hodnoty vidíme na Obr. č.8. [15]



Obr. č.8 Oblasti měření tvrdosti surový materiál – svařovaná oblast [15]

Díky těmto předešlým výzkumům víme, v jakých mezích by se měly naměřené hodnoty pohybovat, tudíž jsme schopni eliminovat vadné kusy.

2 CHEMICKO–TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ PRO AUTOMOTIV

Při jakémkoliv ohřevu stabilizační tyče dochází k oxidaci, tudíž degradaci materiálu a samotnému odpařování uhlíku. Díky tomuto faktu, jsou stabilizační tyče zpracovávány na co nejméně ohřevů. Pro dodržení výrobních požadavků, jsme nuceni při zušlechťování nebo kalení dodávat do plynné atmosféry tepelného zpracování směs plynu, který obsahuje uhlík, který zaručuje potřebnou tvrdost a pevnost na povrchu po zpracování. [8]

V našem případě jsme schopni tuto atmosféru regulovat v různých indexech nauhličení Cp a tím měnit výsledné mechanické vlastnosti, které budou dále předmětem zkoumání. V následující kapitole jsou rozebrány možnosti cementování v různých prostředích, popřípadě jiné druhy chemicko-tepelného zpracování. [8]

2.1 Teoretický rozbor chemicko-tepelného zpracování

Při tepelném zpracování dochází vždy k reakcím mezi zpracovávaným výrobkem a okolním prostředím. Výměna hmoty a povrchu výrobku s okolním prostředím může být uskutečňována záměrně (chemicko-tepelné zpracování) nebo samovolně. Obecně v reakčním systému (reakční prostředí a zpracovávaný materiál) mohou existovat způsoby výměny hmoty:

- Látka přechází z reakčního prostředí do předmětu (např. cementace, nitridace apod.)
- Látka přechází z předmětu do reakčního prostředí (např. odvodíkování, oduhličování apod.)
- Přenos hmoty je v obou směrech stejný.

Chemicko-tepelným zpracováním rozumíme procesy, při kterých dosahujeme požadované změny struktury a vlastností tepelným zpracováním provázeným změnami chemického složení zpracovávaného výrobku. Změna chemického složení může probíhat v celém objemu výrobku nebo jen v povrchových vrstvách.

Difúzním sycením povrchu výrobku různými prvky je možno dosáhnout rozdílných mechanických nebo fyzikálně-chemických vlastností povrchu a jádra. Těchto vlastností je možno v zásadě dosáhnout dvěma způsoby:

- Úpravou chemického složení povrchu výrobku a následujícím tepelným zpracováním (např. cementace)
- Pouze samotnou úpravou chemického složení (např. nitridace)

Cílem chemicko-tepelného zpracování bývá nejčastěji zvýšení tvrdosti povrchu, odolnosti proti opotřebení, zvýšení odolnosti proti cyklickému namáhání (únavě) – to vše při zachování houževnatého jádra. Řada způsobů chemicko-tepelného zpracování zvyšuje také odolnost proti korozi a proti žáru (např. hliníkování, difúzní chromování, boridování). [6]

2.2 Cementování

Cementování je sycení povrchu uhlíkem v kapalném, plynném nebo tuhém prostředí při teplotě nad A_{c3} . Účelem cementování je obohacení povrchové vrstvy nízkouhlíkové oceli (do 0,3%) uhlíkem podeutektoidní nebo nadeutektoidní koncentrace. Vzniklá povrchová vrstva se po zakalení vyznačuje vysokou tvrdostí a odolností proti otěru. Cementování zvyšuje zároveň únavovou pevnost. K dosažení zvýšené koncentrace uhlíku v povrchové vrstvě je třeba cementovaný předmět ohřát nad teplotu A_{c3} , kdy je struktura nízkouhlíkové oceli tvořena austenitem, tzn. fází, v níž se uhlík rozpouští rychleji a ve značném stavu. Ve správně nauhličeném povrchu má být obsah uhlíku 0,85 %. Hloubka cementované vrstvy je nejčastěji do 1 mm, jen zcela ve výjimečných případech více než 2 mm. Vyšší obsah uhlíku v cementované vrstvě než 1 % se projeví vyloučením nadeutektoidních karbidů, které jsou nebezpečné zejména tehdy, jsou-li rozloženy na hranicích zrn, neboť velmi snižují houževnatost cementované vrstvy. Obsah a rozložení uhlíku v cementační vrstvě závisí na použitém cementačním prostředí, na výši cementační teploty, době výdrže na cementační teplotě a na chemickém složení cementované oceli, především obsahu uhlíku a karbidotvorných prvků.

2.3 Cementační prostředí

Pro nauhličení povrchové vrstvy oceli lze využít prostředí sytké, plynné nebo kapalné.

a) Cementování v sytkém prostředí

Cementování v sytkém prostředí je nejstarším způsobem. Předměty musí být suché a čisté. Tuhé prostředí (zásyp) se skládá z dřevěného uhlí a aktivátoru. Výrobky se vkládají do krabice z nízkouhlíkového nebo žáruvzdorného plesu spolu s cementačním práškem tak, aby jim byly rovnoměrně obklopeny. Krabice se uzavře víkem a utěsní jílem.

Při cementační teplotě reaguje dřevěné uhlí s kyslíkem uzavřeným v krabici za vzniku CO . Oxid uhelnatý se ve styku s povrchem oceli rozkládá na oxid uhličitý a uhlík. Cementační teplota se obvykle pohybuje v rozmezí 880 až 920 °C.

Tento proces je na ústupu, protože je zdlouhavý a málo produktivní. Nevýhodou tohoto způsobu jsou značné hmoty, které je nutno spolu s výrobky ohřát na cementační teplotu. [6]

b) Cementování v kapalném prostředí

Cementování v kapalném prostředí je vhodné pro drobné a střední výrobky, zvláště pokud nevyžadují silné cementační vrstvy. Hlavními složkami kapalných prostředí jsou uhličitany alkalických kovů a karbid křemíku. Původně se používaly lázně roztavených chloridových solí a jako nositel aktivního uhlíku byly používány kyanidy.

Rychlost nauhličování je hlavně ovlivněna koncentrací kyanidů v cementační lázni, jež se pohybuje od 10 do 70 %. Výrobky určené k cementaci musí být dokonale čisté a suché. [6]

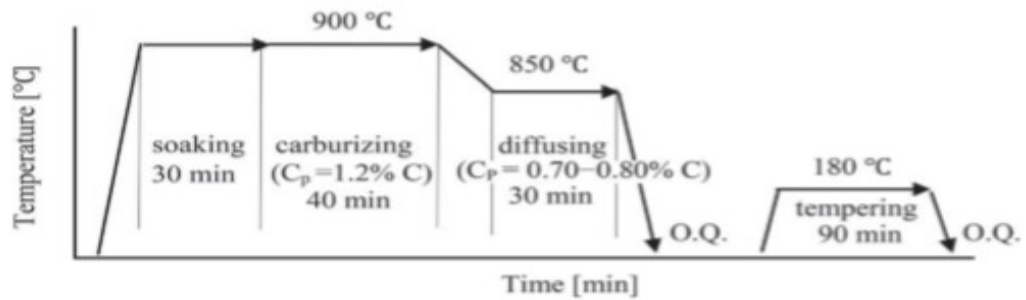
c) Cementování v plynném prostředí

Cementování v plynném prostředí je moderní, technologicky výhodný a produktivní způsob. Plynná prostředí jsou multikomponentní směsi plynů. K jejich výrobě se používá plyn nebo kapalných látek.

Při cementaci s použitím nosného plynu se používá průběžných nebo víceúčelových pecí. Aktivní atmosféra je v peci již před vložením vsázky. Obvykle cementační atmosféru tvoří nosná endoatmosféra s přídavkem obohacujícího plynu. Složení pracovní atmosféry neodpovídá výchozímu složení přiváděnému do pece.

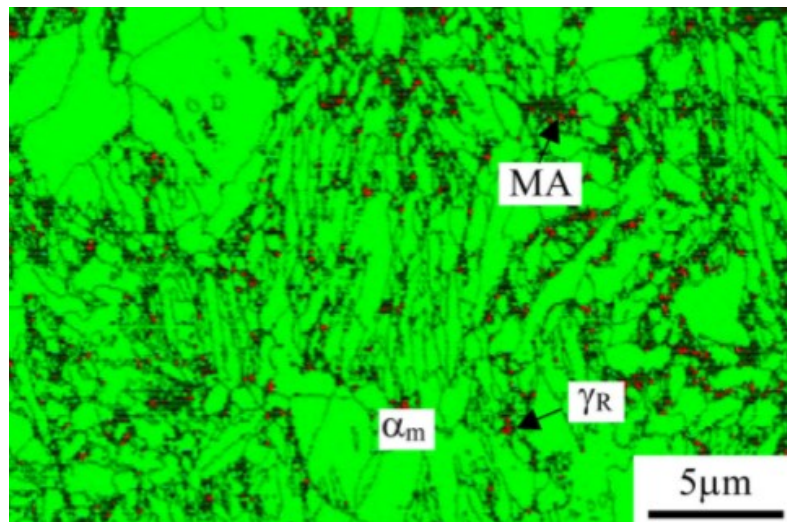
Teploty cementování, které se pohybují v rozmezí 850–1050 °C závisí především na druhu oceli. Ale i na složení nauhličujícího prostředí a velikosti výrobku. Nižších teplot se využívá u ocelí CrNi a drobných výrobků. Zvyšováním teploty se cementování urychluje zejména v důsledku zvětšení difuzivity uhlíku v austenitu. [6]

Při cementování povrchu jsou uváděny tzv. C_p – difuzní potenciály, které určují míru uhlíčení povrchu. Tento děj probíhá buď ve vakuu, nebo v kombinaci různých směsí plynů. V případě, který je uveden na Obr. č.9 se jedná o vakuové uhlíčení, kde v první fázi probíhá ohřev na kalící teplotu což je 900 °C a zároveň probíhá sycení povrchu uhlíkem ve dvou stupních a to $C_p=1,2\%$ C po dobu 40 minut a $C_p=0,8\%$ po dobu 30 minut. Následuje zakažení do oleje. Po zakažení přichází popouštěcí ohřev na 180 °C po dobu 90 minut a následné ochlazení. [21]



Obr. č.9 Tepelné zpracování s uhlíkovou atmosférou s difúzním koeficientem C_p
[21]

Pomocí tohoto procesu je zabráňováno odpařování uhlíku z povrchu materiálu a jeho oxidaci. Naopak je dodáván povrchu uhlík, pomocí kterého pak vzniká tvrdší a lépe odolný povrch proti opotřebení a cyklické únavě. Na přiloženém Obr. č.10 můžeme vidět povrch této zpracované oceli, který se skládá z oblasti martenzitu α_m , austenitu γ_R a fázi austenit-martenzit MA. [21]



Obr. č.10 Zachycení nauhličeného povrchu pomocí elektronového mikroskopu
[21]

Ochrana proti cementaci

V některých případech je zapotřebí, aby některé části povrchu cementovaných výrobků zůstaly po zakalení měkké a dobře obrobitelné. Tyto části povrchu, jako např. otvory, drážky, závity se chrání proti nauhličení. Nejdokonalejší ochranou ve všech cementačních prostředích je přídavek na obrábění, které se provádí před kalením. Velmi dobrou ochranou se taky osvědčila Pasta Anticarb. Tato směs je ve vodě snadno rozpustná a proto se její zbytky

snadno odstraňují. Pro cementování v tuhém prostředí se používá jako ochrany různých náterů a past ze směsi vodního skla, skelného prášku a mastku.

2.4 Nitrocementování

Podstata nitrocementace spočívá v nasycování povrchu uhlíkem a dusíkem při teplotách nižších než teploty cementační, ale vyšších než teploty A_{c3} , nejčastěji do 840 až 860 °C. Vrstva se tedy tvoří současně difúzí dusíku a uhlíku v austenitu. Nitrocementované vrstvy jsou obdobou vrstev cementovaných a žádoucích vlastností je tedy dosaženo jejich ochlazením z cementační teploty takovou rychlostí, aby nastala přeměna uhlíko-dusíkového austenitu v martenzit. Přítomnost dusíku v nitrocementovaných vrstvách je příčinou rozdílů, kterými se nitrocementované vrstvy liší od vrstev cementovaných. Lze je shrnout asi následujícím způsobem. [6]

Dusík snižuje překryštalizační teploty austenitu. Při nitrocementaci za teplot nižších než teplota jádra se v důsledku toho hranice austenitické oblasti posouvá k menším obsahům uhlíku. Tím usnadňuje difúze uhlíku v neúplně austenitizované základní hmotě.

2.5 Nitridování

Nitridování je sycení povrchu ocelového předmětu dusíkem v plynném nebo kapalném prostředí při teplotě pod A_{c1} (470 až 580 °C). Na rozdíl od cementování se požadovaných vlastností povrchu dosahuje již během nasycování dusíkem, tzn. bez následujícího tepelného zpracování. Účelem nitridování je vytvoření povrchové vrstvy obsahující vysoce disperzní nitridy slitinových prvků s vysokou afinitou k dusíku, která si zachová velkou tvrdost a odolnost proti otěru i za vyšších teplot. Tímto zpracováním se dosahuje též co nejmenších tvarových změn za současného zvýšení meze únavy. [6]

2.6 Karbonitridování

Podstava karbonitridace spočívá opět v nasycování povrchu uhlíkem a dusíkem při teplotách nižších než A_{c1} , obvykle za teplot 560 až 620 °C. Účelem tohoto zpracování je vytvoření homogenní vrstvy karbonitridů, která je relativně tvrdá, má dobré třecí vlastnosti, vysokou odolnost proti zadírání a korozní vlastnosti.

3 ZKOUŠENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOVŮ

Pro splnění požadavků zákazníka je nutná důkladná kontrola formou mechanických zkoušek. Interní standardy se ubírají směrem měření tvrdosti, meze únavy a zbytkového napětí po tepelném zpracování. Po splnění nejnižší potřebné hodnoty u všech provedených zkoušek dochází k expedici hotových kusů k zákazníkovi. V následující kapitole jsou podrobně popsány jednotlivé možnosti daných zkoušek a jejich vyhodnocení. V tomto případě bude použita forma tvrdosti podle Vickerske, měření únavy na mechanických kmitacích zařízeních a zbytkové napětí měřené pomocí rentgenu. [8]

3.1 Teoretický rozbor mechanických zkoušek

Mechanické vlastnosti představují napěťové a deformační charakteristiky materiálu. Chování materiálu za působení vnějších sil je možno v některých případech vyjádřit jednoduchými vztahy. Po přepočtu na určitý tvar nebo rozměr tělesa se používají pro pevnostní výpočty. Některé vlastnosti vystihují chování materiálu za složitějších podmínek, zejména se zřetelem na tvar, rozměr a napjatost součásti.

Při výpočtech pevnostních hodnot materiálu se pro eliminaci rozměrů vztahuje působení vnější síly na jednotku namáhaného průřezu. Zatížení jednotky průřezu se nazývá napětí. Vnějšímu napětí odporují vnitřní síly materiálu.

Při rozboru jednotlivých mechanických zkoušek jsme schopni rozlišovat tyto vlastnosti materiálu: pružnost, pevnost, tvrdost, tvárnost a houževnatost. [7]

3.2 Tvrdost

Rozumíme odolnost povrchových částí hmoty proti místnímu porušení vnikáním cizího tělesa. Tvrdost však není fyzikálně definovatelnou vlastností, neboť je výslednicí vlastností hmoty, zejména elasticity, křehkosti a plasticity, fyzikálně-chemických vlastností povrchu i vlastností chemických.

U měření tvrdosti můžeme dostat různé hodnoty v závislosti na:

- teplotě,
- velikosti zrna,
- vnitřním pnutí,
- množství legur.

Zkoušky tvrdosti lze následně rozdělit na více druhů. Podle velikosti zatížení indentoru, tvaru indentoru a podle chování materiálu při zkoušce. Při tomto rozdělení jsme schopni definovat tři skupiny:

- Staticko-plastické – Brinell, Rockwell, Vickers
- Dynamicko-plastické – Poldi kladívko
- Dynamicko-elastické – Shoreho skleroskop

Dále je možno podle zatěžující síly F na indentor a hloubky vtisku h klasifikovat dle ISO 14577 tři skupiny statických zkoušek takto:

- Zkouška makrotvrdomosti – zatížení F v rozmezí 2 N – 30 kN
- Zkouška mikrotvrdomosti – zatížení F je menší jako 2 N, $h > 200$ nm
- Zkouška nanotvrdomosti – $h < 200$ nm
- Zkouška ultranano tvrdosti – F v rozmezí 0,5 – 1 mN

Podle provedení zkoušky rozdělujeme měření do tří skupin:

- Vtiskové – Dle druhu dané zkoušky je následně změřen vtisk a pomocí zvoleného vzorce vypočtena tvrdost, jednodušší variantou jsou digitální tvrdoměry
- Odrazové – velikost odrazu kulovitého diamantového hrotu určuje tvrdost zkoušeného předmětu
- Vrypové – podle šířky vrypu vytvořené diamantovým hrotem při malém zatížení odečítáme tvrdost. [7]

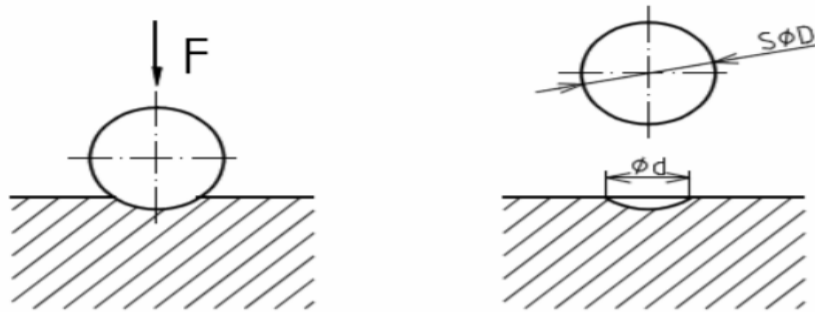
3.3 Zkoušky pro měření mikrotvrdomosti

U zkoušek mikrotvrdomosti se oproti měření makrotvrdomosti nebo mikrotvrdomosti nemění indentor, ale jen rozsah zatěžujících sil. U mikrotvrdomosti se jedná o 0,098N až 9,81N (1 – 100g). Při klesajícím zatížení nejsou výsledky měření zcela přesné, protože nedochází ke kvalitnímu otisku indentoru.

3.3.1 Zkouška dle Brinella

Tvrdomost podle Brinella HB je tvrdost vyjádřena jako poměr působícího zatížení F k ploše povrchu A kulovitého vtisku. Podstatou zkoušky je vtlačování ocelové kalené a leštěné kuličky průměru D do zkušební tělesa nebo výrobku působením síly F , směřující kolmo

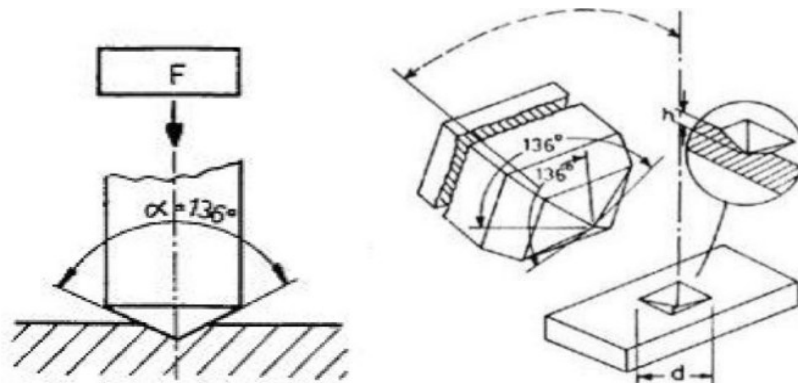
k měřenému povrchu po stanovenou dobu a změření průměru vtisku d po odlehčení zatížení. Princip měření tvrdosti HB je na Obr. č.11. [7]



Obr. č.11 Zkouška dle Brinella [7]

3.3.2 Zkouška dle Vickerse

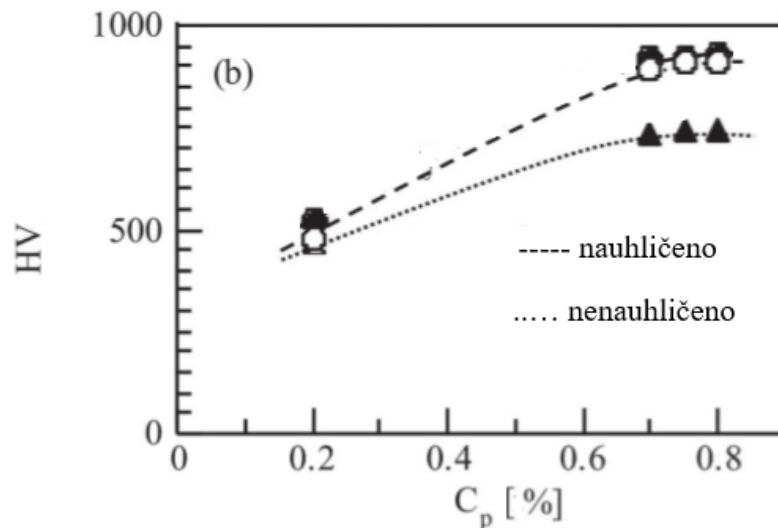
Zkouška Vickerse je založena na stejném principu jako zkouška Brinellova, jen místo kuličky se vtláčuje do materiálu diamantový vyleštěný pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem mezi protilehlými stěnami jehlanu 136° . Tvrdost podle Vickerse HV je tvrdost vyjádřená jako poměr zkušebního zatížení F k ploše povrchu vtisku, který se uvažuje jako pravidelný čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou a úhlopříčkou d . Princip měření vidíme na Obr. č.12. [7]



Obr. č.12 Zkouška dle Vickerse [7]

Jak již bylo uvedeno, při sycení povrchu uhlíkem a následném zakalení dochází ke zvýšení tvrdosti na povrchu. Avšak vzniká značné množství zbytkového napětí, jak při zakalení tak při výrobě vzorků-ohýbáním. Tudíž následuje popouštění pomocí kterého zajistíme tvrdost na povrchu a houževnatost v jádře materiálu. Při sycení povrchu uhlíkem s $C_p=0,80\%$ po dobu 40 minut a následném zakalení vznikají na povrchu části martenzitu, austenitu a fázi austenit/martenzit. Při měření tvrdosti pomocí metody Vickers s zatížením 500 g po dobu 10

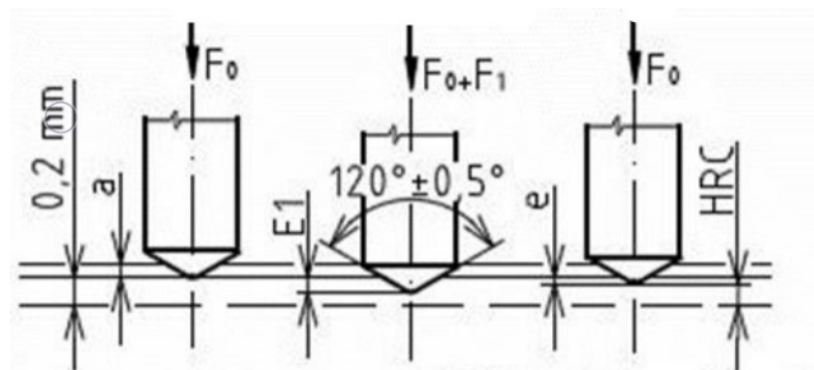
s se dostáváme k následujícímu grafu Obr. č. 13, ze kterého lze vyčíst, že čím více je povrch nauhličen pomocí uhlíkové atmosféry, tím roste tvrdost na povrchu, která se pohybuje v tomto případě kolem 900HV, avšak se může lišit v závislosti na množství legur, parametru tepelného zpracování apod. [21]



Obr. č.13 Vliv C_p na tvrdost HV změřenou na povrchu [21]

3.3.3 Zkouška dle Rockwella

Od zkoušky Brinella a Vickerse se liší tím, že se tvrdost vyjadřuje hloubkou trvalého vtisku. Podstata zkoušky spočívá ve vtláčování vnikajícího tělesa s diamantovým kuželem (stupnice C, A, N) o vrcholovém úhlu 120° se zaoblením poloměrem 0,2 mm nebo kalené ocelové kuličky (stupnice B, T) průměru 1,5875 mm postupně nadvakrát a ve změření trvalého zvětšení hloubky vniknutí vnikajícího tělesa. Postup měření tvrdosti podle Rockwella je znázorněn na Obr. č.14. [8]

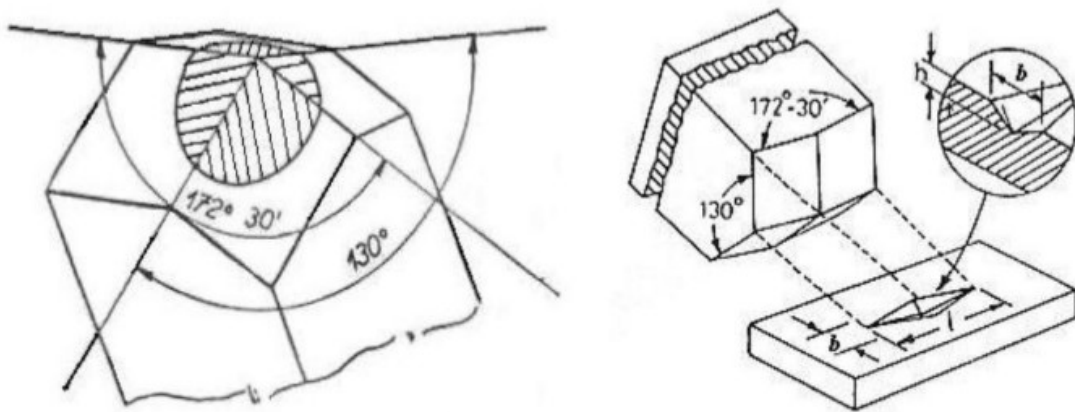


Obr. č.14 Zkouška dle Rockwella [8]

3.3.4 Zkouška dle Knoop

U této zkoušky tvrdosti se používá velmi malých zatěžujících sil, protože se používá pro zkoušení tenkých plechů a křehkých materiálů.

Indentorem je čtyřstěnný diamantový jehlan, jehož otisk má tvar kosodelníku. Hrany svírají $175,5^\circ$ a 130° . Poměr délek vedlejší a hlavní úhlopříčky je 1:7,11, poměrem hlavní úhlopříčky k hloubce vtisku je 30:1. Tvrdost dle Knoop je popsána jako poměr zkušebního zatížení a plocha vtisku. Spolehlivost zkoušky zaručuje podložka, která zabraňuje pohnutí zkoušeného materiálu. Doba od začátku po konec zatěžování nesmí překročit 10 s. Princip zkoušky dle Knoop můžeme vidět na Obr. č. 15. [14]



Obr. č.15 Zkouška dle Knoop [9]

3.4 Únava materiálu

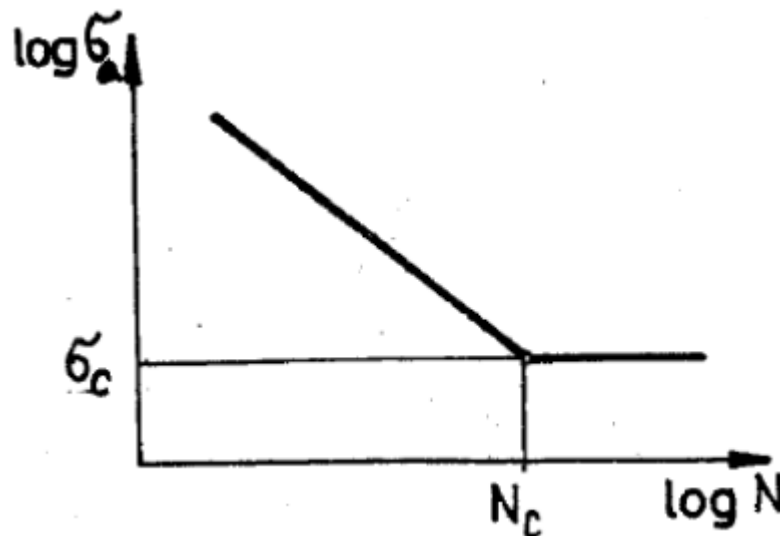
Únava materiálu je postupné hromadění poškození vlivem mechanického, tepelného nebo mechanicko-tepelného namáhání kmitavého charakteru, které vede ke změnám vlastností, ke vzniku a růstu trhlin a k porušení materiálu. [7]

3.4.1 Mez únavy

Kritérium odolnosti materiálu proti opakovanému mechanickému namáhání je mez únavy σ_c . Je vyjádřena amplitudou napětí nebo amplitudou deformace, které materiál vydrží teoreticky při nekonečném počtu kmitů. V praxi je to napětí, při kterém zkušební tyč vydrží

základní počet kmitů N_c pro stanovení únavy. Pro ocel, litinu, měď a nerez slitiny $N_c = 10^7$, pro lehké kovy a jejich slitiny $N_c = 10^8$.

Při určování meze únavy se zjišťují počty kmitů, které při různém napětí postupně klesajícím vedou při kmitavém zatěžování k lomu. Zjištěné hodnoty počtu kmitů N u každé zkušební tyče se vynesou v diagramu napětí – počet kmitů do lomu. Tento diagram je známý pod názvem Wöhlerův diagram (Obr. č.16). Kreslí se v lineární nebo logaritmické stupnici. [7]



Obr. č.16 Wöhlerův diagram – logaritmická stupnice [7]

Průběh kmitu může být pravidelný např. sinusový nebo nepravidelný. Nepravidelný kmit se buď opakuje nebo působí náhodně, stochasticky. V praxi je nejčastější náhodné působení, u kterého se zjišťuje kumulativní spektrum zatížení. Podle typu nesouměrnosti kmitu má namáhání charakter střídavý, pulsující nebo míjivý. Podle sil a momentů působících na součást jde o namáhání v tahu, tlaku, tahu-tlaku, ohybu nebo jejich kombinací.

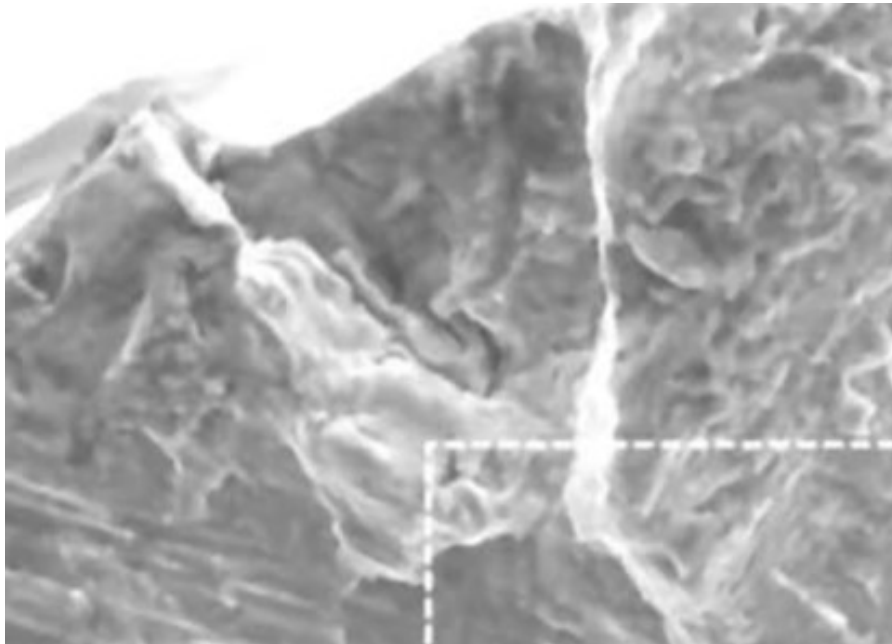
3.4.2 Rozdělení únavy a únavový lom

Podle počtu kmitů je možno kmitavé zatěžování, resp. únavu rozdělit do následujících skupin.

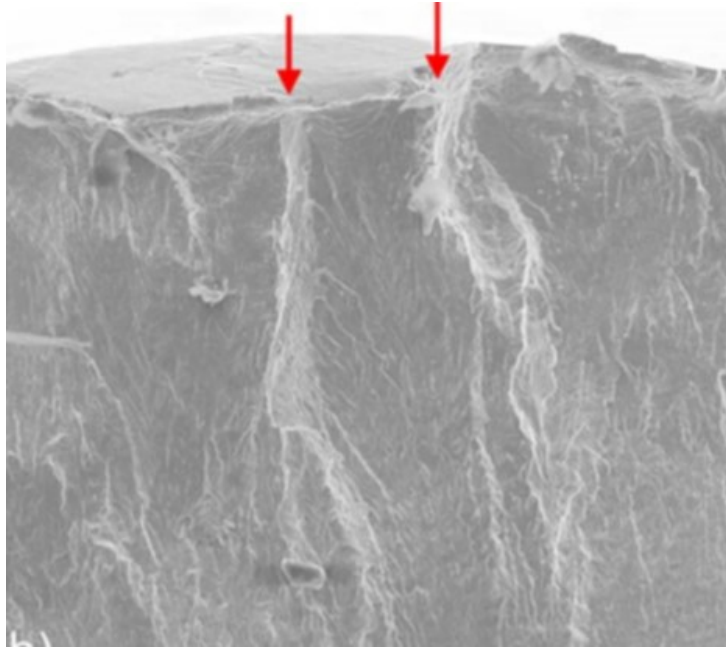
1. Opakované statické přetěžování – životnost do 10^2 kmitů.
2. Nízkokmitová únava – životnost do 10^5 kmitů. Vzniká při opakovaném namáhání nad mezi kluzu v podmínkách, kdy dochází k výrazným opakovaným plastickým deformacím v makroobjemu materiálu. O životnosti součástí rozhoduje rychlost šíření únavové trhliny

3. Vysokokmitová únava – životnost nad 10^5 kmitů. Vzniká v podmínkách převážně elastických opakovaných deformací, napětí je vždy pod mezí kluzu. Pro životnost součásti je důležité, aby byl dlouhý časový úsek, potřebný ke vzniku zárodku únavové trhliny. V okamžiku, kdy trhlina dosáhne kritické velikosti, dojde k náhlému únavovému lomu. [7]

Při zkoumání únavového lomu difraktometrií můžeme vidět, že při různých zatíženích, vzniká únavový lom v jiném počtu kmitů. Samotný průběh můžeme specifikovat jako iniciace lomu, průběh lomu a dolomení. Z přiložené studie vzorků 316L nerezové oceli, víme, že při zatížení 320 MPa došlo k lomu při $1,53 \cdot 10^5$ kmitů naopak při zatížení 250 MPa došlo k lomu až při $4,3 \cdot 10^7$ kmitů. Oba případy jsou vidět na přiložených obrázcích č.17 a č.18. [20]



Obr. č.17 Únavový lom $4,3 \cdot 10^7$ kmitů [20]



Obr. č.18 Únavový lom $1,53 \cdot 10^5$ kmitů [20]

Z těchto poznatků je možná vyobrazit Wohlerovu křivku, která je blíže probírána v kapitole 3.5.

Na únavovém lomu lze rozeznat tři odlišná pásma:

1. Pásma počátku únavového lomu – ohnisko porušení. Je obvykle na obvodu součásti. Povrch pásma je matný. Toto pásmo nemusí být vždy dobře rozeznatelné.
2. Pásma dynamického lomu – je zde patrný růst únavové trhliny s jemnými, mnohdy dobře zjištěnými růstovými čarami. Povrch pásma je lesklý, omačkaný, oxidovaný. Lom je jemný, lasturový.
3. Pásma konečného rozrušení – lom je zde hrubě krystalický, stříbrně lesklý a probíhá transkrystalicky. [7]

3.4.3 Vlivy na mez únavy

Mez únavy není konstantou materiálu, je ovlivňována mnoha faktory. Mezi základní vlivy patří:

1. Mez pevnosti v tahu – přísadové prvky ovlivňují mez únavy nepřímo tím, že ovlivňují prokalitelnost a mez pevnosti
2. Teplné zpracování – mikrostruktura složená z feritu a vysoce popuštěného martenzitu má příznivý vliv na únavovou pevnost

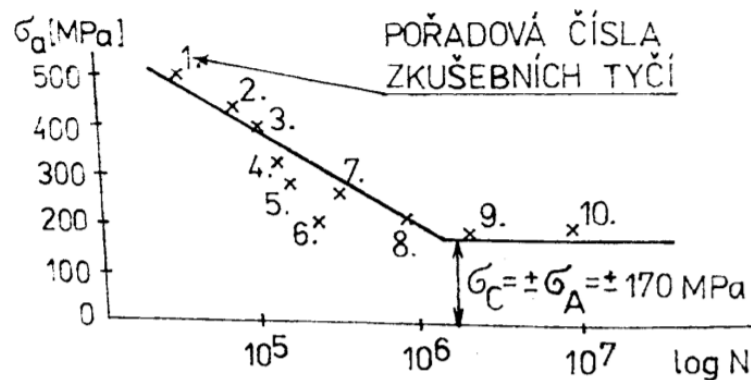
3. Jakost povrchu, vlastnosti materiálu při povrchu a pnutí – vznikající při opracování povrchu. Čím je opracování jemnější, tím je vyšší mez únavy. Ostré vruby výrazně snižují mez únavy.
4. Předpětí, vnitřní pnutí – tahová pnutí vedou ke snížení únavové pevnosti, tlaková k jejímu zvýšení. [7]
5. Povrchové zpevňování mechanickým způsobem – je to jedna z neúčinnějších metod, jak zvýšit únavovou pevnost. Kuličkováním lze zvýšit mez únavy o 30-50 %, válečkováním lisovaných spojů o 100 %.
6. Teplota – experimentálně bylo dokázáno, že mez únavy s rostoucí teplotou klesá, při poklesu teploty pod 0 °C naopak roste.
7. Frekvence – zvyšováním frekvence kmitů se mez únavy poněkud zvyšuje.
8. Velikost zkušební tyče – experimentálně bylo zjištěno, že s zvětšujícím se průřezem tyče klesá mez únavy.
9. Korozní prostředí a povrchová koroze – Oby tyto faktory mají výrazný vliv na mez únavy.

3.5 Zkoušky únavy

Pro zkoušky kovů platí ČSN 420363. Zkušební tyče jsou buď ploché, nebo s kruhovým průřezem. Na únavu se také zkoušejí i modely, konstrukční prvky a konstrukční celky. Podle druhu namáhání se při zkouškách únavy zkušební tyče namáhají v tahu, tlaku, tahu-tlaku, v plochém ohybu, v ohybu za rotace, v krutu nebo jejich kombinací.

3.5.1 Zkoušky vysokokmitové únavy

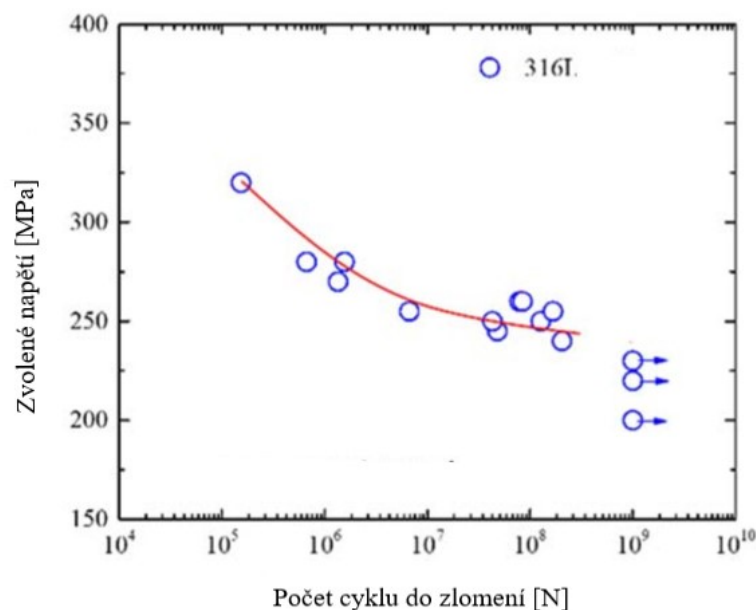
Při zkouškách vysokokmitové únavy se používá frekvence 10–200 Hz (600–12000 kmitů/min). Téměř vždy se řídí amplituda napětí. Výsledkem zkoušek vysokokmitové únavy je únavová křivka a hodnota meze únavy. Pro stanovení šikmé větve únavové křivky se používá nejméně osm zkušebních tyčí, pro celou křivku a k určení meze únavy se běžně používá nejméně deset zkušebních tyčí. Příklad výsledku zkoušek vysokokmitové únavy je na Obr. č.19. [7]



Obr. č.19 Výsledek zkoušky vysokokmitové únavy [7]

Při měření vzorků-stabilizátorů v této studii dochází k upnutí ve fiktivní nápravě a poté spuštění vysokokmitového testu. V tomto testu dochází k namáhání jak ohybu tak krutu, nebo jeho kombinací. Při této zkoušce závisí především na průměru a tloušťce stěny profilu, protože se mění objemový podíl. Tímto dochází ke zvyšování pevnosti v tahu a smyku. Také se mění tažnost vzorků. Velký podíl na tom má také tepelné zpracování a vznik baenitu, který vysoce ovlivňuje poměr pevnosti v tahu a smyku. [17]

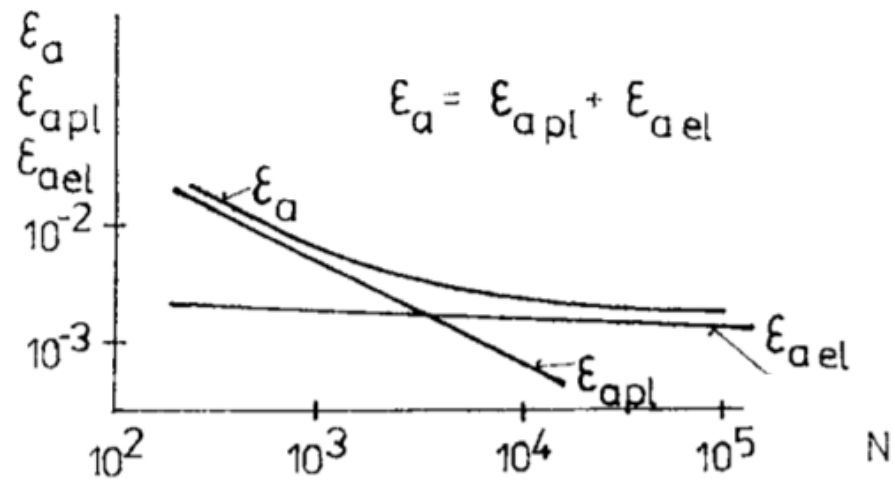
V doložených výzkumech, které byly prováděny na zařízení pro zkoušení mechanické únavy o frekvenci 20 kHz. Tento test byl prováděn na nerezové oceli s označením L316, kde tento test byl zastaven o 10^9 cyklech. Teplo, které vzniká v souvislosti s namáháním je odváděno proudícím vzduchem. Na Obr. č. 20 můžeme vidět diagram vysokokmitové zkoušky této studie, ze které je vycházeno při studii v diplomové práci. [20]



Obr. č.20 Diagram vysokokmitové zkoušky pro daný případ z výzkumu [20]

3.5.2 Zkoušky nízkokmitové únavy

Při zkouškách nízkokmitové únavy se používá frekvence do 3 Hz. Obvykle se řídí amplituda deformace, a to celková nebo její elastická složka. Výsledky se vyhodnocují pro životnost $10^2 - 10^5$ kmitů. Vyhodnocuje se hysterezní smyčka a stanovuje se závislost mezi hodnotami amplitud poměrné celkové, plastické, případně elastické deformace a počtem kmitů do ukončení zkoušky. [7]



Obr. č.21 Výsledek nízkokmitové únavy [7]

3.6 Zbytkové napětí

Zbytková napětí jsou mechanická napětí existující v tělese jako v uzavřeném systému bez působení vnějších sil nebo momentů. Napětí vyvolaná nemechanickými účinky, např. teplotními gradienty, považujeme ve smyslu této definice za tzv. vložena, i když jsou důsledkem stacionárních, po dlouho dobu se neměnicích podmínek. Vnitřní síly a momenty spojené se zbytkovým napětím jsou v rovnováze. Pevné látky bez zbytkových napětí principiálně neexistují. Zbytková napětí jsou vždy důsledkem nehomogenních elastických nebo elasticko-plastických deformací. V materiálech užívaných technickou praxí vzniká technologií výroby i dalším zpracováním celá řada různých stavů zbytkové napjatosti.

V současné době se pro třídění zbytkových napětí působících v polykrystalických materiálech užívá obvykle jako klasifikační kritérium velikosti objemů, v nichž se napětí nemění ve své velikosti ani směru – jsou homogenní. [10]

3.6.1 Druhy zbytkových napětí

Zbytková napětí I. druhu

Jsou přibližně homogenní ve velké oblasti materiálu. Při zásahu do silové a momentové rovnováhy tělesa, v němž existuje zbytková napjatost I. Druhu, dochází vždy ke změnám jeho makroskopických rozměrů.

Zbytková napětí II. druhu

Jsou přibližně homogenní v oblastech srovnatelných s velikostí jednotlivých krystalků. Silová a momentová rovnováha se předpokládá již u objemů tvořených větším počtem krystalků. Porušení rovnováhy nemusí vést ke změnám tvaru uvažovaného tělesa.

Zbytková napětí III. Druhu

Jsou nehomogenní i v oblastech srovnatelných s meziatomovými vzdálenostmi. Silové a momentové rovnováhy může být dosaženo i v dostatečně velkých částech jednoho krystalku. Zásahem do rovnováhy k žádným tvarovým změnám tělesa nedojde. Zbytkové napětí v určitém bodě je vždy superpozicí všech tří druhů. [10]

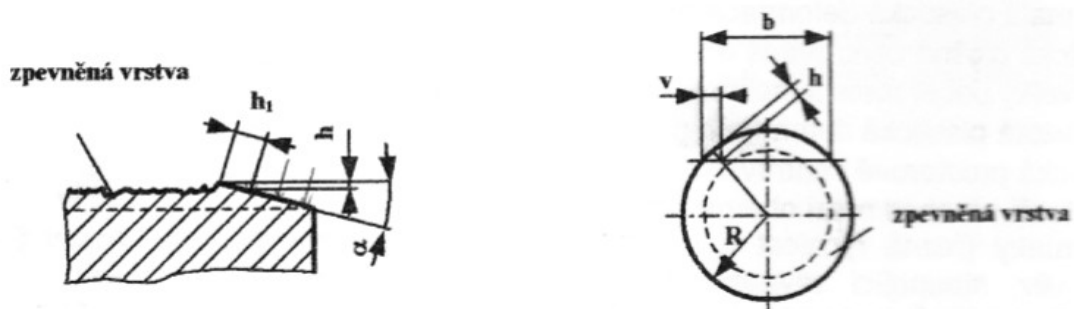
3.6.2 Způsoby měření zbytkového napětí

Měření zbytkových napětí se provádí na povrchu materiálu nebo v celém jeho průřezu. Samotné měření se provádí různými způsoby, které můžeme rozdělit do tří skupin. Jedná se o destruktivní, polodestruktivní a nedestruktivní měření.

a) Destruktivní

V této skupině metod měření zbytkového napětí můžeme zařadit například měření mikrotvrdosti. K hloubce a reálným hodnotám stupně zpevnění lze dojít měřeními mikrotvrdosti v ovlivněné zóně povrchu.

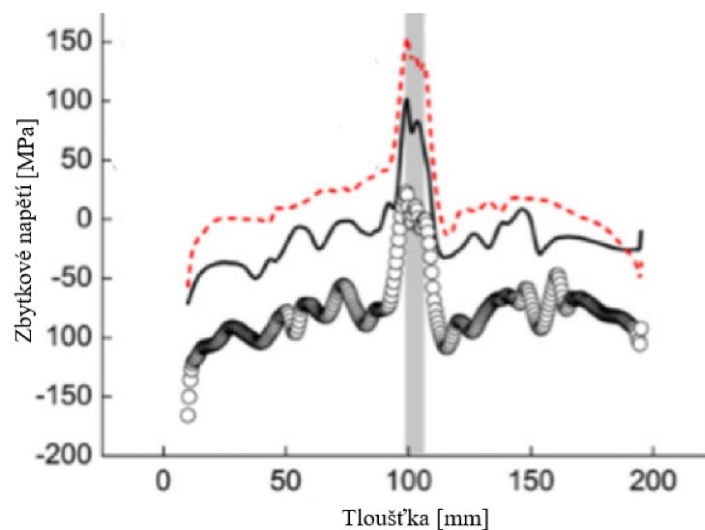
Pro zjištění zbytkového napětí můžeme zvolit tři metody. Postupné odleptávání povrchových vrstev ovlivněné části materiálu, metodu kolmých řezů a metodu šikmých řezů, kterou můžeme vidět na Obr. č.22. [11]



Obr. č.22 Výbrus vzorku pro hodnocení zpevněné vrstvy–metoda šikmých řezů [11]

Při posuzování vzorků je zbytkové napětí rozhodujícím faktorem při posuzování integrity konstrukčních součástí a svařovaných sestav. Při zavedení konturové metody zahrnující řezání vzorků pomocí elektrického výbojového stroje, při kterém je použit souřadnicový měřicí stroj, dochází z podrobnému a spolehlivému analyzování dat. [18]

V tomto případě dochází ke zmapování podélných zbytkových napětí a také zbytkových napětí v mezních tloušťkách. Tuto metodu lze použít pro materiál vhodný do 4mm tloušťky. [18]



Obr. č.23 Naměřené zbytkové napětí pomocí metody kontury [18]

b) Polodestruktivní [MPa]

Do metod označované jako polodestruktivní lze zařadit metodu vyvrtávací. Vyvrtávací metoda pro zjišťování zbytkových napětí patří mezi semidestruktivní, mechanické metody. Při vrtání dochází k narušení celistvosti povrchu a zároveň se uvolní zbytkové deformace. Tyto

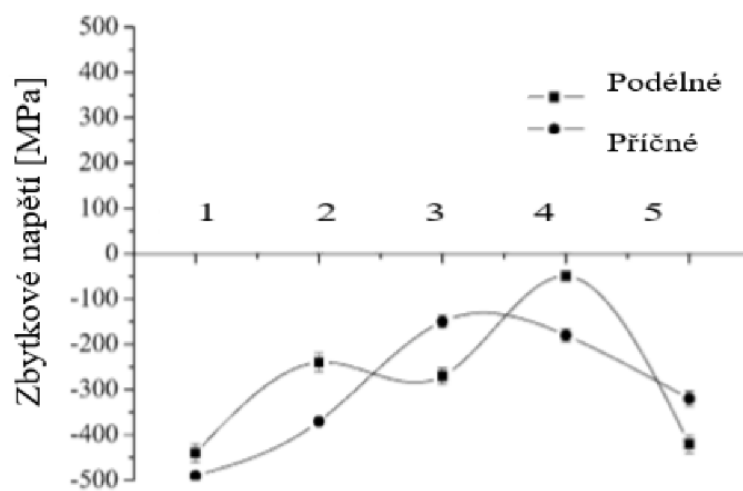
deformace se měří tenzometrickou ruzicí, která je nainstalována na povrchu konstrukce. Růžice se skládá ze tří odporových tenzometrů, které měří uvolněné deformace po dobu vrtání malé díry. Samotné vrtání probíhá po krocích. Naměřené deformace se poté vyhodnocují pomocí teorií, na jejichž základě se určuje rozložení zbytkových napětí. [12]

c) Nedestruktivní

Metody, kde nedochází k poškození samotného vzorku jak na povrchu, tak ani v jeho průřezu. Zde můžeme uvést zkoušky rentgenovým zářením, zářením gama, kapilární metody apod. [12]

V případě vnášení zbytkového napětí jak na povrch vnější nebo vnitřní je využíváno vrhání broků na daný materiál – proces tryskání. Pomocí této operace zaručíme, že testované vzorky budou mít lepší odolnost proti opotřebení a proti ořezu. Intenzitu tryskání, která závisí na vzdálenosti tryskaného předmětu, tlaku vzduchu, který vrhá broky apod. určujeme pomocí tzv. Almen testů. [22]

Toto napětí snadno změříme pomocí rentgenové difrakční techniky s vlnovou délkou $\sin 2\alpha$. Pomocí elektronických zařízení jako je elektronický analyzátor napětí a příslušný software, jsme schopni snadno naměřit zbytkové napětí ve místech vzorku, kde potřebujeme.



Obr. č.24 Diagram měření zbytkového napětí pomocí rentgenové difraktometrie v oblasti svarového spoje [22]

1-neovlivněný materiál 2-ovlivněný materiál ohřevem od svařování vlevo 3-svar 4-ovlivněný materiál ohřevem v pravo 5-neovlivněný materiál

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je zjistit vliv nauhličení pomocí atmosféry při tepelném zpracování na výsledné mechanické vlastnosti a zároveň zaručit funkčnost stabilizátoru.

- **Navrhnout procesní podmínky tepelného zpracování a vyrobit vzorky**

Nastavení procesních podmínek pro tepelné zpracování oceli 34MnB5, kde teploty a časy tepelného zpracování byly zachovány dle standardů. Změna byla zavedena u koeficientu uhlíkové atmosféry a to z běžných 0,35%C na 0,5%C a 0,8%C.

Vyrobit vzorky s těmito procesními podmínkami.

- **Zjistit počet cyklů do porušení jednotlivých druhů vzorků**

Realizovat zkoušku únavy a vyhodnotit místo, kde zkušební vzorky praskají a zdali vydrží předpokládaný počet cyklů do porušení.

- **Naměřit do jaké hloubky má uhlíková atmosféra vliv na výslednou tvrdost**

Provést zkoušku tvrdosti v závislosti na hloubce dle Vickerse a vyhodnotit vliv povrchového nauhličení na výslednou tvrdost.

Měřit nauhličenou vrstvu pomocí světelného mikroskopu.

- **Provést měření zbytkového napětí**

Zkoumat zbytkové napětí v kritickém bodě zkušební vzorku a vyhodnotit vliv nauhličení na zbytkové napětí.

- **Zhodnotit vliv povrchového nauhličení na výsledné vlastnosti**

Závěrem budou všechny zkoušky vyhodnoceny a okomentovány, jaký vliv má povrchové nauhličení na danou zkoušku.

5 POPIS A RŮZNÉ DRUHY VZORKŮ-STABILIZÁTORŮ

Stabilizátor je prvek, který slouží k propojení levé a pravé části nezávisle odpružené nápravy. Hlavním úkolem stabilizátoru je zmenšit klopení karoserie při průjezdu zatáčkou. Klopení karoserie vozu v zatáčce má nepříznivý vliv na kinematiku zavěšení a postavení kola vůči vozovce. Postavení kola vůči vozovce ovlivňuje přenesené síly na vozovku a tím i bezpečnost jízdy. Kromě zmenšení klopení v zatáčkách má stabilizátor ještě další funkce. Ovlivňuje i přetáčivost a nedotáčivost vozidla v zatáčce. Pomocí stabilizátoru dochází ke změně zatížení kol na nápravě. Tato změna ovlivňuje síly přenositelné pneumatikou na vozovku. Vhodnou volbou tuhosti stabilizátoru je možno regulovat dotáčivost a nedotáčivost stabilizátoru. [1]

5.1 Popis mechanismu

Funkcí stabilizátoru je zmenšovat klopení karoserie během průjezdu zatáčkou. Zmenšení klopení je dosaženo zvětšením klopné tuhosti nápravy. Stabilizátor je koncipován tak, aby docházelo ke zvětšení tuhosti odpružení jen při jízdě zatáčkou.

Při přejezdu nerovnosti ležící napříč vozovkou dochází ke stejnosměrnému pohybu kol. V tomto případě se stabilizátor otáčí ve svém uložení a nijak nezasahuje do pohybu kol.

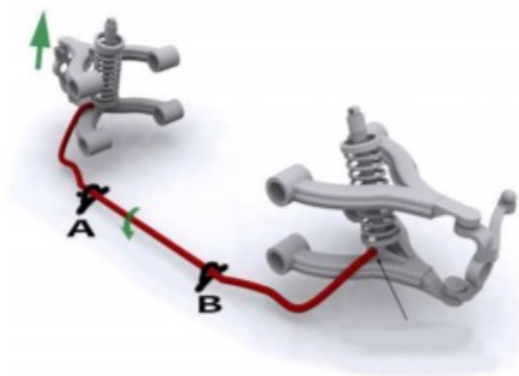
Při jízdě zatáčkou vzniká v těžišti vozu, které leží nad vozovkou, odstředivá síla. Tato síla je zachycována pneumatikami, které přenáší tuto sílu na vozovku. Síla zachycující pohyb vozidla na vozovce a síla odstředivá, která působí v těžišti, neleží ve stejné výšce a vzniká tak moment, který klopí karoserii během průjezdu zatáčkou. Během klopení dochází nestejnomybnému pohybu kol. Na tento nestejnomybný pohyb kol reaguje stabilizátor, který je částečně deformován a částečně přenáší sílu na kolo na vnitřní straně zatáčky. [2]

5.2 Druhy konstrukčních řešení

Jak již bylo uvedeno v předešlé kapitole, stabilizátor ovlivňuje nepříznivý jev klopení karoserie a ovlivňuje stykové síly pneumatiky s vozovkou. Toto je hlavní důvod, proč je stabilizátor používán u většiny osobních, užitkových a závodních vozů. V této kapitole budou rozebrány různé konstrukční řešení stabilizátorů, přičemž bude zkoumán především stabilizátor s táhly, který bude použit jako vzorek pro provedení mechanických zkoušek pro diplomovou práci. [3]

5.2.1 U stabilizátor

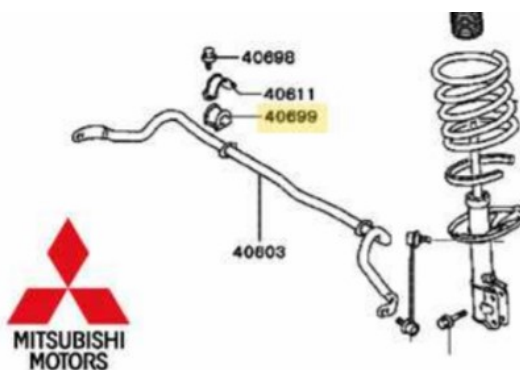
Stabilizátor tvaru U (Obr. č.25) je nejpoužívanější konstrukce stabilizátorů u osobních automobilů. Hlavní výhodou je konstrukční jednoduchost a nízké výrobní náklady. Stabilizátor na Obr. č.25 představuje červená tyč, která může mít plný nebo kruhový průřez. Při stejnosměrném pohybu kol se tyč otáčí v uložení A a B. Při nestejnoseměrném pohybu je tyč na obou krajích zatěžována opačně orientovanými silami. Tyto síly vyvolávají namáhání ohybem (krajní ramena) a krutem (střední část). Tuhost stabilizátoru závisí na velikosti deformaci tyče. Deformace je závislá na geometrických parametrech tyče, zvláště na délce ramen, délce střední části, materiálu a průměru tyče. [3]



Obr. č.25 Stabilizátor tvaru U [3]

5.2.2 Stabilizátor s táhlem

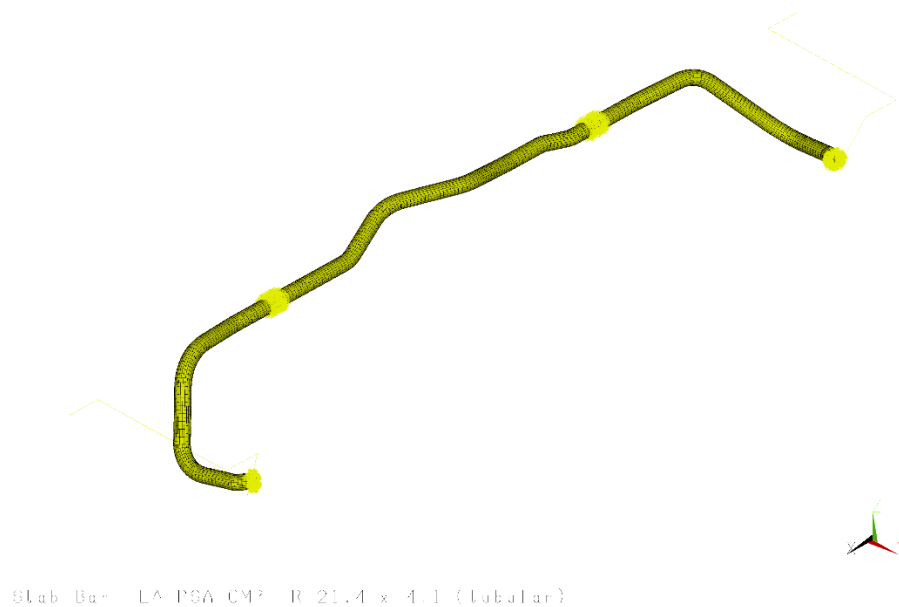
Druhou aktivní variantou zapojení stabilizátoru je systém na Obr. č.26. Stabilizátor není pevně zasazen do ramene nápravy, ale spojen pomocí táhla. Výhodou tohoto řešení je menší namáhání tyče ve spojení s mechanismem. Nevýhodou tohoto řešení je častý vznik vůlí v kloubovém uložení. [3]



Obr. č.26 U stabilizátor s táhlem [4]

6 POPIS TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU PRO VÝROBU VZORKŮ-STABILIZÁTORŮ

V následující kapitole budou rozebrány jednotlivé kroky, které jsou nezbytné pro výrobu automobilového stabilizátoru (Obr. č.27) v dané firmě. Na těchto stabilizátorech budou následně provedeny mechanické zkoušky, z nichž budou zpracovány výsledky.



Obr. č.27 Tvar stabilizátoru-vzorku

6.1 Proces ohýbání

První operací, která byla aplikovaná na surovou trubku z materiálu 34MnB5 – rozměry 21,4x4,1 mm-bylo ohýbání za studena. Ohýbání bylo provedeno na zařízení Wafios RST 28 (Obr. č.28), kde za pomoci nástroje – čelistí dochází k tvarování trubky do potřebného tvaru, který se kontroluje v šabloně, která se liší tvarem i rozměry podle toho, o jaký projekt se jedná.

Princip ohýbání spočívá v tom, že materiál je upnut v upínací matici a za pomoci rotačního pohybu je materiál otáčen a následně čelistmi upnut a ohnut do tvaru samotného nástroje.



Obr. č.28 Ohýbací zařízení Wafios RST 28

6.2 Proces zušlechťování

Typ materiálu 34MnB5 přichází od dodavatele v nezušlechťeném stavu. Následujícím krokem je kalení v kalicích pecích, které nám zaručí zvýšení povrchové tvrdosti. Samotné vzorky jsou uloženy v karbonovém Geštelu (Obr. č.29), který zaručí rovnoměrnost prohřevu a především míru nauhličení, které je u tohoto projektu $C_p = 0,5\%$ a $0,8\%$. Proces spočívá v ohřevu na kalící teplotu, výdrž a poté zchlazení v kalící lázni. Parametry kalení se liší dle druhu zakázky.

Důležitou součástí je také odstranit vzniklé zbytkové napětí při ohýbání a následném kalení v materiálu pomocí procesu popouštění. Popouštění také probíhá po stanovený technologický čas. Chlazení vzorků při popouštění probíhá na vzduchu. Následuje důkladný oplach v myčkách a vyjmutí z linky. Výsledné hodnoty mechanických vlastností surového materiálu bez změny výše uhlíčení C_p můžeme vyčíst z Tab. č.5.

Tab. č.5 Hodnoty mechanických vlastností materiálu 34MnB5 po zušlechtění

	[MPa]
Mez kluzu Re0,2	1400 ± 100
Mez pevnosti v tahu Rm	1485 - 1775
	[HV10]
Tvrdość HV10	460-540

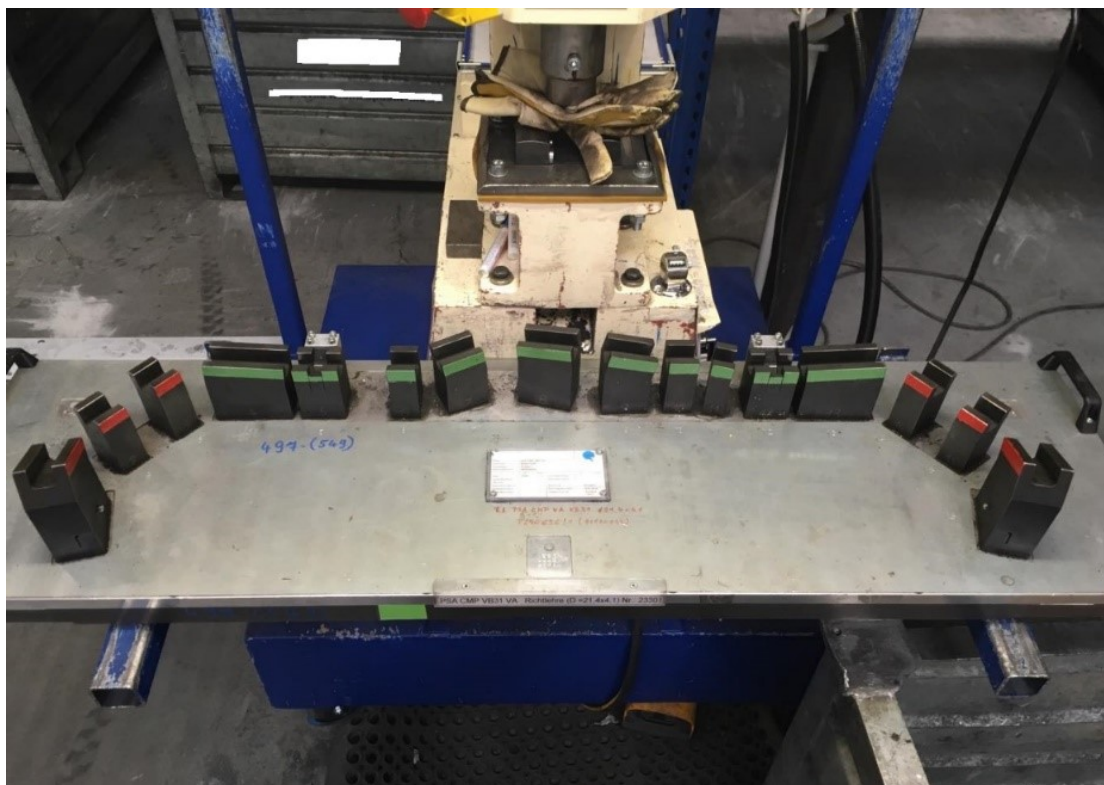
Dle uvedených hodnot v tabulce můžeme následně porovnat změny tvrdosti na povrchu v závislosti na množství nauhličení Cp. Můžeme předpokládat, že hodnoty tvrdosti se zvýší, protože vlivem většího množství nauhličení vzniká nauhličená vrstva, která ovlivňuje naměřenou tvrdost.



Obr. č.29 Geštel-uložení vzorků při tepelném zpracování

6.3 Proces rovnání

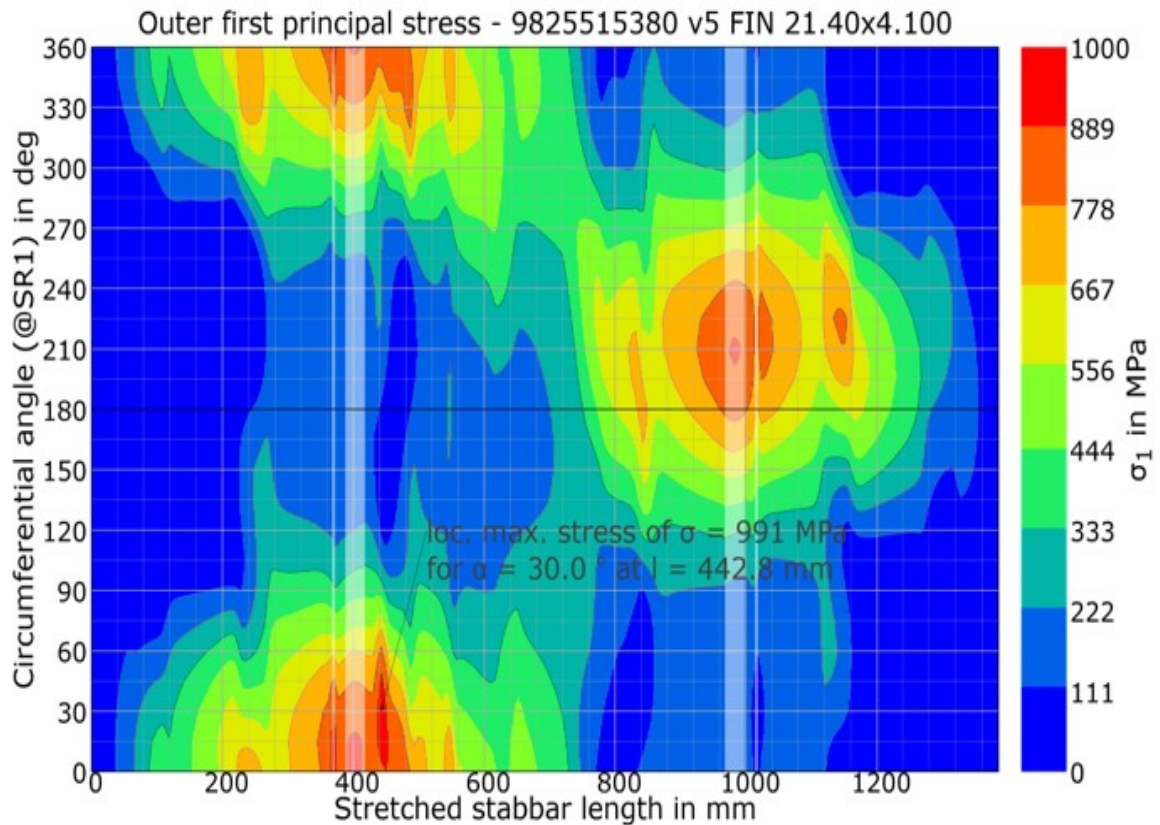
Při tepelném zpracování dochází ke kroucení, roztahování nebo stahování stabilizátoru. Pro korekci tvarových změn slouží proces rovnání, kde za pomoci hydraulického listu operátor tzv. rovná stabilizátor, aby odpovídal požadovanému tvaru. Ke kontrole samotného tvaru slouží šablony (Obr. č.30), dle kterých můžeme snadno kontrolovat jak tvar, tak zkroucení.



Obr. č.30 Šablona pro rovnání

6.4 Proces vnitřního tryskání

Touto operací dochází k mechanické úpravě vnitřního povrchu. Důvodem, proč je tato operace použita, je zbavení se nečistot na vnitřním povrchu, odstranění rzi a především zpevnění povrchové vrstvy a vytvoření vnitřního pnutí, které nám zaručuje lepší odolnost proti opotřebení. Jelikož je tato operace časově náročná, tudíž i drahá, je tryskána jen určitá část, která je při zatížení nejvíce namáhána. Tato oblast byla zjištěna pomocí heat mapy (Obr. č.31), vygenerovanou ze simulační aplikace.



Obr. č.31 Heat mapa

Principem této operace je metání broků na vnitřní povrch za pomoci stlačeného vzduchu. Samotné broky jsou dopravovány na vnitřní stranu stabilizátoru pomocí plastových hadic zabezpečeny perem (Obr. č.32), proti zkroucení. Při procesu tryskání dochází prvně šroubovitým pohybem k zasunutí pér do stabilizátorů k úrovni 540 mm hloubky a poté zase šroubovitým pohybem je pero vytahováno posuvem 120 mm/min do úrovně 160 mm hloubky. Pomocí tryskací hlavy (Obr. č.33) jsou broky směřovány na stěnu stabilizátoru. Celý tento děj se odehrává v tryskací komoře (Obr. č.34)



Obr. č.32 Tryskací hadice

Speciální tryskací hlava pomocí zkosení pod úhlem 45° zaručuje, aby směr a tlak broku byl v požadovaném směru a síle. Pomocí této technologie je možnost tryskat vnitřní povrchy s různými záhyby.



Obr. č.33 Tryskací hlava



Obr. č.34 Tryskací komora

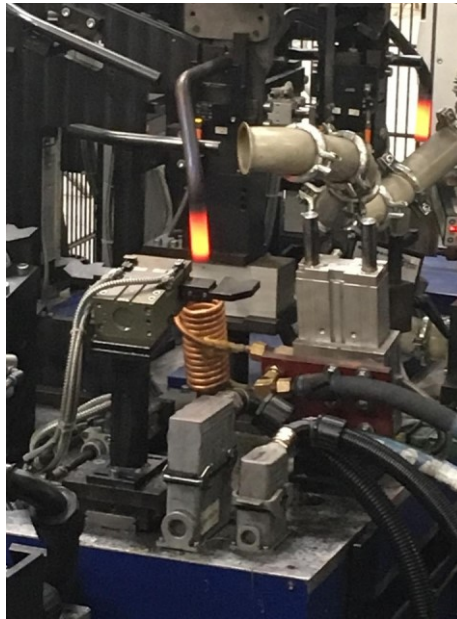
6.5 Proces zalisování konců

Před upevněním samotného stabilizátoru k nápravě musíme provést zalisování konců, které můžeme vidět na Obr. č.35.



Obr. č.35 Zalisované konce

Prvním krokem této operace je nahřátí konců pomocí indukčních cívek (Obr. č.36).



Obr. č.36 Nahřátí konců pomocí indukčních cívek

Následuje operace zalisování, kde pomocí vysokotlakého lisu (Obr. č.37) a zvolené formy dle druhu stabilizátoru dojde k zalisování, proděravění a ořezu do finálního tvaru. Výsledný tvar prochází již finální kontrolou tvaru.



Obr. č.37 Vysokotlaký list

6.6 Proces vnější tryskání

Poslední operací pro tyto vzorky je vnitřní tryskání. U sériových zakázek ještě následuje lakování a navulkanizování úchytových gum a následné nalisování objímek a balení. Jak již bylo uvedeno u vnitřního tryskání, tak i vnější povrch je tryskán z důvodu zlepšení odolnosti proti opotřebení a zároveň připravujeme povrch pro lakování.

Samotné tryskání probíhá v tryskací komoře (Obr. č.38), kde můžeme také vidět uchycené vzorky v tryskacím závěsu. Vrhání broků zaručovala série čtyř metacích kol, které spolehlivě otryskala povrch všech vzorků. V průběhu tryskání se koš otáčí do tří poloh, kde každá poloha tryskání trvala 80 sekund. Po ukončení procesu tryskání vyjíždí závěs s otryskanými kusy.



Obr. č.38 Tryskací komora s neotryskaným závěsem

7 MECHANICKÉ ZKOUŠKY A JEJICH VYHODNOCENÍ

Pro zjištění mechanických vlastností, které musí stabilizátor pro zákazníka splňovat, byly zvoleny zkoušky únavy, tvrdosti, povrchového složení a zbytkového napětí. V následujících kapitolách budou popsány jednotlivé zkoušky a okomentovány výsledky daných zkoušek.

7.1 Zkouška únavy

Samotná zkouška probíhá takovým způsobem, že stabilizátor je upnutý do kmitacího zařízení, které simuluje jízdu osobního auta. Následně dle konečné prvkové analýzy jsme schopni odhadnout životnost stabilizátoru při požadovaném zatížení, které bude následně porovnáno s naměřenými hodnotami a také místo, kde by měl stabilizátor prasknout (Obr. č.39). V tomto případě je potřeba, aby bylo na povrchu stabilizátoru v průběhu zkoušky deformační napětí 1000 MPa, což odpovídá vychýlení konce stabilizátoru o 30,6°.



Obr. č.39 Analýza místa předpokládaného lomu=B5 Max

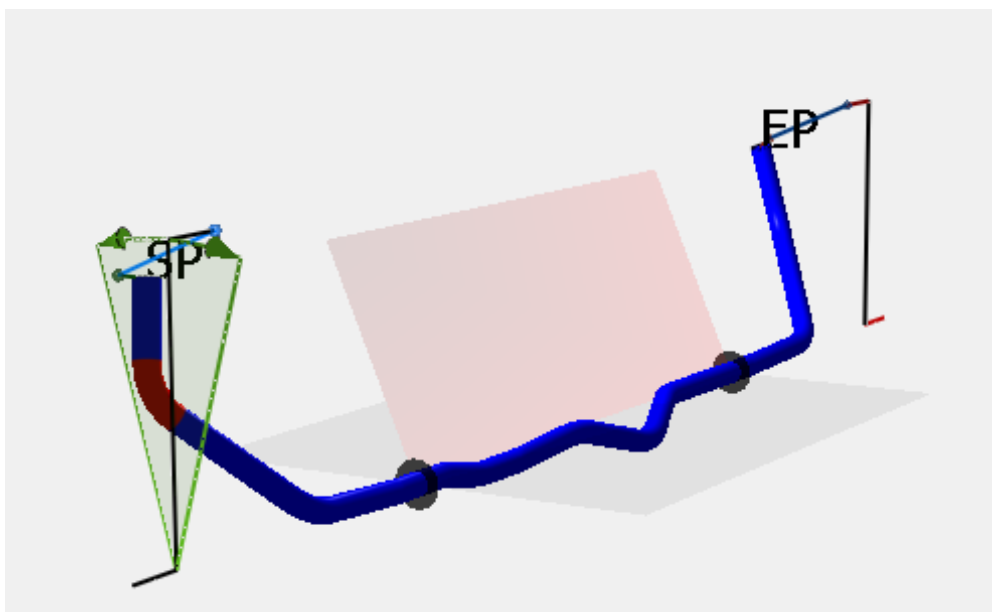
Po nastavení kmitacího zařízení (Obr. č.40) byl zpuštěn test, který nám naznačí, jakou mírou se podílí povrchové nauhličení na výslednou životnost a také ukáže kde je hlavní ohyb u tohoto typu stabilizátoru tzn. místo předpokládaného lomu, které bude následně podrobně testováno.



Obr. č.40 Kmitací zařízení pro měření únavy stabilizátoru

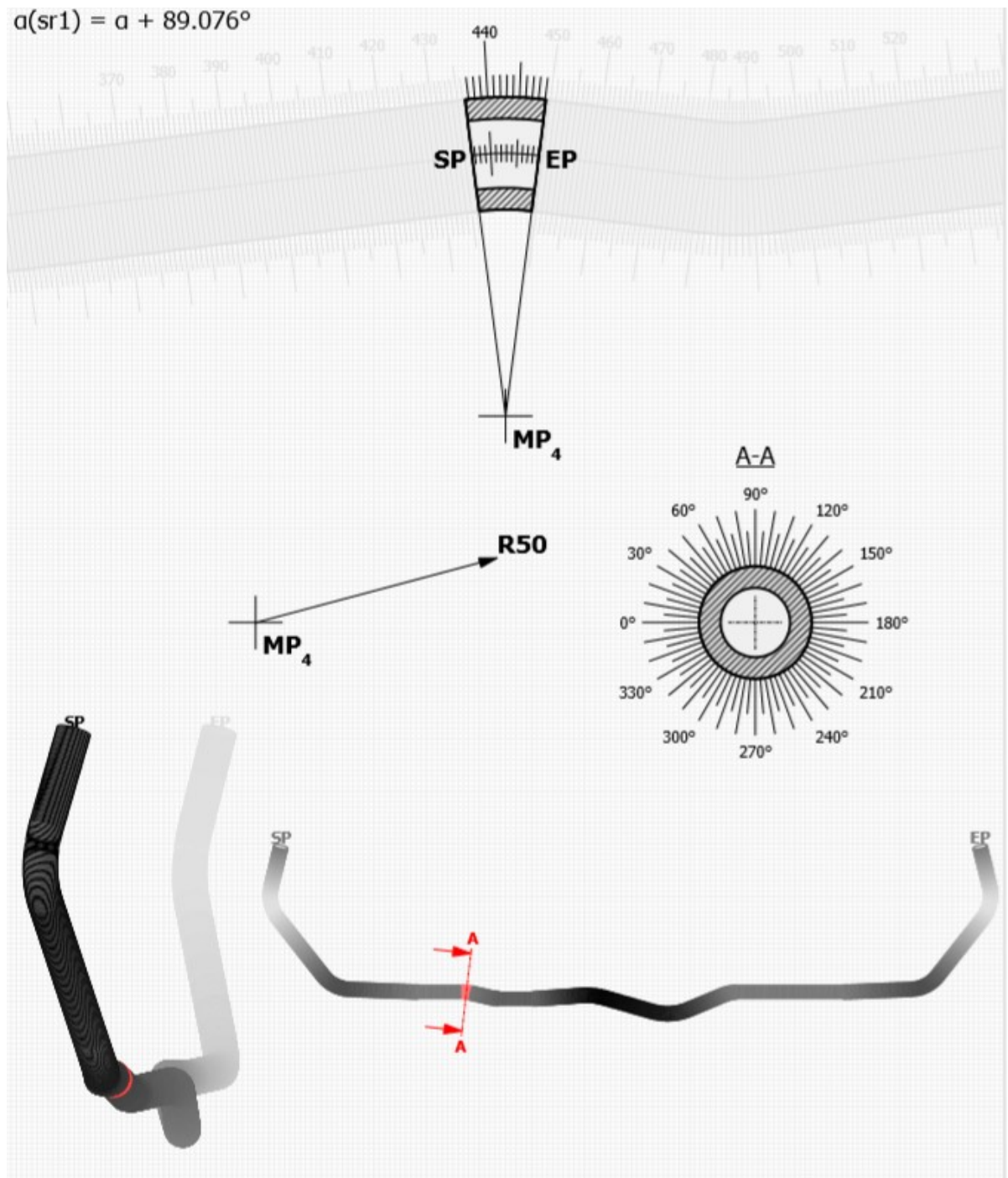
7.1.1 Zkouška únavy 34MnB5 + nauhličení 0,5%C

Při upnutí stabilizátoru do kmitacího zařízení dle výkresové dokumentace, bylo nastaveno vychýlení $30,6^\circ$ s frekvencí 16,6 Hz, aby bylo splněno 1000MPa deformačního napětí na povrchu. Na Obr. č.41 je uložení stabilizátoru, kde je vidět Start point a End point, podle kterých pak bude specifikováno místo lomu.

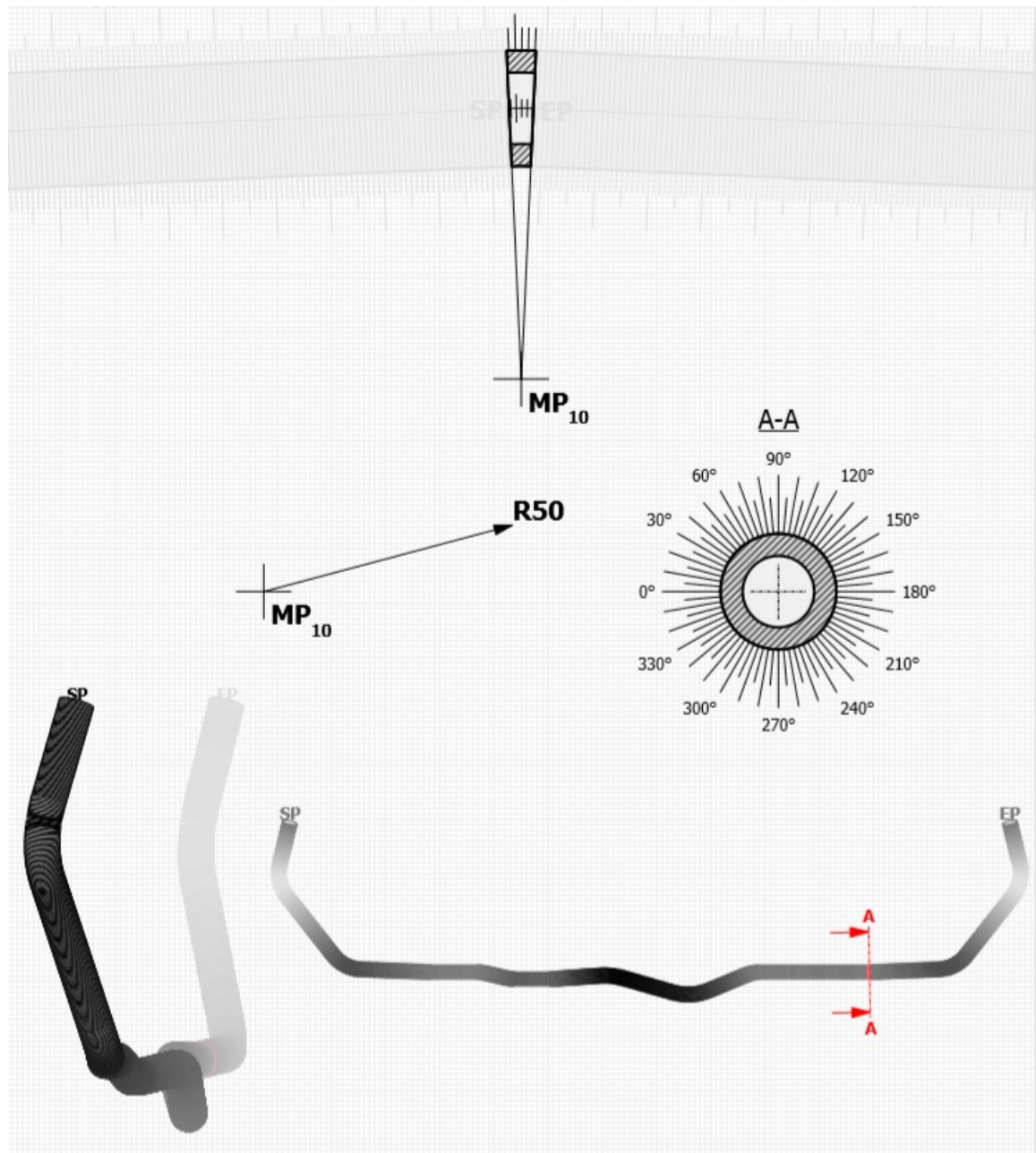


Obr. č.41 Upevnění stabilizátoru v kmitačce dle výkresové dokumentace

Při zkoušce materiálu 34MnB5 + 0,5%C na kmitacích zařízeních bylo zjištěno, že tento materiál praská na vnějším povrchu, což bylo především zaručeno vnitřním tryskáním. Tato skutečnost byla potvrzena i dle konečné prvkové analýzy. Místo iniciace lomu je v příloženém protokolu podrobně popsána pomocí čísla ohybu, úhel iniciace lomu, délka iniciace lomu a pozice sváru. Následně je vyhodnocena a porovnána životnost předpokládaná a naměřená.



Obr. č.42 Protokol pro vyhodnocení místa lomu, ohyb č.4



Obr. č.43 Protokol pro vyhodnocení místa lomu, ohyb č.10

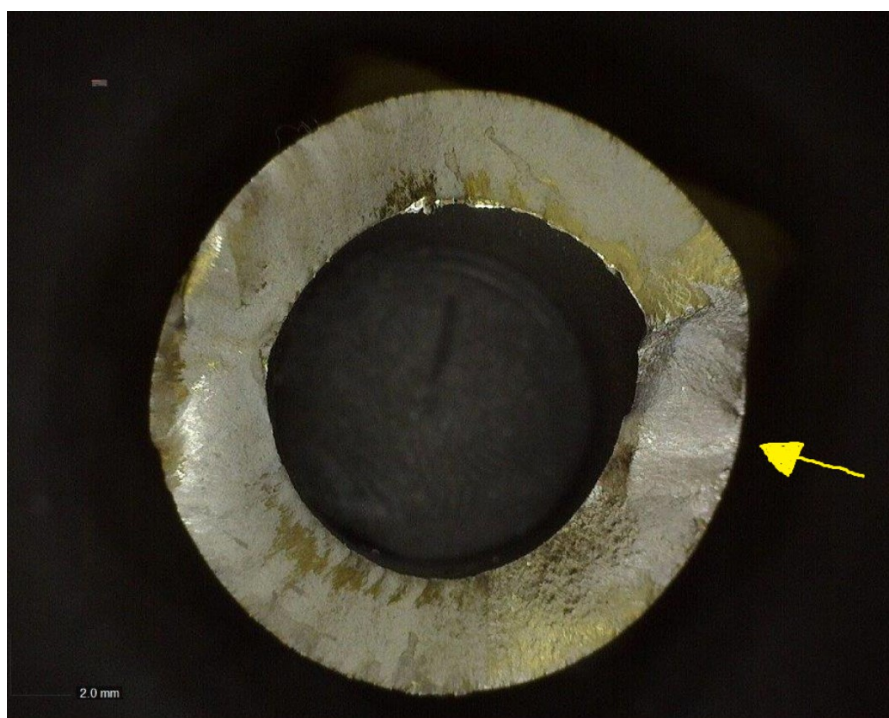
Podle naměřených hodnot z Tab. č.6 je vidět, že materiál 34MnB5 + 0,5%C splňuje předpokládanou životnost a nejčastěji praská v ohybu č.4 ve vzdálenosti 441-446 mm od SP. Tento způsob nauhličení splňuje požadovanou životnost. Místo bude dále zkoumáno v dalších zkouškách

Tab. č.6 Naměřené hodnoty při zkoušce únavy materiálu 34MnB5+0,5%C

34MnB5+0,5%C							
Číslo vzorku	Frekvence kmitu	Předpokládaná životnost	Počet cyklů	Oblast lomu	Úhel lomu [°]	Pozice svaru	Vzdálenost lomu od SP [mm]
1	16,6Hz	51026	65327	ohyb č.4	295	350	441-446
2			74690	ohyb č.4	285	100	441-447
3			68924	ohyb č.4	285	100	441-447
4			67984	ohyb č.4	290	280	441-445
5			61486	ohyb č.4	275	290	441-447
6			67368	ohyb č.4	290	0	441-446
7			68409	ohyb č.4	265	50	441-446
8			64670	ohyb č.10	275	120	1015-1018
9			48838	ohyb č.10	325	80	1015-1018
10			81697	ohyb č.10	35	50	1015-1018

7.1.2 Zkouška únavy materiálu 34MnB5 + 0,8%C

U materiálu 34MnB5 + 0,8%C se životnost výrazně prodloužila oproti předešlému vzorku a značně překročila předpokládanou životnost. Tímto je možno říci, že nauhličená vrstva na povrchu má zásadní vliv na životnost stabilizátorů. Na Obr. č.44 je zobrazeno místo iniciace únavového lomu.



Obr. č.44 Místo iniciace lomu – naznačeno šipkou

V příložené tabulce je uvedena podrobná analýza místa lomu a naměřené hodnoty životnosti na kmitacím zařízení.

Tab. č.7 Naměřená data při zkoušce únavy materialu 34MnB5+0,8%C

34MnB5+0,8%C							
Číslo vzorku	Frekvence kmitu	Předpokládaná životnost	Počet cyklů	Oblast lomu	Úhel lomu [°]	Pozice svaru	Vzdálenost lomu od SP [mm]
1	16,6Hz	51026	198409	ohyb č.4	285	0	400-407
2			155228	ohyb č.5	305	90	489-493
3			98632	ohyb č.4	275	0	442-447
4			136825	ohyb č.9	265	230	910-920
5			154767	ohyb č.4	285	40	442-447
6			114913	ohyb č.4	295	190	442-447
7			106332	ohyb č.4	295	120	442-447
8			100898	ohyb č.4	295	110	442-447
9			105706	ohyb č.10	255	200	1015-1018
10			109310	ohyb č.4	295	240	442-446

Dle naměřených hodnot je možno specifikovat vliv nauhličené vrstvy na celkovou životnost stabilizátorů. Při potenciálu nauhličení 0,8%C je vidět, že místo lomu se mění minimálně, ale životnost narostla oproti předchozím vzorkům téměř dvojnásobně, v jednom případě i trojnásobně. Tento typ nauhličení materiálu splňuje životností předpoklad.

7.2 Zkouška mikrotvrlosti dle Vickerse

Po analýze zkoušky únavy bylo určeno místo, kde budou měřeny následující zkoušky. Celý stabilizátor bylo potřeba zakrátit rozbrušovačkou kolem místa předpokládaného lomu. Následně na okruhové laboratorní pile byly vyříznuty prstýnky pro měření tvrdosti i pro zkoušku složení povrchové vrstvy.



Obr. č.45 Vyříznuté prstýnky pro zkoušku tvrdost a složení povrchové vrstvy

Vzorky byly důkladně očištěny, leptány a zalisovány do speciální hmoty pod sklonem 1° z důvodu toho, že tvrdost bude měřena od povrchu směrem k jádru. Po zalisování došlo k vybroušení vzorků (Obr. č.46).



Obr. č.46 Obroušené zalisované vzorky

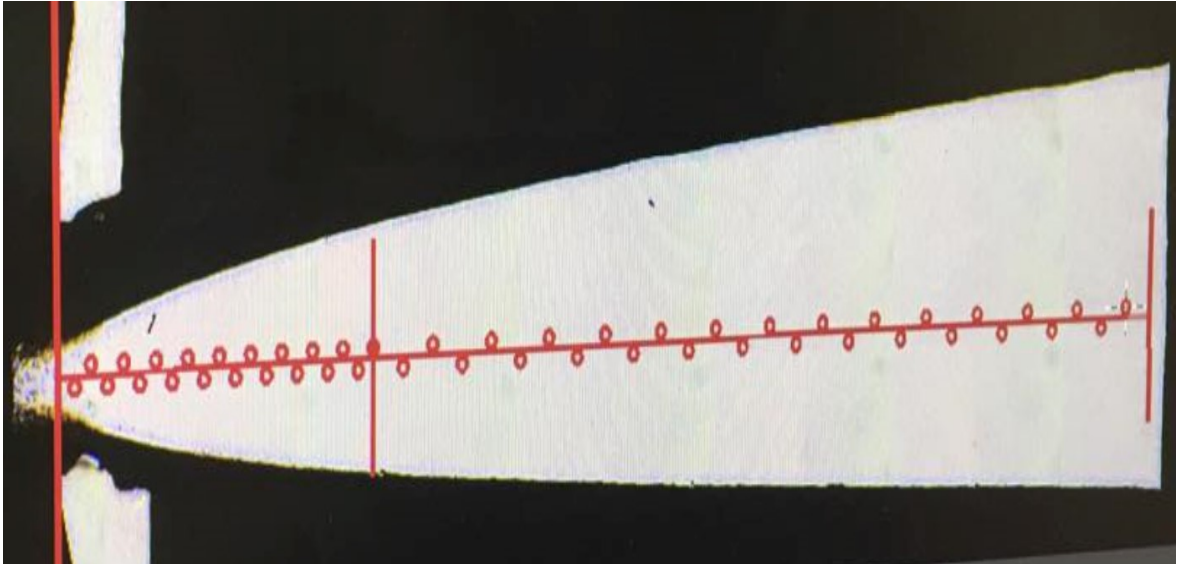
K měření tvrdosti bylo použito zařízení ATM CARAT 950 (Obr. č.47), které je schopno měřit použitým HV1, což znamená zatížení 1kgf po dobu 10 sekund.



Obr. č.47 Tvrdoměr CARAT 950

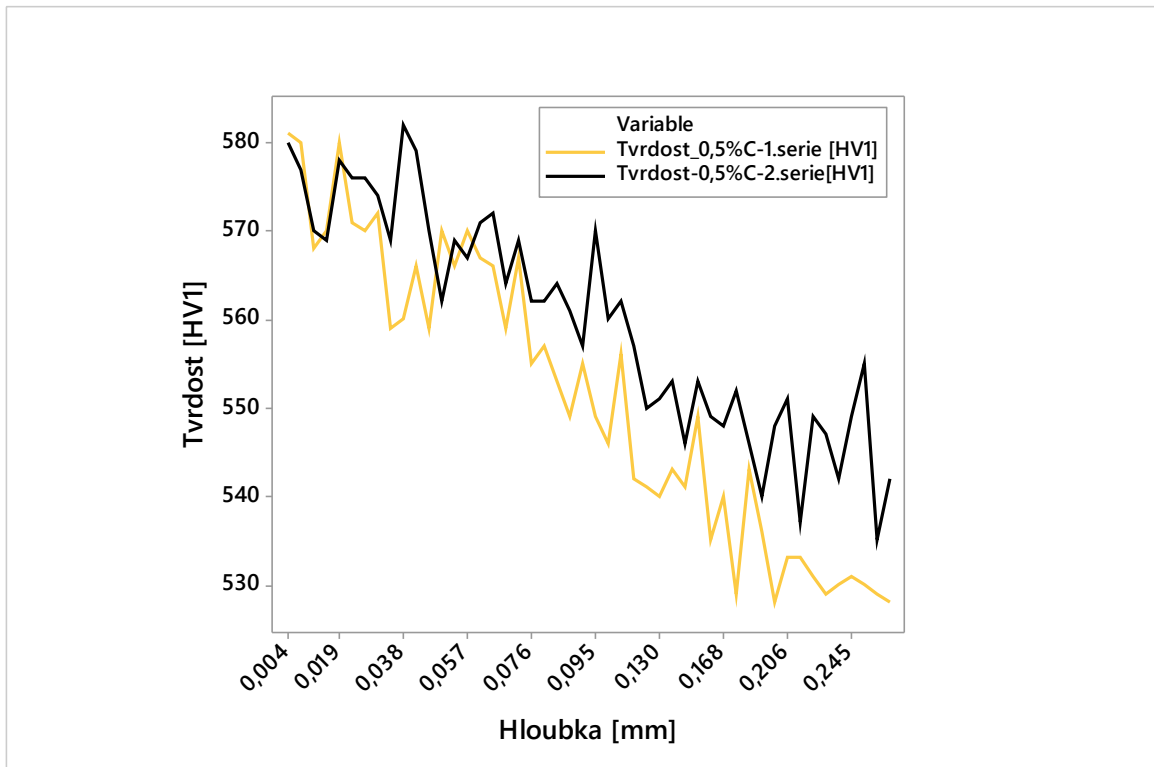
7.2.1 Zkouška mikrotvrdomosti 34MnB5 + nauhličení 0,5%C

Při zkoušce tvrdosti byla zvolena taktika šachovnicového vpichu, kde v oblasti povrchové vrstvy byl zvolen rozptyl vpichů 0,25mm následně blíže k jádru 0,5mm. Toto rozpoložení můžeme vidět na Obr. č.48.



Obr. č.48 Taktika vpichu

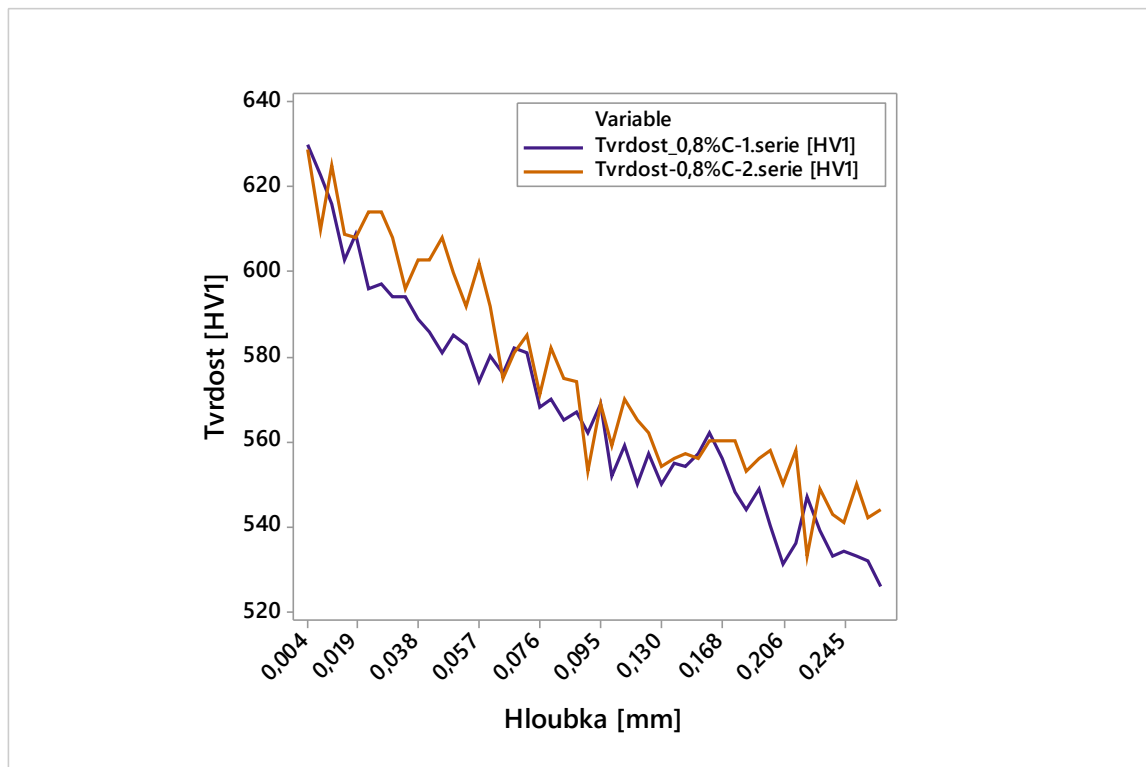
U materiálu 34MnB5 a nauhličení 0,5%C má graf klesající tendenci jak lze očekávat dle tepelného zpracování, kde při nauhličení a následném zakalení vzniká tvrdá povrchová vrstva, kde tvrdost klesá směrem do hloubky vzorku, protože vliv atmosféry působí jen do určité hloubky materiálu, která se bude následně vyhodnocovat. Na Obr. č.49 jsou zobrazeny dvě série měření vzorků 34MnB5 + 0,5%C. Mezi těmito sériemi nepozorujeme příliš velké rozdíly tvrdosti HV1. Tato série splňuje předpokládanou tvrdost.



Obr. č.49 Graf závislosti Tvrdości HV1 na hloubce materiálu 34MnB5+0,5%C

7.2.2 Zkouška mikrotvrdości 34MnB5 + nauhličení 0,8%C

Oproti běžnému nauhličení 0,35%C a vzorkům 0,5%C jsou vzorky 34MnB5 + 0,8%C nauhličené extrémním způsobem oproti normálu. Jak lze vidět v grafu (Obr. č.50), tak tvrdost oproti předešlým vzorkům vzrostla až na 630HV1 a následně dochází k jeho poklesu a vyrovnání tvrdosti s vzorky 34MnB5 + 0,5%C. Pomocí tohoto grafu je snadno definovatelná tvrdost v různých hloubkách. Tato série vzorků taktéž splňuje předpoklad tvrdosti.



Obr. č.50 Graf závislosti Tvrdości HV1 na Hloubce materiálu 34MnB5+0,8%C

7.3 Zkouška složení povrchové vrstvy

Pro zjištění složení povrchové vrstvy byl použit světelný laboratorní mikroskop. V tomto případě byly použity zalisované čtvrt kroužky (Obr. č.51), které byly následně důkladně broušeny, následně leptány. Výsledky budou diskutovány níže.

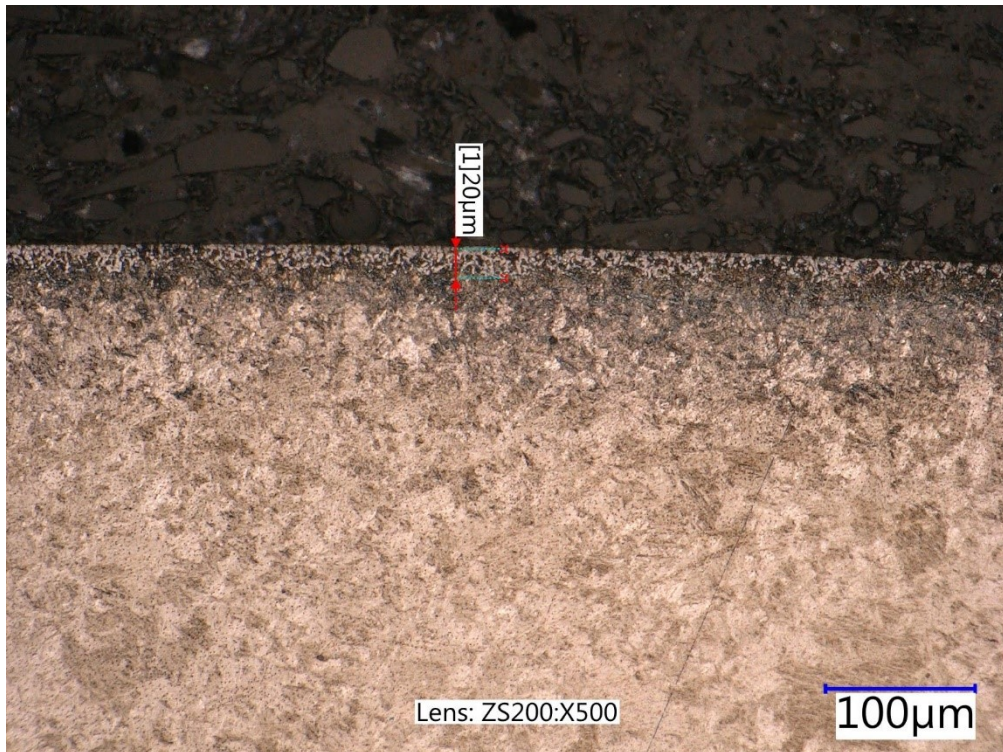


Obr. č.51 Zalisované vzorky pro zkoušku složení povrchové vrstvy

7.3.1 Zkouška složení povrchové vrstvy 34MnB5 + nauhličení 0,5%C

Při samotném tepelném zpracování v kalici peci se díky difuznímu jevu snaží uhlík dostat do prostoru s menším koeficientem uhlíku, tudíž z materiálu ven. Z tohoto důvodu se do pece přidává plynná atmosféra na bázi uhlíku, která zase naopak zabraňuje difuzí uhlíku ven

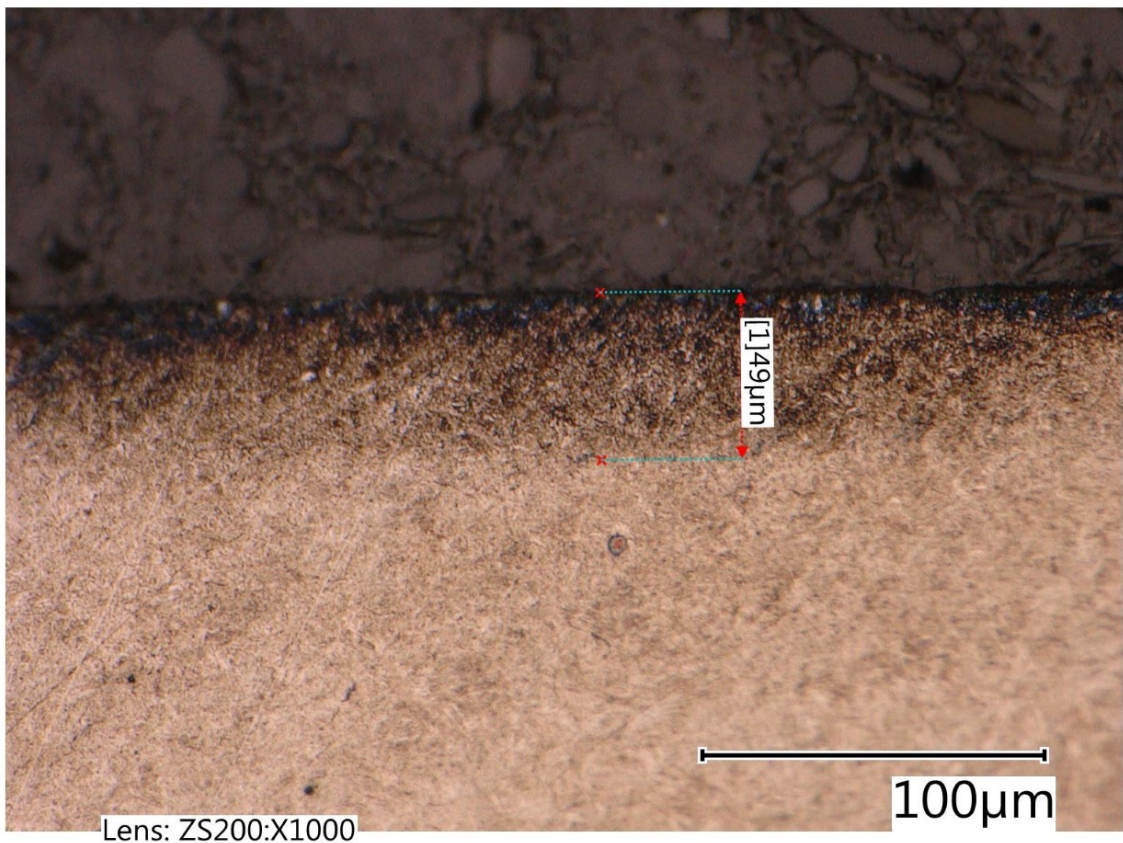
z materiálu. Na základě tohoto jevu při vyhodnocování vzorků 34MnB5 s nauhličením 0,5%C je patrné, že došlo k mírnému oduhličení povrchové vrstvy, protože rozdíl mezi koeficienty obsahu uhlíku (0,34 a 0,5) a nedokonalá inertnost v peci způsobilo tento jev. Významný vliv také hraje kontakt s vnějším prostředím a to především s kyslíkem-vznik samotné oxidace. Výsledek z digitálního světelného mikroskopu je možno vidět na Obr. č. 52. na kterém můžeme vidět velikost oduhličení v hloubce 20 μ m.



Obr. č.52 Oduhličená vrstva materiálu 34MnB5 + 0,5%C

7.3.2 Zkouška složení povrchové vrstvy 34MnB5 + nauhličení 0,8%C

V případě vzorku 34MnB5 s nauhličením 0,8%C už je rozdíl koeficientů uhlíku větší, tudíž při tepelném zpracování dochází k nauhličení povrchu. Podle doby tepelného zpracování v peci a intenzity plynné atmosféry dochází k sycení povrchu do určité hloubky, která výrazně mění mechanické vlastnosti na povrchu materiálu. Na Obr. č.53 můžeme pěkně rozeznat hranici nauhličené vrstvy a také hloubku, do jaké sahá. V tomto případě jde o 49 μ m. Tato změna je pozorovatelná i u zkoušky tvrdosti.



Obr. č.53 Nauhličená vrstva materiálu 34MnB5 + 0,8%C

7.4 Zkouška zbytkového napětí

Zkouška zbytkového napětí byla provedena na difraktometru Bruker D8 Advance (Obr. č. 54). Pomocí tohoto zařízení, které je založeno na bázi rentgenového záření, jsme schopni měřit zbytkové napětí v materiálu. Toto napětí ovlivňuje především pevnostní, únavové a korozní charakteristiky. Tyto charakteristiky jsou ovlivněné především tryskáním jak povrchu uvnitř, tak i na povrchu, kde je dodáno do povrchu zbytkové napětí, které eliminuje mikrotrhliny-místa iniciace defektu a zvyšuje odolnost proti vnějším vlivům.

U naměřených hodnot níže jsme schopni definovat vliv uhlíkové atmosféry při tepelném zpracování na výsledné mechanické vlastnosti.



Obr. č.54 Difraktometr D8 Advance

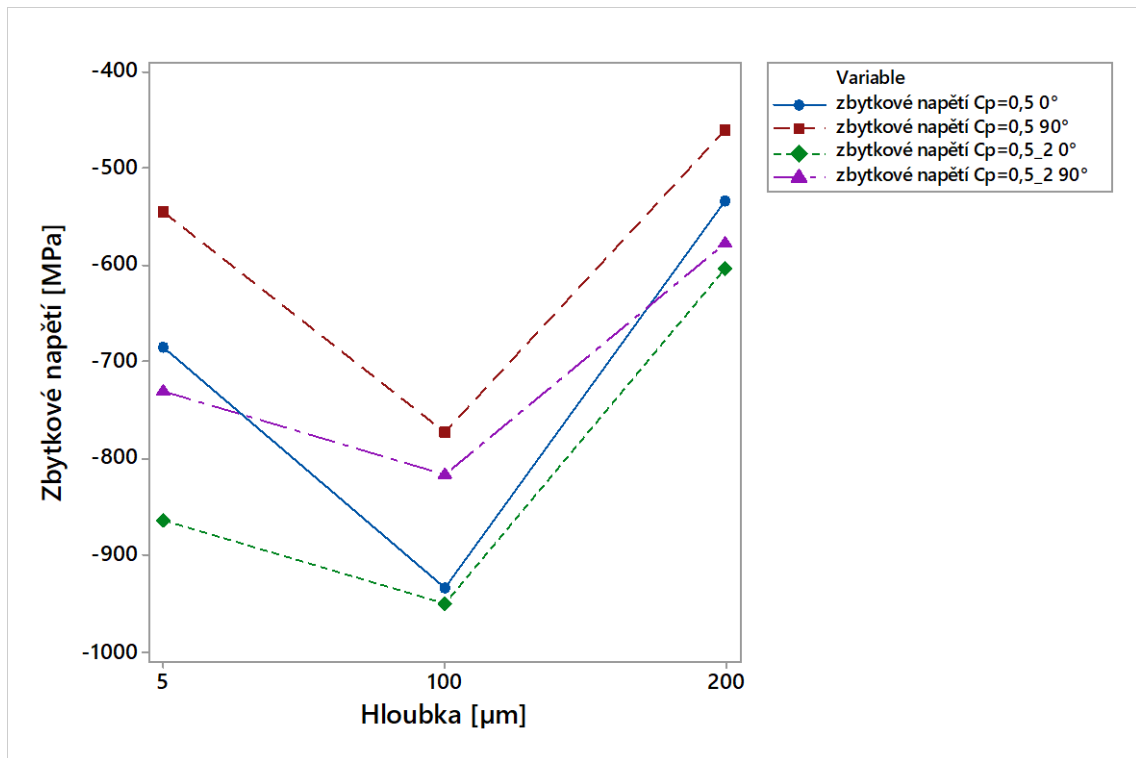
7.4.1 Zkouška zbytkového napětí 34MnB5 + nauhličení 0,5%C

Měření zbytkového napětí bylo provedeno v místě 4. ohybu, které bylo určeno u zkoušky únavy jako nejvíce kritické místo. Toto měření bylo provedeno ve třech hloubkách a v místě 0° a v místě kolmém a to 90° . Naměřené hodnoty jsou přiloženy v Tab. č.8.

Tab. č.8 Naměřené hodnoty vzorku $C_p=0,5\%C$

Vzorek	Zbytkové napětí [Mpa]			
	hloubka [μm]	5	100	200
Vzorek 1-Cp 0,5%C	0°	-684	-934	-534
	90°	-545	-773	-460
	hloubka [μm]	5	100	200
Vzorek 2-Cp 0,5%C	0°	-864	-950	-603
	90°	-730	-816	-578

V přiloženém grafu vidíme, že naměřené hodnoty odpovídají vlastnostem povrchové úpravy pomocí operace tryskání, kde dodáváme zbytkové napětí do povrchu materiálu. Z naměřených hodnot není možno identifikovat trend vlivu nauhličení povrchu. Tudíž můžeme konstatovat, že vliv uhlíkové atmosféry na zbytkové povrchové napětí u tohoto vzorku je minimální.



Obr. č.55 Graf zbytkového napětí v třech hloubkách

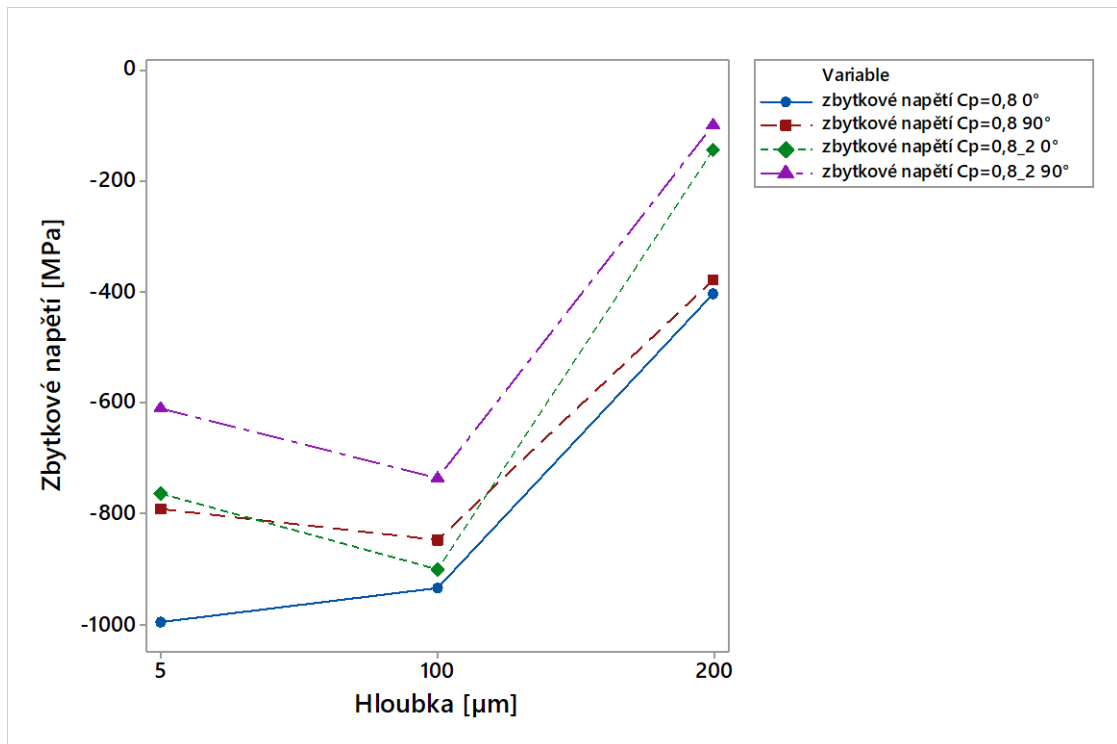
7.4.2 Zkouška zbytkového napětí 34MnB5 + nauhličení 0,8%C

Z naměřených dat (Tab. č.9) je znatelné, že množství zbytkového napětí se nijak výrazně nezměnilo vůči vzorkům s nauhličením 0,5%C. Z tohoto důvodu je možno říci, že povrchové nauhličení nijak neovlivňuje množství zbytkového napětí v materiálu.

Tab. č.9 Naměřené hodnoty zbytkového napětí u vzorku s nauhličením Cp=0,8%C

	Zbytkové napětí [Mpa]			
	hloubka [μm]	5	100	200
Vzorek 3-Cp 0,8%C	0°	-994	-932	-406
	90°	-792	-846	-377
Vzorek 4-Cp 0,8%C	hloubka [μm]	5	100	210
	0°	-762	-901	-144
	90°	-609	-734	-100

V přiloženém grafu vidíme, že i mezi jednotlivými vzorky ani místy měření nejsou výrazné rozdíly, které by byly ovlivněny uhlíkovou atmosférou. V závěru lze říci, jak bylo předpokládáno, že uhlíková atmosféra nemá výrazný vliv na výsledné zbytkové napětí. V tomto případě se na zbytkovém napětí podílí především operace tryskání.



Obr. č.56 Naměřené zbytkové napětí v jednotlivých hloubkách

8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Zjištěná a naměřená data, pomocí kterých bude vyvozen výsledný závěr jsou v tomto případě ovlivněny mírou nauhličení $C_p=0,5\%C$ a $0,8\%C$ vzorků-stabilizátorů při tepelném zpracování. Postup práce byl zvolen tak, že prvním krokem bylo vyrobit dostatečný počet stabilizátorů definovaným technologickým postupem.

Prvním krokem byla zkouška únavy, aby proběhlo podrobné analyzování míst, kde vzorky praskají při potřebném zatížení, a především byl zjištěn počet cyklů do lomu. Po zjištění oblasti, kde stabilizátory praskají, následují zkoušky tvrdosti, povrchového složení a zbytkového napětí v těchto podezřelých místech. Výsledkem by měl být stabilizátor, který splní normy pro expedici hotového kusu.

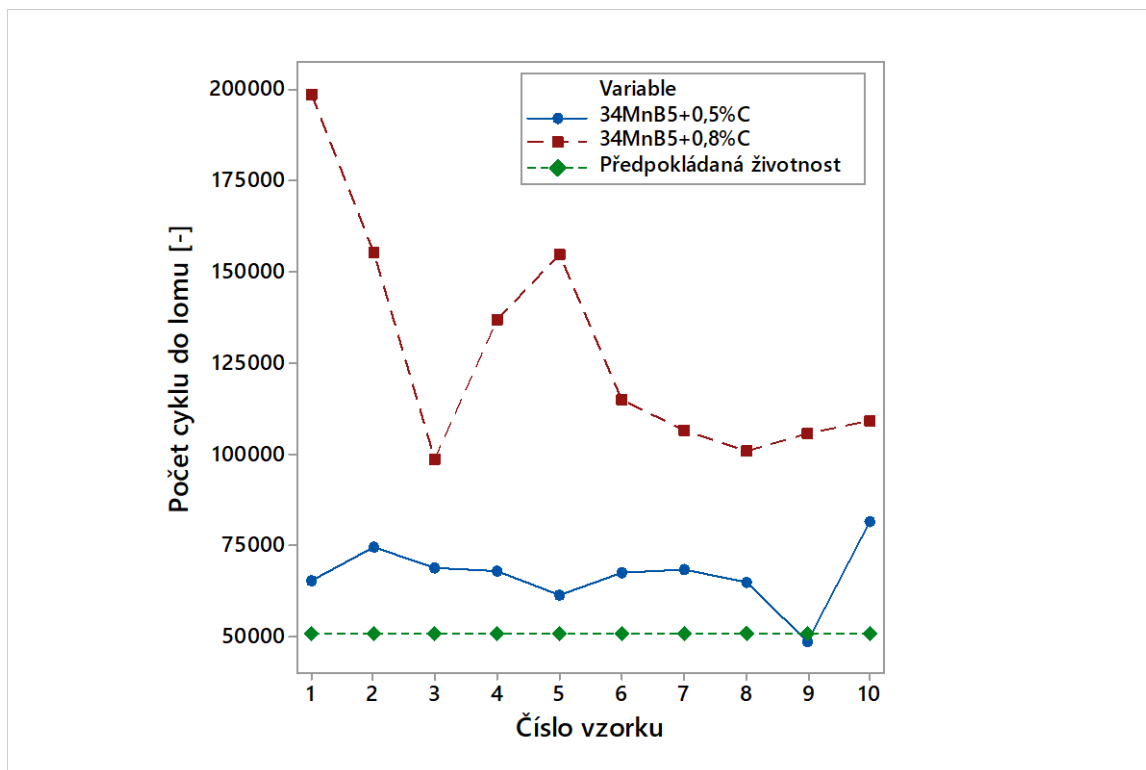
U první zkoušky životnosti byla oblast únavového lomu ve všech případech druhů vzorků většinou ve čtvrtém ohybu – oblast před uložením (Obr. č.57). Ve výjimečných případech tento lom byl v oblasti devátého nebo desátého ohybu. Pomocí tohoto východiska lze říci, že uhlíková atmosféra nemá vliv na oblast únavového lomu.



Obr. č.57 Znárodněná oblast 4.ohybu u stabilizátoru

Při měření počtu cyklů do zlomení už docházelo k značným odlišnostem. V přiloženém grafu (Obr. č.58) lze vyčíst, že vzorky $34MnB5 + 0,5\%C$ jen mírně přesáhly předpokládanou životnost. Oproti materiálu $34MnB5 + 0,8\%C$, kde došlo k nárůstu životnosti o dvojnásobek,

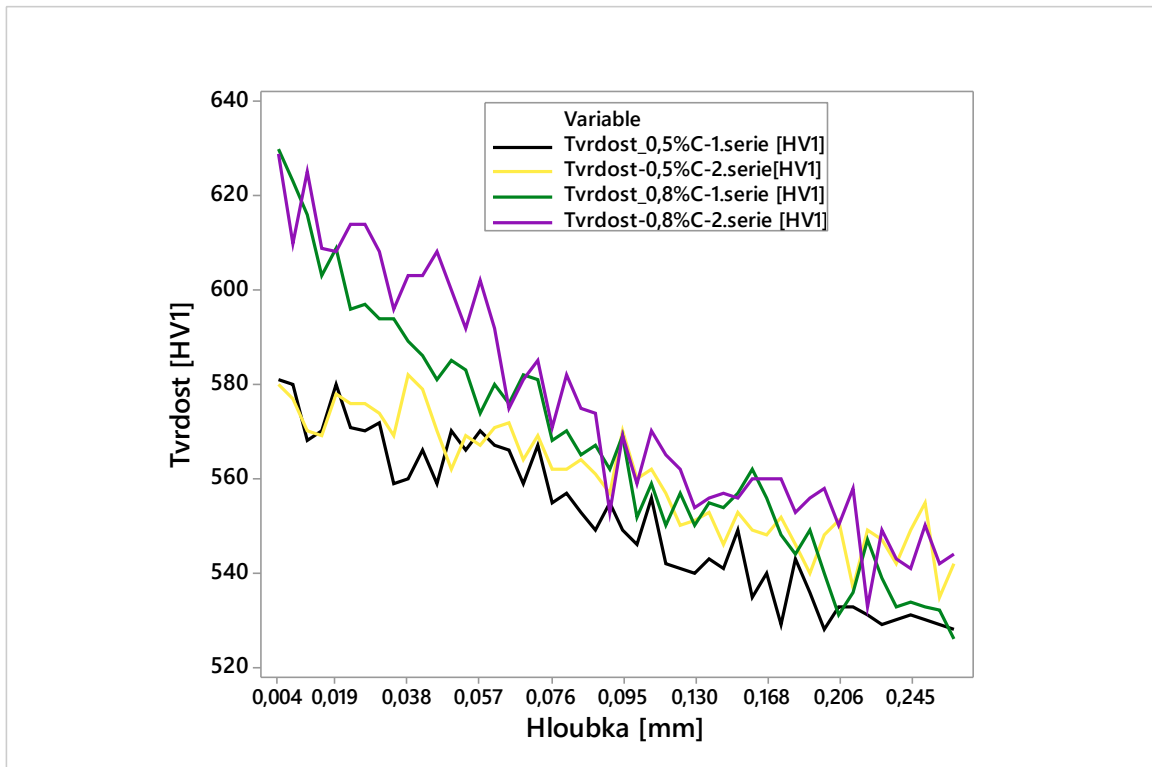
místy o trojnásobek. Tímto lze říci závěr, že povrchová úprava formou nauhličení má značný vliv na životnost stabilizátoru.



Obr. č.58 Graf zkoušky únavy

Nauhličený povrch není jediným kritériem, které zvyšuje životnost. Při technologickém postupu můžeme využít formu tryskání vnějšího povrchu, vnitřního povrchu, změna teplot a časů tepelného zpracování, čímž se samotný stabilizátor stává náročnější na výrobu.

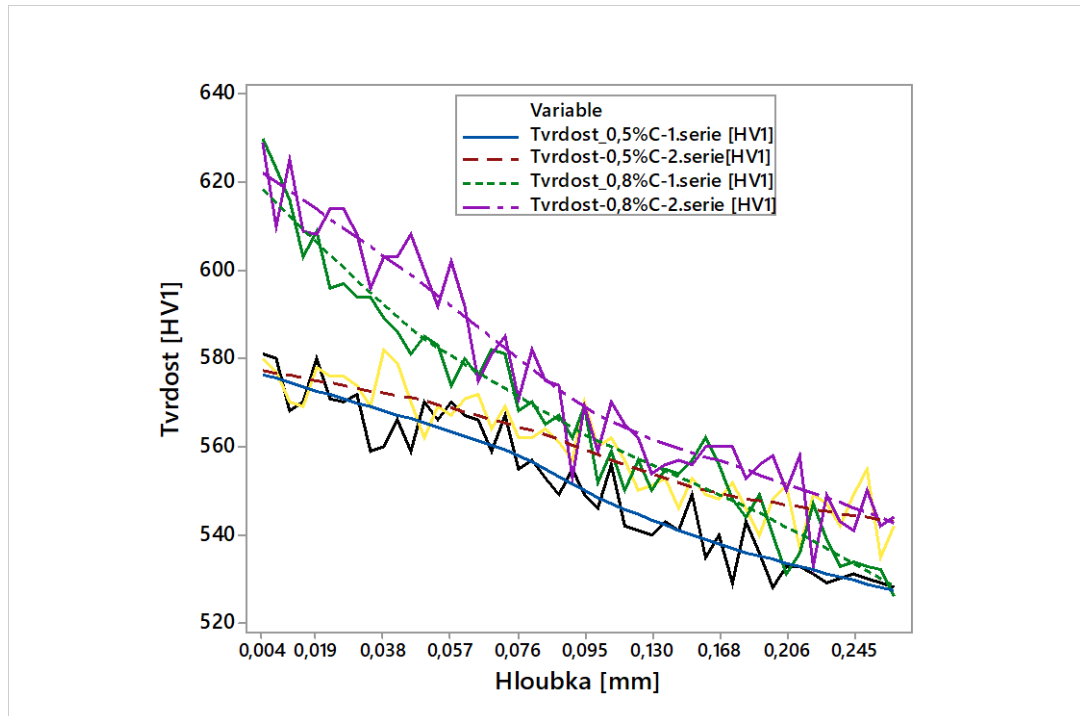
Jak již bylo uvedeno, tak zkouška tvrdosti byla provedena v místě 4. ohybu metodou HV1, při níž bylo využito metody šachovnicového vpichu. Naměřená data u obou druhů vzorků ve dvou sériích jsou přehledně zpracované na Obr. č.59.



Obr. č.59 Graf závislosti Tvrdości HV1 na Hloubce materiálu 34MnB5 s různým nauhličením

Z přiloženého grafu je možno specifikovat změnu tvrdości v závislosti na hloubce. U prvního materiálu s nauhličením $C_p=0,5\%C$ vidíme, že tvrdość téměř na povrchu se pohybuje kolem 580HV1 a s narůstající hloubkou klesá tvrdość až téměř do konstantních hodnot. V druhém případě nauhličení $C_p=0,8\%C$ vidíme skokový nárůst až na 630HV1, protože při nauhličení vyšším koeficientem se dostane do povrchové vrstvy větší množství uhlíku, tudíž po zakažení je tato vrstva tvrdší, což potvrzuje přiložený graf. Obě tyto série splňují předpoklad tvrdości, který se pohybuje mezi 460-540HV1.

Při proložení jednotlivých křivek trendovou křivkou, zjistíme, že tvrdości u obou druhů vzorků se začínají přibližovat podobným hodnotám HV1 v hloubce kolem 55 μ m, která specifikuje účinnou hloubku nauhličení – Obr. č.60.



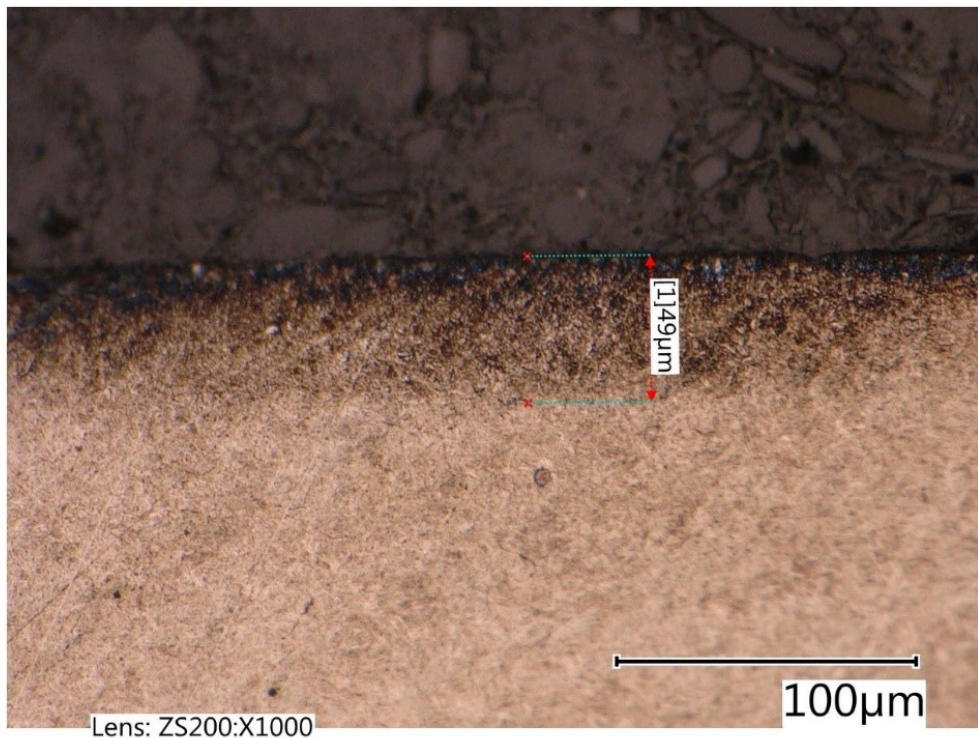
Obr. č.60 Graf závislosti Tvrdości HV1 na Hloubce materiálu 34MnB5 s různým nauhličením – proložení trendovými křivkami

U zkoušky povrchové vrstvy po důkladné úpravě vzorků pomocí leštění a leptání je na elektronovém mikroskopu vidět, že při materiálu 34MnB5+0,5%C došlo k mírnému oduhličení v hloubce místy 20 μm (Obr. č.61). Došlo k tomu vlivem malého rozdílu uhlíkového potenciálu dvou prostředí (materiál-atmosféra). Pomocí zkoušky tvrdosti jsme schopni říci, že tato jemně oduhličená vrstva nemá zásadní vliv na tvrdost materiálu.



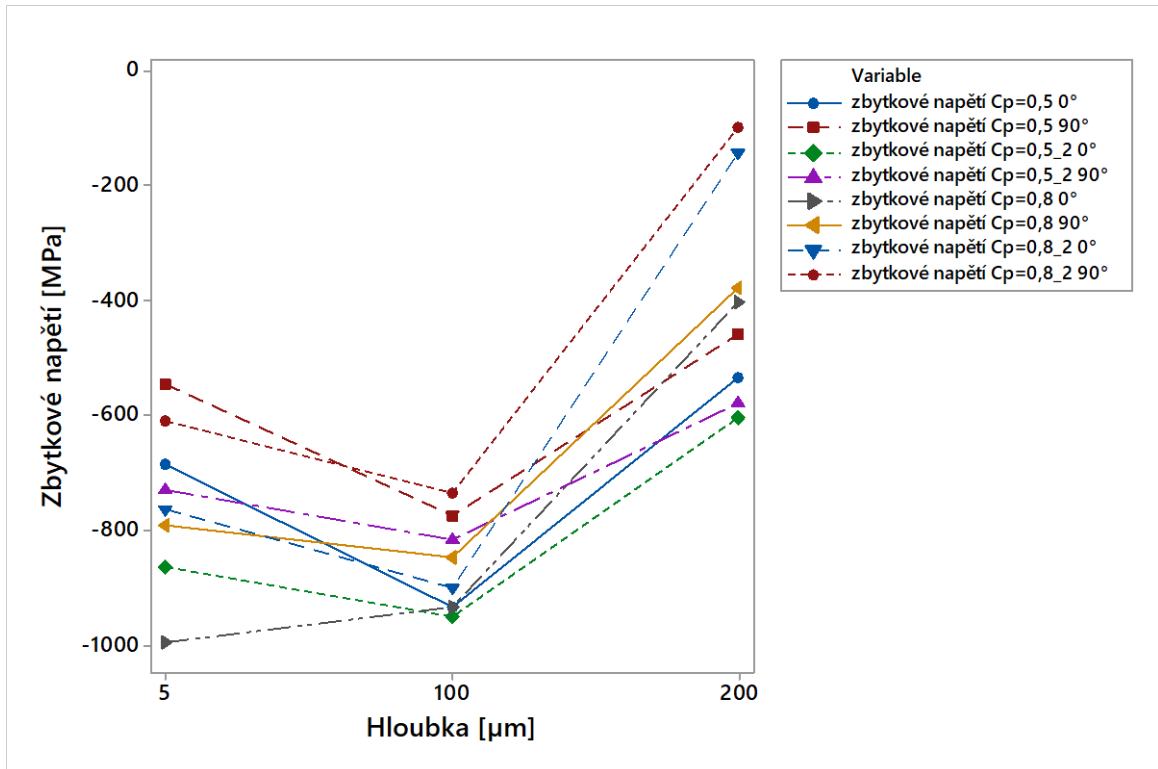
Obr. č.61 Oduhličená vrstva

Při zkoumání povrchu materiálu 34MnB5+0,8%C je vidět důležitá nauhličená část, která značně ovlivňuje jak životnost tak výslednou tvrdost. Tato vrstva zasahuje do hloubky 49 μ m (Obr. č.62). Je to zapříčiněno velkým rozdílem uhlíkového potenciálu prostředí = vysoce nasycený povrch uhlíkem, který byl následně zakalen.



Obr. č.62 Nauhličená vrstva

Při měření zbytkového napětí v hloubkách 5,100 a 200 μ m-místech 0° a 90° u obou druhů vzorků bylo dospěno k závěru, že nauhličená vrstva nemá žádný výrazný vliv na výsledné zbytkové napětí, které výrazně ovlivňuje pevnostní charakteristiky, životnost a korozní charakteristiky, kvůli kterým vznikají místa iniciace lomu.



Obr. č.63 Naměřená data zbytkového napětí

Z přiloženého grafu vidíme, že u všech vzorků nepozorujeme žádnou výraznou změnu trendů průběhu jednotlivých křivek, z kterých by šel dobře rozeznat vliv povrchového nauhličení. Z toho důvodu je možno klasifikovat, že tato naměřená zbytková napětí jsou pozůstatky ze samotné výroby vzorků – proces ohýbaní, tepelné zpracování (kalení, popouštění) a tryskání povrchu vzorků, nikoli vliv uhlíkové atmosféry v kalící peci.

ZÁVĚR

Náplní této diplomové práce bylo zjistit, jaký vliv má nauhličení povrchu v peci při tepelném zpracování na výsledné mechanické vlastnosti.

Teoretická část je rozdělena do tří základních kapitol. V první kapitole je uveden přehled materiálu, pro realizaci této diplomové práce a rozdělení tepelného zpracování pro automotive. V druhé kapitole jsou uvedeny druhy chemicko-tepelného zpracování, různé prostředí pro nauhličení zkoumaného povrchu apod. V poslední kapitole jsou uvedeny metody pro měření jednotlivých mechanických vlastností, pomocí kterých lze specifikovat vliv atmosféry tepelného zpracování ocelí.

V praktické části je popsán a rozebrán mechanismus automobilového stabilizátoru, který byl použit jako vzorek pro provedení diplomové práce. Následuje podrobný popis jednotlivých technologických operací a procesních podmínek pro výrobu zkušebních vzorků.

Pro základní analýzu stabilizátoru s různým množstvím povrchového nauhličení byla zvolena zkouška únavy, tvrdosti, zbytkového napětí a zkoumání nauhličené vrstvy pomocí digitálního světelného mikroskopu.

Při zkoušce únavy bylo zjištěno, že stabilizátor 34MnB5+0,5%C praská většinou ve čtvrtém ohybu od počátku s průměrnou hodnotou cyklů 66939 při frekvenci 16,6 Hz a napětí 1000 MPa. V jednom případě byl stabilizátor poškozen již při 48838 cyklů, kde u tohoto typu stabilizátoru předpokládaná živostnost byla zvolena na 51026 kmitů. U materiálu 34MnB5+0,8%C se průměrná hodnota kmitů zvýšila na 128102 a místo iniciace lomu bylo z pravidla také ve čtvrtém ohybu. Zkouška únavy naznačila, že vliv povrchového nauhličení má značný vliv na životnost stabilizátoru.

Pro zkoušku tvrdosti byla zvolena oblast čtvrtého ohybu, která byla označena za kritické místo. Měření tvrdosti bylo provedeno do hloubky 250 μm metodou HV1. U materiálu 34MnB5+0,5%C na povrchu byla naměřena hodnota 580HV1, která klesá s hloubkou na hodnotu 541HV1. Povrchová vrstva materiálu 34MnB5+0,8%C byla značně tvrdší a to 630HV1, která také klesá s hloubkou na hodnotu 540HV. Z trendů křivek lze vyčíst i účinnou hloubku nauhličení a to 55 μm .

Při použití světelného mikroskopu lze snadno rozpoznat účinnou hloubku nauhličení. U materiálu 34MnB5+0,5%C došlo k mírnému oduhličení, protože rozdíl uhlíkových potenciálů byl nízký a inertnost kalicí pece nebyla zcela dokonalá. Toto oduhličení nemělo významný

vliv na naměřené hodnoty. Materiál 34MnB5+0,8%C má větší rozdíl uhlíkových potenciálů tudíž došlo k nauhličení povrchu v hloubce 49 μm , která odpovídá i hloubce při měření tvrdosti.

Poslední analýzou byla zkouška zbytkového napětí, pomocí které bylo zjištěno, že z trendů křivek naměřených hodnot nelze rozpoznat vliv nauhličení povrchu stabilizátoru s různým koeficientem nauhličení C_p . Z trendů křivek jde vidět dodání povrchového napětí pomocí tryskání povrchu, kde dochází k poklesu zbytkového napětí v hloubce 5-100 μm a následnému nárůstu v hloubce 200 μm .

Při testech tohoto stabilizátoru vyrobeného z předuhličené trubky od externího dodavatele, která je značně dražší, bylo dospěno k závěru, že spolehlivě splňuje veškeré technologické aspekty. Tato diplomová práce obsahuje korekci nauhličení surové nepředuhličené trubky(levnější) při tepelném zpracování na $C_p=0,5\%C$ a $C_p=0,8\%C$. Po analýze naměřených dat jsme schopni říci, že nauhličení $C_p=0,8\%C$ v provedených zkouškách spolehlivě nahrazuje předuhličenou trubku, tudíž tato cesta je reálná k finanční úspoře.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] REIMPEL, J. a kol. *The Automotive Chassis*. 2. vyd. Oxford: ButterworthHeinemann, 2001. 116 s. ISBN 0 7506 5054 0.
- [2] GILLESPIE, T. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. 1. vyd. Society of Automotive Engineers, Inc., 2001. 116 s.
- [3] *The car Bibles* [online]. [cit. 2019-10-25]. Dostupný z WWW:
<http://www.carbibles.com/suspension_bible_pg4.html>.
- [4] HANEY, P. *The Racing & High-Performance Tire*. 1. vyd. Society of Automotive Engineers, 2003. ISBN 0-9646414-2-9.
- [5] JECH, Jaroslav. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4., přeprac. a dopl. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 2003.
- [6] KRAUS, Václav. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vydání. Plzeň : Západočeská univerzita, Strojní fakulta, 2000. ISBN 8070825820.
- [7] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vydání. Plzeň : Západočeská univerzita, 2005. ISBN 8070434171.
- [8] SILBERNAGEL, A., *Struktura, vlastnosti, zkoušení a použití kovů*, Ostrava: Kovosil, 2011. ISBN 978-80-903694-6-7.
- [9] HLUCHÝ, M., KOLOUCH, J., *Strojírenská technologie 1*, 1. díl. Scienta Praha 2007, ISBN 978-80-86960-26-5
- [10] GANEV, Nikolaj a Ivo KRAUS. *X-ray diffraction measurement of residual stresses*. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, 2002.
- [11] BILÍK, O. *Obrábění II - 1.díl – Fyzikálně mechanické zákonitosti procesu obrábění*, 2. vydání, Ostrava: VŠB Technická Univerzita Ostrava, Ediční středisko VŠB-TU, 1999. ISBN 80-7078-962-X.
- [12] KONDERLA, R. *Vliv geometrie frézovací hlavy na napětí v povrchové vrstvě obrobku*. Ostrava, 2008. 71 s. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita.
- [13] *Interní materiály firmy ARBON*

- [14] DUŠEK, J., *Dizertační práce - Tvrdost, mikrotvrdost, nanotvrdost – čisté kovy měřené metodou DSI*, Brno: Masarykova univerzita v Brně, 171 s.
- [15] PANDEY, Chandan, Manas Mohan MAHAPATRA a Pradeep KUMAR. *Role of evolving microstructure on the mechanical behaviour of P92 steel welded joint in as-welded and post weld heat treated state* [online]. 2019, , 241-255 [cit. 2020-01-09]. DOI: 10.1016. Dostupné z: https://apps-webofknowledge-com.proxy.k.utb.cz/full_record.do?search_mode=GeneralSearch&qid=4&log_eveve=yes&product=WOS&SID=D6CQ1MF7sc2lzF77aHV&viewType=fullRecor&doc=2&page=1&excludeEventConfig=ExcludeIfFromFullRecPage
- [16] ADAMCZYK-CIESLAK, Boguslaw, Milena KORALNIK a Roman KUZIĄK. *Effects of Heat Treatment Parameters on the Microstructure and Properties of Bainitic Steel* [online]. 2019, , 7171-7180 [cit. 2020-01-09]. DOI: 10.1007. Dostupné z: https://apps-webofknowledge-com.proxy.k.utb.cz/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=18&SID=D6CQ1MF7sc2lzF77aHV&page=7&doc=64
- [17] KUMAR, Avnish a Aparna SINGH. *Deformation mechanisms in nanostructured bainitic steels under torsion* [online]. 2020 [cit. 2020-01-09]. DOI: 10.1016. Dostupné z: https://apps-webofknowledge-com.proxy.k.utb.cz/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=15&SID=D6CQ1MF7sc2lzF77aHV&page=1&doc=8
- [18] LIU, Chuan a Xiang XIANG. *Residual stress measurement on AA6061-T6 aluminum alloy friction stir butt welds using contour method* [online]. 2013, , 366-371 [cit. 2020-01-09]. DOI: 10.1080. Dostupné z: https://apps-webofknowledge-com.proxy.k.utb.cz/CitedFullRecord.do?product=WOS&colName=WOS&SID=D6CQ1MF7sc2lzF77aHV&search_mode=CitedFullRecord&isickref=WOS:000314870000044
- [19] GUERRA-FUENTES, L., M. A. L. HERNANDEZ-RODRIGUEZ a P. ZAMBRANO-ROBLEDO. *Microstructure and Mechanical Properties of a Tempered High Cr Martensitic Steel* [online]. 2017, , 3500-3506 [cit. 2020-01-09]. DOI: 10.1007. Dostupné z: https://apps-webofknowledge-com.proxy.k.utb.cz/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=46&SID=D6CQ1MF7sc2lzF77aHV&page=12&doc=111
- [20] XIONG, Zhihong a Donghui WEI. *Fatigue behavior of 316 L stainless steel weldment up to very-high-cycle fatigue regime* [online]. 2019, , 3500-3506 [cit. 2020-01-09]. DOI: 10.1088. Dostupné z: https://apps-webofknowledge-com.proxy.k.utb.cz/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=46&SID=D6CQ1MF7sc2lzF77aHV&page=12&doc=111

duct=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=46&SID=D6CQ1MF7sc2lzF77a
HV&page=12&doc=111

- [21] SUGIMOTO, Koh-ich a Tomohiko HOJO. *Fatigue strength of a vacuum-carburised TRIP-aided martensitic steel* [online]. 2018, , 743-750 [cit. 2020-01-09]. DOI: 10.1080. Dostupné z: https://apps- webofknowledge-com.proxy.k.utb.cz/full_record.do?pro duct=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=66&SID=D6CQ1MF7sc2lzF77a HV&page=5&doc=47

- [22] LINS, Amilton de Sousa, Luis Felipe DE SOUZA a Maria Cindra FONSECA. *Characterization of Mechanical Properties and Residual Stress in API 5L X80 Steel Welded Joints* [online]. 2018, , 124-137 [cit. 2020-01-09]. DOI: 10.1007. Dostupné z: https://apps- webofknowledge-com.proxy.k.utb.cz/full_record.do?pro duct=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=66&SID=D6CQ1MF7sc2lzF77 aHV&page=5&doc=49

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Význam	Jednotka
26MnB5	Označení materiálu.	[-]
34MnB5	Označení materiálu.	[-]
Re	Mez kluzu.	[MPa]
Rm	Mez pevnosti.	[MPa]
T	Čas.	[s]
H	Hloubka.	[mm]
Cp	Koeficient nauhličení.	[%C]
HV	Tvrдость dle Vickerse.	[HV1]
HB	Tvrдость dle Brinella	[HB1]
F	Síla.	[N]
f	Frekvence.	[Hz]
SP	Start point.	[-]
EP	End point.	[-]
Kgf	Kilogramforce-zatížení.	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. č.1 Diagram tepelného zpracování ocelí [5]</i>	13
<i>Obr. č.2 Žíhací teploty uhlíkových ocelí [5]</i>	14
<i>Obr. č.3 Lomené kalení (1), Martenzitické kalení (2) [6]</i>	16
<i>Obr. č.4 Surový materiál–DUB-degenerovaný austenit, M/A–fáze austenit martenzit [16]</i>	17
<i>Obr. č.5 Izotermicky zakalený materiál [16]</i>	18
<i>Obr. č.6 Kalení s zamrazováním [6]</i>	19
<i>Obr. č.7 Oblast heterogenity struktury při popouštění [15]</i>	20
<i>Obr. č.8 Oblasti měření tvrdosti surový materiál – svařovaná oblast [15]</i>	20
<i>Obr. č.9 Tepelné zpracování s uhlíkovou atmosférou s difúzním koeficientem C_p [21]</i>	24
<i>Obr. č.10 Zachycení nauhličeného povrchu pomocí elektronového mikroskopu [21]</i>	24
<i>Obr. č.11 Zkouška dle Brinella [7]</i>	28
<i>Obr. č.12 Zkouška dle Vickerse [7]</i>	28
<i>Obr. č.13 Vliv C_p na tvrdost HV změřenou na povrchu [21]</i>	29
<i>Obr. č.14 Zkouška dle Rockwella [8]</i>	29
<i>Obr. č.15 Zkouška dle Knoopu [9]</i>	30
<i>Obr. č.16 Wöhlerův diagram – logaritmická stupnice [7]</i>	31
<i>Obr. č.17 Únavový lom kmitů [20]</i>	32
<i>Obr. č.18 Únavový lom kmitů [20]</i>	33
<i>Obr. č.19 Výsledek zkoušky vysokokmitové únavy [7]</i>	35
<i>Obr. č.20 Diagram vysokokmitové zkoušky pro daný případ z výzkumu [20]</i>	35
<i>Obr. č.21 Výsledek nízkokmitové únavy [7]</i>	36
<i>Obr. č.22 Výbrus vzorku pro hodnocení zpevněné vrstvy–metoda šikmých řezů [11]</i>	38
<i>Obr. č.23 Naměřené zbytkové napětí pomocí metody kontury [18]</i>	38
<i>Obr. č.24 Diagram měření zbytkového napětí pomocí rentgenové difraktometrie v oblasti svarového spoje [22]</i>	39
<i>Obr. č.25 Stabilizátor tvaru U [3]</i>	43
<i>Obr. č.26 U stabilizátor s táhlem [4]</i>	43
<i>Obr. č.27 Tvar stabilizátoru-vzorku</i>	44

<i>Obr. č.28 Ohýbací zařízení Wafios RST 28</i>	<i>45</i>
<i>Obr. č.29 Geštel-uložení vzorků při tepelném zpracování.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. č.30 Šablona pro rovnání</i>	<i>47</i>
<i>Obr. č.31 Heat mapa.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. č.32 Tryskáč hadice.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. č.33 Tryskáč hlava.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. č.34 Tryskáč komora</i>	<i>50</i>
<i>Obr. č.35 Zalisované konce</i>	<i>50</i>
<i>Obr. č.36 Nahřátí konců pomocí indukčních cívek.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. č.37 Vysokotlaký list</i>	<i>51</i>
<i>Obr. č.38 Tryskáč komora s neotryskaným závěsem</i>	<i>52</i>
<i>Obr. č.39 Analýza místa předpokládaného lomu=B5 Max</i>	<i>53</i>
<i>Obr. č.40 Kmitací zařízení pro měření únavy stabilizátoru</i>	<i>54</i>
<i>Obr. č.41 Upevnění stabilizátoru v kmitačce dle výkresové dokumentace.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. č.42 Protokol pro vyhodnocení místa lomu, ohyb č.4</i>	<i>55</i>
<i>Obr. č.43 Protokol pro vyhodnocení místa lomu, ohyb č.10</i>	<i>56</i>
<i>Obr. č.44 Místo iniciace lomu – naznačeno šipkou.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. č.45 Vyříznuté prstýnky pro zkoušku tvrdost a složení povrchové vrstvy.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. č.46 Obroušené zalisované vzorky</i>	<i>59</i>
<i>Obr. č.47 Tvrdoměr CARAT 950</i>	<i>59</i>
<i>Obr. č.48 Taktika vpichu.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. č.49 Graf závislosti Tvrdosti HV1 na hloubce materiálu 34MnB5+0,5%C</i>	<i>61</i>
<i>Obr. č.50 Graf závislosti Tvrdosti HV1 na Hloubce materiálu 34MnB5+0,8%C.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. č.51 Zalisované vzorky pro zkoušku složení povrchové vrstvy.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. č.52 Oduhličená vrstva materiálu 34MnB5 + 0,5%C.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. č.53 Nauhličená vrstva materiálu 34MnB5 + 0,8%C.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. č.54 Difraktometr D8 Advance.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. č.55 Graf zbytkového napětí v třech hloubkách</i>	<i>66</i>
<i>Obr. č.56 Naměřené zbytkové napětí v jednotlivých hloubkách</i>	<i>67</i>
<i>Obr. č.57 Znázorněná oblast 4.ohybu u stabilizátoru</i>	<i>68</i>
<i>Obr. č.58 Graf zkoušky únavy.....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. č.59 Graf závislosti Tvrdosti HV1 na Hloubce materiálu 34MnB5 s různým nauhličením</i>	<i>70</i>

<i>Obr. č.60 Graf závislosti Tvrdosti HV1 na Hloubce materiálu 34MnB5 s různým nauhličením – proložení trendovými křivkami</i>	<i>71</i>
<i>Obr. č.61 Oduhličená vrstva</i>	<i>71</i>
<i>Obr. č.62 Nauhličená vrstva</i>	<i>72</i>
<i>Obr. č.63 Naměřená data zbytkového napětí.....</i>	<i>73</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. č.1 Pevnostní charakteristiky materiálu 26MnB5 [13]</i>	<i>11</i>
<i>Tab. č.2 Chemické složení materiálu 26MnB5 [13]</i>	<i>11</i>
<i>Tab. č.3 Pevnostní charakteristiky materiálu 34MnB5</i>	<i>12</i>
<i>Tab. č.4 Chemické složení materiálu 34MnB5</i>	<i>12</i>
<i>Tab. č.5 Hodnoty mechanických vlastností materiálu 34MnB5 po zušlechtní.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. č.6 Naměřené hodnoty při zkoušce únavy materiálu 34MnB5+0,5%C</i>	<i>57</i>
<i>Tab. č.7 Naměřená data při zkoušce únavy materialu 34MnB5+0,8%C</i>	<i>58</i>
<i>Tab. č.8 Naměřené hodnoty vzorku Cp=0,5%C</i>	<i>65</i>
<i>Tab. č.9 Naměřené hodnoty zbytkového napětí u vzorku s nauhličením Cp=0,8%C</i>	<i>66</i>