



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

VLIV TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ NA STRUKTURU A MECHANICKÉ VLASTNOSTI NÁSTROJOVÝCH OCELÍ

THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL
PROPERTIES OF TOOL STEELS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

STANISLAV TOBOLÍK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. EVA NOVOTNÁ, Ph.D., Paed IGIP

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Stanislav Tobolík

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Vliv tepelného zpracování na strukturu a mechanické vlastnosti nástrojových ocelí

v anglickém jazyce:

The Influence of Heat Treatment on the Structure and Mechanical Properties of Tool Steels

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student bude ve své závěrečné práci:

- charakterizovat nástrojové oceli
- uvede požadavky na ně v provozu kladené
- popíše způsoby tepelného zpracování nástrojových ocelí na požadované vlastnosti
- uvede metody zkoušení těchto vlastností včetně zjišťování struktury materiálu
- provede zkoušky základních mechanických vlastností dodaných materiálů
- vyhodnotí strukturu materiálů
- na základě diskuse výsledků vybere materiál, který nejlépe vyhovuje provozním požadavkům.

Cíle bakalářské práce:

Student se ve své závěrečné práci seznámí s problematikou nástrojových ocelí a jejich tepelného zpracování, s metodami zkoušení mechanických vlastností a s určováním struktury materiálů. V praktické části práce provede zkoušky základních mechanických vlastností čtyř typů tepelně zpracovaných nástrojových ocelí, určí jejich strukturu a po vyhodnocení a diskusi výsledků vybere tu, která pro dané praktické použití nejlépe vyhovuje.

Seznam odborné literatury:

1. Ptáček, L. a kol.: Nauka o materiálu I. Brno, CERM 2001. ISBN 80-7204-193-2.
- 2.1. Ptáček, L. a kol.: Nauka o materiálu II. Brno, CERM 1999. ISBN 80-7204-130-4.
3. Fremunt, P. a kol.: Nástrojové oceli. Brno, Dům techniky, 1994.
4. Jech, J.: Tepelné zpracování ocelí. Praha, SNTL, 1983.
5. Veles, P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. Bratislava, Alfa, 1985.
6. materiálové normy dle potřeby
7. další knižní, časopisecké, internetové a firemní materiály dle potřeby

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Eva Novotná, Ph.D., Paed IGIP

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 18.12.2013

L.S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu

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

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá vlastnostmi nástrojových ocelí po tepelném zpracování. Teoretická část obsahuje popis vlastností železa a jeho slitin s uhlíkem, přehled a použití ocelí. Dále je podrobně rozebráno tepelné zpracování nástrojových ocelí a postup výroby a analýzy metalografického vzorku. V předposlední části bakalářské práce jsou popsány mechanické zkoušky kovů. V praktické části je testována struktura a mechanické vlastnosti vybrané nástrojové oceli po dvou typech tepelného zpracování a výsledky jsou porovnány s požadavky na ni kladené.

Abstract

This bachelor thesis deals with the properties of tool steels after heat treatment. The theoretical part describes the properties of iron and its alloys with carbon, and an overview of the use of steel. It is also discussed in detail the heat treatment of tool steels and manufacturing process analysis and metallographic sample. In the last part of the bachelor thesis there are described the mechanical testing of metals. In the practical part it is tested structure and mechanical properties of the selected tool steels for two types of heat treatment and the results are compared with the requirements imposed on it.

Klíčová slova

Nástrojová ocel, kalení, popouštění, mechanické zkoušení kovů, metalografická analýza, struktura, pevnost, tvrdost, houževnatost, fraktografie.

Key words

Tool steel, quenching, tempering, mechanical testing of metals, metallographic analysis, structure, strength, hardness, toughness, fractography.

Bibliografická citace:

TOBOLÍK, S. *Vliv tepelného zpracování na strukturu a mechanické vlastnosti nástrojových ocelí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Novotná, Ph.D., Paed IGIP.

Prohlášení

Já, Stanislav Tobolík, prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Vliv tepelného zpracování na strukturu a mechanické vlastnosti nástrojových ocelí vypracoval samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce Ing. Evy Novotné, Ph.D., Paed IGIP a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na konci této práce.

V Brně dne 29. 5. 2014

.....

Stanislav Tobolík

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Evě Novotné, Ph.D., Paed IGIP za odborné vedení, připomínky a rady při tvorbě práce. Chtěl bych také poděkovat panu Jaromíru Kalendovi za seznámení s tímto zajímavým tématem bakalářské práce. Dále chci poděkovat mé přítelkyni a rodině, kteří mě podporovali a byli trpěliví po celou dobu mého bakalářského studia.

Obsah:

1 Úvod	11
1.1 Cíl práce	11
2 Železo a jeho slitiny s uhlíkem.....	11
2.1 Další prvky ve slitinách železa s uhlíkem.....	12
3 Přehled a použití ocelí	13
3.1 Konstrukční oceli	13
3.1.1 Nelegované oceli obvyklých jakostí	13
3.1.2 Oceli jakostní a ušlechtilé	13
3.1.2.1 Oceli pro ocelové konstrukce	13
3.1.2.2 Oceli pro tlakové nádoby	13
3.1.3 Automatové oceli	14
3.1.4 Oceli k cementování	14
3.1.5 Oceli k zušlechťování	14
3.2 Nerezavějící oceli včetně žárovzdomných a žárovevných	15
3.2.1 Nerezavějící oceli.....	15
3.2.2 Žárovevné oceli.....	15
3.3 Nástrojové oceli	15
4 Tepelné zpracování nástrojových ocelí.....	16
4.1 Žihání	16
4.1.1 Žihání na měkko	17
4.1.2 Žihání na snížení pnutí.....	17
4.1.3 Žihání normalizační	17
4.2 Kalení	17

4.2.1 Ohřev na kalící teplotu.....	18
4.2.2 Ochlazování	19
4.3 Popouštění.....	20
4.4 Tepelné zpracování rychlořezných ocelí	20
5 Metalografie	21
6 Mechanické zkoušení kovů.....	22
6.1 Zkouška tahem	23
6.1.1 Druhy zkušebních tyčí	24
6.1.2 Mez kluzu.....	25
6.1.3 Mez pevnosti.....	26
6.1.4 Tažnost	26
6.1.5 Kontrakce	26
6.2 Zkouška statickým ohybem	27
6.3 Zkoušky tvrdosti.....	28
6.3.1 Tvrdost podle Rockwella	30
6.4 Zkouška rázem v ohybu	31
7 Experimentální část práce	34
7.1 Popis experimentu.....	34
7.1.1 Experimentální materiál.....	34
7.1.2 Zkoušené vzorky	35
7.2 Experimentální metody zkoušení.....	35
7.2.1 Metalografická analýza	35
7.2.2 Vyhodnocení metalografické analýzy	38
7.2.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella	38

7.2.4 Vyhodnocení zkoušek tvrdosti.....	38
7.2.5 Zkouška rázem v ohybu.....	40
7.2.6 Porovnání výsledků zkoušky rázem v ohybu	42
8 Závěr.....	43
Seznam použité literatury.....	44
Seznam příloh.....	45
Přílohy	46

1 Úvod

1.1 Cíl práce

Cílem předkládané bakalářské práce je zjistit strukturu a mechanické vlastnosti nástrojové oceli 1.2379 po čtyřech typech tepelného zpracování.

Teoretická část práce obsahuje souhrn základních informací o soustavě Fe – Fe₃C a o možnostech ovlivňování struktury a tím i mechanických vlastností pomocí legování a tepelného zpracování. Dále je uveden postup při určování struktury materiálu a stručný popis metod, pomocí kterých zjišťujeme základní mechanické vlastnosti.

V experimentální části je popsán zkoumaný materiál a uvedeny provedené experimenty včetně jejich výsledků. Po prodiskutování výsledků bude vysloven závěr o vhodnosti daného režimu tepelného zpracování pro vytvoření struktury poskytující požadované mechanické vlastnosti materiálu.

2 Železo a jeho slitiny s uhlíkem [1]

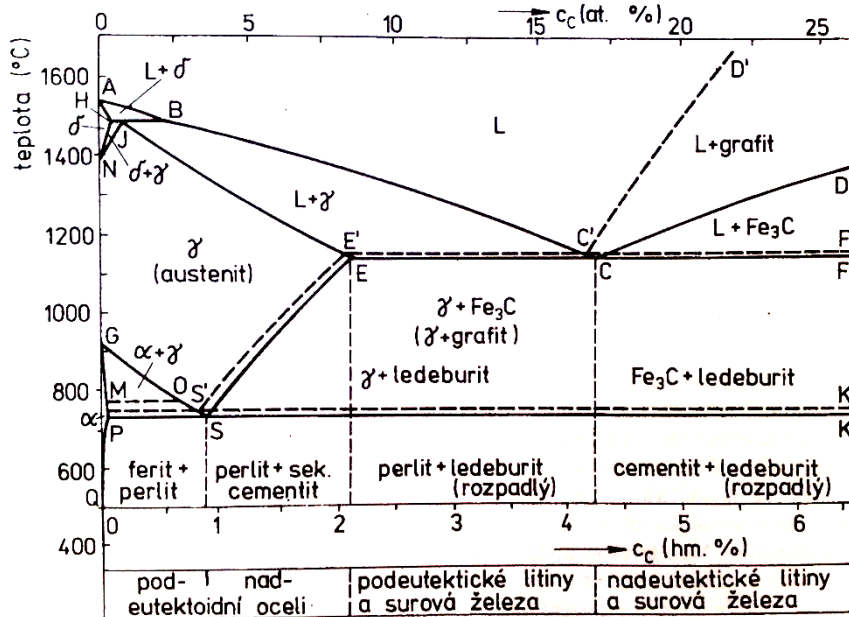
2.1 Železo

Železo je alotropní materiál, tzn., že mění svou krystalografickou mřížku podle teploty. Do teploty 911°C se vyskytuje s krychlovou prostorově středěnou krystalickou mřížkou, označuje se jako železo α . Do teploty 760°C má železo α feromagnetické vlastnosti, nad touto teplotou je ztrácí a stává se paramagnetickým. Železo s nemagnetickými vlastnostmi a krychlovou prostorově středěnou krystalickou mřížkou se označuje jako železo β . Mezi teplotami 911 ÷ 1392°C má železo krychlovou plošně středěnou krystalickou mřížku a je označováno jako železo γ . Nad tímto intervalem až do teploty tavení se železo vyskytuje opět v krychlové prostorově středěné krystalické mřížce a je označováno jako železo δ .

2.2 Železo a uhlík

Čisté železo v praxi nemá velký význam. Hlavní využití železa je ve spojení s uhlíkem. Uhlík významně ovlivňuje vlastnosti železa, tvoří s ním intersticiální tuhé roztoky s omezenou rozpustností. Po překročení rozpustnosti uhlíku v tuhém roztoku se uhlík vylučuje jako samostatná fáze a při nízkém obsahu vytváří metastabilní intersticiální sloučeninu Fe₃C. V důsledku neúplné stability této sloučeniny může dojít k jejímu rozpadu na železo a stabilní grafit. Podle formy, v jaké se vyskytuje uhlík, existují tedy dva typy soustav:

- a) metastabilní soustava Fe – Fe₃C popisuje tuhnutí a chladnutí zejména ocelí
- b) stabilní soustava Fe – C popisuje tuhnutí a chladnutí litin a surového železa (**obr. 2.1**)[1]



Obr. 2. 1: Rovnovázný diagram soustavy železo – uhlík [1]

Slitině železa a uhlíku o obsahu maximálně 2,14 % se říká ocel. V oceli se vyskytují i další prvky, které mohou pocházet z vsázky, případně se záměrně přidávají v průběhu výroby. V širokých mezích lze vlastnosti oceli měnit:

- chemickým složením
- tepelným zpracováním
- způsobem tváření

2.3 Železo, uhlík a další prvky

Prvky, které se dostanou do oceli, příp. litiny, během výroby z rud, vyzdívky a atmosféry, jsou označovány jako doprovodné. Dalšími záměrně přidávanými přísadovými prvky jsou prvky legující. Koncentrace těchto prvků ovlivňuje vlastnosti slitin železa. Doprovodné prvky, které ovlivňují u nelegovaných ocelí a litin významně jejich vlastnosti, jsou mangan, křemík, fosfor, síra, kyslík, dusík, vodík. Dále se tyto prvky mohou dělit na škodlivé nebo prospěšné. Obecně škodlivými prvky jsou síra, fosfor, dusík a kyslík, ale nemusí tomu tak být ve všech případech. Mezi prospěšné prvky se řadí mangan, křemík, chrom a hliník, to však opět neplatí ve všech případech.

3 Přehled a použití ocelí [1]

3.1 Konstrukční oceli

3.1.1 Nelegované oceli obvyklých jakostí

Oceli této jakosti se používají pro výrobu plochých výrobků ohýbaných za studena - přesněji řečeno jde o plechy a pásy z měkké oceli určené pro tváření za studena, resp. oceli, na něž nejsou kladeny vysoké nároky na vlastnosti a které nemají zaručenou houževnatost a svařitelnost. Do této skupiny nepatří plechy pro hluboký tah.

3.1.2 Oceli jakostní a ušlechtilé

Tato skupina ocelí zahrnuje nelegované jakostní a nelegované ušlechtilé oceli jak uvádí norma ČSN EN 10020.

3.1.2.1 Oceli pro ocelové konstrukce

Nelegované jakostní oceli

Norma ČSN EN 10025+ A1 [2] jasně stanovuje minimální hodnoty meze kluzu, meze pevnosti, tažnosti a nárazové práce *KV*. Z ocelí se tvářením za studena nebo za tepla vyrábějí ploché a dlouhé výrobky.

Svařitelné jemnozrnné konstrukční oceli

Oceli se vyrábějí jako plechy, pásy nebo dlouhé výrobky válcované za tepla. Používají se pro vysoce namáhané svařované konstrukce, např. mosty, vrata plavebních komor, zásobníky, nádrže na vodu apod.

Konstrukční oceli odolné atmosférické korozi

Díky přidanému množství legujících prvků (např.: Cr, Ni, Mo, Cu, P) dokáží oceli odolávat korozi v nepříznivých atmosférických podmínkách bez použití povrchové ochrany.

3.1.2.2 Oceli pro tlakové nádoby

Oceli jsou určeny pro výrobu plochých a dlouhých výrobků používaných pro konstrukci tlakových nádob; do této skupiny lze zahrnout i oceli pro svařované láhve. Jsou předepsány zkoušky na chemické složení a mechanické vlastnosti.

Oceli pro tlakové nádoby se dělí na další podskupiny:

- svařitelné nelegované a legované oceli pro vyšší teploty
- svařitelné jemnozrnné oceli, normalizačně žíhané
- oceli legované niklem se zaručenými vlastnostmi při nízkých teplotách
- oceli pro svařované plynové láhve

3.1.3 Automatové oceli

Oceli mají vyšší obsah síry (od 0,1%), eventuálně olova pro zlepšení obrobitelnosti. Kvůli vysokému obsahu S a P se nedoporučují ke svařování. Norma rozděluje automatové oceli do tří skupin:

- oceli v tepelně nezpracovaném stavu
- oceli určené k cementování
- oceli určené k zušlechťování

3.1.4 Oceli k cementování

Oceli k cementování mají relativně nízký obsah uhlíku a jsou určeny k povrchovému nasycení uhlíkem nebo ke karbonitridaci s následným kalením. Takto upravené oceli mají houževnaté jádro a tvrdou povrchovou vrstvu. U oceli je zaručena čistota a velikost austenitického zrna. Podle chemického složení se oceli rozdělují do šesti skupin:c

- nelegované ušlechtilé
- chrómové
- chrómmanganové
- chrómmolybdenové
- chrómniklové
- chróm-molybden-niklové

3.1.5 Pružinové oceli

Pružinové oceli jsou dodávány jako oceli uklidněné ve stavu vyžíhaném na měkko, válcovaném za studena nebo zušlechtěném. Pro ocel je předepsána zkouška na nekovové vměstky a na velikost zrna.

3.1.6 Oceli k zušlechťování

Oceli jsou převážně určeny k výrobě strojních součástí, které se tepelně zpracovávají zušlechťováním nebo bainitickým izotermickým kalením, případně jsou používány ve stavu normalizovaném.

3.2 Nerezavějící oceli včetně žárovzdorných a žárovevných

3.2.1 Nerezavějící oceli

Nerezavějící oceli jsou vysoce legované, přičemž základním legujícím prvkem je chróm. Obsah chrómu v tuhém roztoku, který zajišťuje korozivzdornost, závisí jak na celkovém obsahu chrómu v oceli tak i na obsahu uhlíku, který s chrómem tvoří karbidy. Podmínkou pasivace (odolnosti proti elektrochemické korozi v oxidačním prostředí) je obsah chrómu v tuhém roztoku vyšší než 11,5%.

3.2.2 Žárovevné oceli

Žárovevné oceli mají vysokou odolnost proti oxidaci a korozi, také mají dlouhodobě stálé vlastnosti v horkých plynech. Odolnost proti oxidaci za vysokých teplot získávají oceli legováním Cr, Si, Al, Ni. Podle struktury se rozdělují na feritické, austenitické a feriticko-austenitické.

3.3 Nástrojové oceli [3]

Bakalářská práce je zaměřena na tepelné zpracování a mechanické vlastnosti nástrojových ocelí, proto je jim v následujícím textu věnována detailnější pozornost.

Nástrojové oceli se používají kromě jiného na výrobu nástrojů, které jsou určeny pro obrábění, stříhání, řezání, tváření za studena i za tepla. Patří do skupiny ocelí, na které jsou kladeny velmi vysoké nároky. Požadavky na jejich vlastnosti mohou být protichůdné (např. vysoká pevnost spojená s dostatečnou houževnatostí). U některých nástrojových ocelí je zapotřebí mít vysokou tvrdost i pevnost (např. nástroje pro drcení a mletí). U jiných nástrojových ocelí je nezbytná vysoká houževnatost a proto je nutné smířit se s nižší pevností. Na nástrojové oceli, které pracují za tepla, jsou kladeny nároky na zachování příznivých vlastností i při práci za zvýšených teplot. Pro všechny nástroje platí, že musí mít vysokou odolnost proti abrazivnímu a adheznímu opotřebení. Z hlediska struktury materiálu je důležité, aby nástrojové oceli měly minimální obsah vměstků a rovnoměrné rozložení karbidů v matici, čímž se zvýší životnost nástroje a méně pak dochází k nadměrnému praskání nástrojů při kalení a v provozu k porušování bříty vylamováním. Další důležitou vlastností hlavně u nástrojů větších nebo komplikovanějších tvarů je prokalitelnost.

Rozdělení nástrojových ocelí:

- podle druhu ochlazovacího prostředí po kalení:
 - voda
 - oleje
 - vzduch

- podle chemického složení [4]:
 - nelegované
 - nízkouhlíkové (od 0,3 až 0,6 % C)
 - středněuhlíkové (od 0,5 až 1,1 % C)
 - vysokouhlíkové (1,0 až 1,5 % C)
 - legované
 - nízkolegované (součet legujících prvků do 5%)
 - střednělegované (součet legujících prvků od 5 do 10%)
 - vysokolegované (součet legujících prvků nad 10%)

Podle [4] se dá ocel považovat za legovanou, pokud obsah legujících prvků přesáhne jistou hodnotu; podle ČSN EN 10020 jsou minimální množství legujících prvků v oceli uvedeny v **tab. 2. 1** [4].

Tab. 2. 1: Minimální množství legujících prvků v oceli [4]

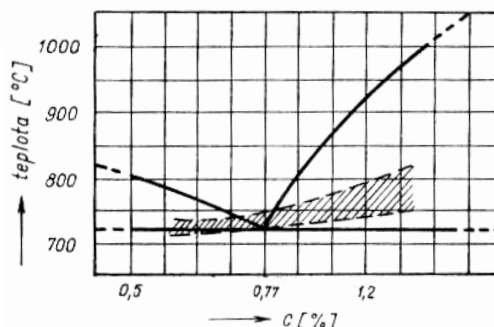
Mn	Si	Cr	W	Mo	V	Ni	Co	Al	Ti
0,9 %	0,5 %	0,3 %	0,2 %	0,1 %	0,1 %	0,5 %	0,2 %	0,1 %	0,1 %

4 Tepelné zpracování nástrojových ocelí [1], [3], [5]

Výkonnost nástroje je dána hlavně správným výběrem materiálu. Vlastnosti nástroje se dále odvíjí od jeho konstrukce, technologie výroby a v neposlední řadě zaleží na tepelném zpracování vybraného materiálu. Tepelné zpracování způsobí v oceli strukturální změny výhodné pro další zpracování (např. obrábění, tváření...) oceli a posléze pro dosažení finálních požadovaných vlastností nástroje.

4.1 Žihání

Žihání je tepelné zpracování, při kterém je materiál ohřát na žihací teplotu, následuje výdrž na této teplotě a poté pomalé ochlazení na vzduchu nebo v jiném ochlazovacím prostředí. Rozmezí žihacích teplot uhlíkových ocelí je zobrazeno na **obr. 4. 1** [5].



Obr. 4. 1: Rozmezí žihacích teplot uhlíkových ocelí [5]

4.1.1 Žihání na měkko

Účelem žihání na měkko je přeměnit lamelární perlit na globulární perlit tj. na strukturu tvořenou základní feritickou hmotou a globulárními částicemi karbidů. Tímto je dosaženo zlepšení obrobitelnosti a tvářitelnosti za studena, ale bohužel dojde zároveň ke snížení pevnosti a tvrdosti oceli.

Žihací teploty se volí obvykle těsně pod teplotou Ac_1 . U nástrojových ocelí nebo u ocelí legovaných prvky, které stabilizují cementit, se žihací teplota volí těsně nad teplotu Ac_1 .

Výdrž na žihací teplotě je dána složením oceli a velikostí předmětu.

4.1.2 Žihání na snížení pnutí

Žihání na snížení pnutí je tepelné zpracování, které slouží k odstranění vnitřního pnutí bez změny struktury získané předchozím tepelným zpracováním, mechanickým opracováním, svařováním nebo ztuhnutí odlitku ve formě.

U ocelí se žihání na snížení pnutí provádí několikahodinovou výdrží na teplotě 600 až 650°C. Ohřev i ochlazování musí být pomalé, abychom zabránili vzniku nových pnutí.

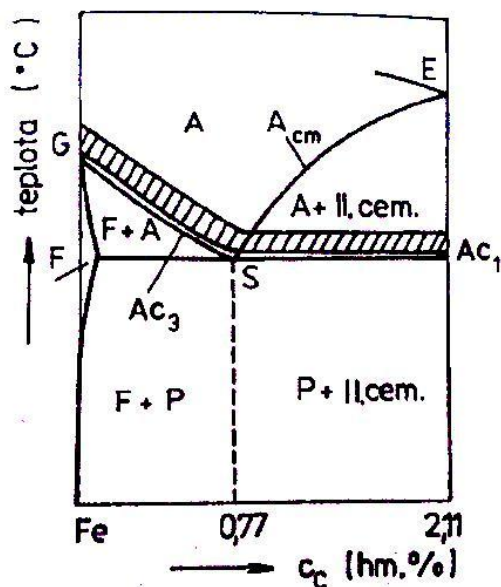
4.1.3 Žihání normalizační

Normalizační žihání se provádí za účelem zjemnění hrubého zrna nebo homogenizace struktury. Normalizačním žiháním se vytvoří jemnější a rovnoměrně velké zrno.

Provedení normalizačního žihání spočívá v ohřátí předmětu nad teplotu přeměny (Ac_3 nebo $Ac_{1,2}$), výdrží na této teplotě pro její dosažení v celém objemu a následném ochlazení na vzduchu. Výkovky, které jsou žihané naměkko, se nemusí normalizačně žíhat.

4.2 Kalení

Nejdůležitější operací při výrobě nástrojů je kalení a následné popouštění. Kalení se skládá z ohřevu na kalící teplotu, výdrže na této teplotě a ochlazení ve vhodném prostředí rychlostí vyšší než kritickou. Výška kalící teploty je důležitá pro vytvoření požadované struktury před kalením (austenit u podeutektoidních ocelí a austenit s karbidickými částicemi u nadeutektoidních ocelí); kalící teploty podeutektoidních ocelí jsou přibližně 30 ÷ 50°C nad křivkou Ac_3 , nadeutektoidní oceli se kalí z teplot 30 ÷ 50°C nad $Ac_{1,2}$ (**obr. 4. 2 [1]**).



Obr. 4. 2: Pásmo kalících teplot v diagramu Fe-Fe₃C [1]

4.2.1 Ohřev na kalící teplotu (austenitizace)

Nástroje, které jsou ohřívány na kalící teplotu, by měly být zbaveny vnitřního pnutí. Před kalením je jejich tvar vyroben prakticky na čisto, až na malé přídavky na broušení a proto by nechtěná změna tvaru po kalení vedla ke zvýšení výrobních nákladů. Z tohoto důvodu je nutné dbát na:

- způsob ohřevu (elektrická pec, solná lázeň apod.)
- umístění v peci (podložení dlouhých součástí, popřípadě jejich zavěšení)
- ochranu povrchu proti oduhličení a okujení (přepálený hutní koks, ochranný nátěr, ochranná atmosféra, ohřev ve vakuové peci)
- rychlost ohřevu, resp. počet předeheřvů
- vhodné ochlazovací prostředí

Ohřev na kalící teplotu by měl probíhat pozvolna a rovnoměrně. Při prudkém ohřevu může dojít k deformaci tvaru i vzniku trhlin. Z těchto důvodů se provádí především u ocelí s horší tepelnou vodivostí způsobenou vysokým legováním stupňovité ohřívání na kalící teplotu.

Výšky kalících teplot jsou pro každou ocel specifické a dané chemickým složením. Podeutektoidní oceli se kalí z teplot 30 ÷ 80°C nad teplotou Ac₃. Nadeutektoidní oceli mají kalící teplotu 30 ÷ 80°C nad teplotou Ac_{1,2}. Oceli s vysokými obsahy karbidotvorných prvků, jako např. chromové ledeburitické oceli, a zejména pak oceli rychlořezné mají podle druhu oceli kalící teplotu 1000 ÷ 1250°C, aby se dosáhlo potřebného nasycení austenitu uhlíkem a karbidotvornými prvky. Doba potřebná pro ohřátí materiálu na kalící teplotu se odvíjí od průřezu materiálu, prostředí, ve kterém je nástroj ohříván, a od výšky předeheřvací a kalící teploty. K určení správné doby ohřevu se používají různé diagramy nebo tabulky závislosti

doby ohřevu na průřezu. Nastavení optimální doby ohřevu celého průřezu materiálu je ovlivněno i zkušeností pracovníka.

Při dosažení kalicí teploty je nutné na ní setrvat pouze nezbytně dlouhou dobu. Pokud by doba výdrže byla příliš dlouhá, hrozí v materiálu nežádoucí zhrubnutí zrna.

4.2.2 Ochlazování

Nástroj ohřátý na kalicí teplotu se ochlazuje nadkritickou rychlostí ve vhodném ochlazovacím prostředí (vzduchu, v oleji, solné lázni, ve vodě apod.). Ochlazovací prostředí je vybráno na základě chemického složení dané oceli, její prokalitelnosti, resp. diagramu anizotermického rozpadu austenitu. Dalšími kritérii volby ochlazovacího prostředí jsou rozměry a možné výrazné tvarové změny nástroje.

Ochlazovací rychlost by neměla být vyšší než je bezpodmínečně nutné, neboť by mohlo dojít k nadměrným deformacím, velkému vnitřnímu pnutí, popřípadě vyvolání kalících trhlin.

Při ochlazování je důležité zachovat dokonalý styk nástroje s kalícím prostředím. Děje se tak za pomoci cirkulace ochlazovacího prostředí nebo pohybem nástroje.

Výsledkem ochlazování nadkritickou rychlostí je vytvoření struktury tetragonálního martenzitu s určitým podílem zbytkového austenitu.

4.3 Popouštění

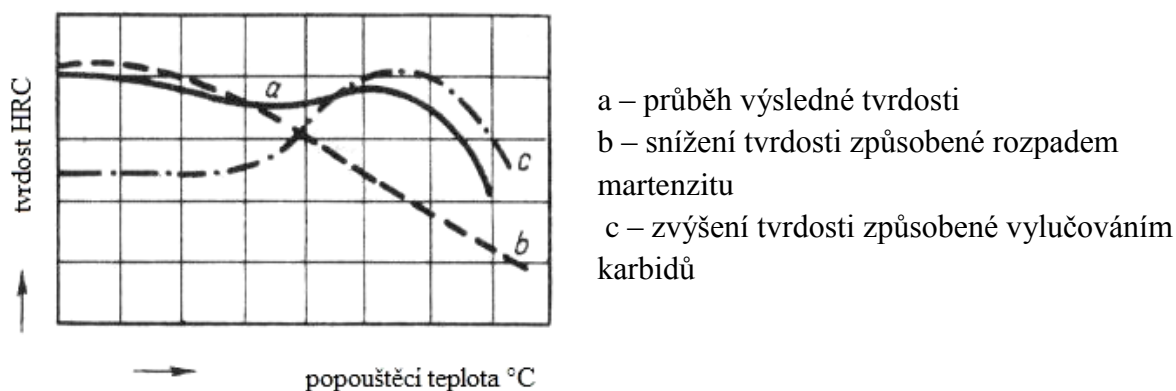
Popouštěním se získávají konečné vlastnosti materiálu nástroje. Nástroje (kromě rychlořezných ocelí) jsou po kalení křehké a náchylné k praskání, proto se okamžitě po ochlazení z kalicí teploty popouští. Podle požadované tvrdosti, pevnosti, houževnatosti, únavové pevnosti nástroje apod. je volena i výše popouštěcích teplot.

Výška popouštěcí teploty má rozhodující vliv na rozsah strukturních změn a souvisejících změn mechanických vlastností. Rozlišuje se popouštění při nízkých teplotách na tzv. primární tvrdost (primární režim) a při vyšších teplotách na tvrdost sekundární (sekundární režim).

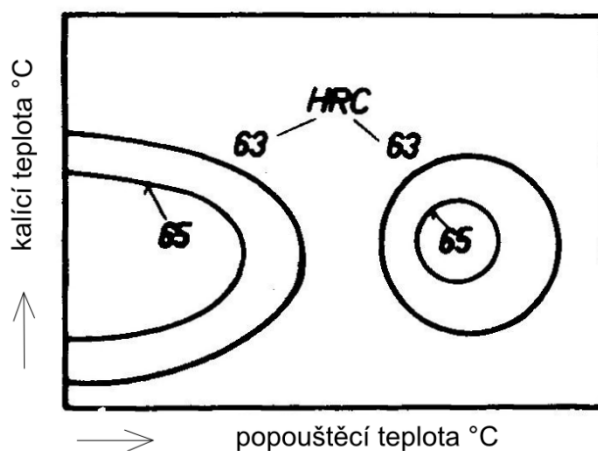
V případě popouštění na primární tvrdost ohřejeme zakalený nástroj na teplotu $150 \div 300^\circ\text{C}$. Do teplot 200°C dochází k přeměně tetragonálního martenzitu na kubický martenzit a nerovnovážený karbid ϵ ($\text{Fe}_{2,4}\text{C}$) s těsně uspořádanou hexagonální mřížkou, který se v průběhu procesu popouštění vyvine do karbidu Fe_3C s mřížkou orthorombickou. Tento proces má za následek pouze mírný pokles tvrdosti. Při ohřevu mezi teplotami $200 \div 300^\circ\text{C}$ se zbytkový austenit rozpadá. Přeměna je doprovázena růstem měrného objemu, uvolněním tepla a snížením úrovně vnitřního pnutí. Důsledkem rozpadu zbytkového austenitu je buď zmenšení poklesu tvrdosti oceli, nebo její vzrůst, to však jen v případě jeho vysokého obsahu. Primární tvrdost materiálu je tedy dána hlavně tvrdostí kubického martenzitu a transformovaného zbytkového austenitu.

Při popouštění na sekundární tvrdost je materiál ohříván na teplotu $500 \div 650^{\circ}\text{C}$, přičemž ve struktuře dochází k precipitaci speciálních karbidů.

Výsledná tvrdost nástroje je výrazně ovlivněna výší kalicí i popouštěcí teploty. Tuto závislost popisují popouštěcí křivky (**obr. 4. 3 [5]**) anebo vrstevnicové diagramy (**obr. 4. 4 [5]**), v nichž čáry spojují místa stejné tvrdosti dosažené různými kombinacemi popouštěcích a kalicích teplot.



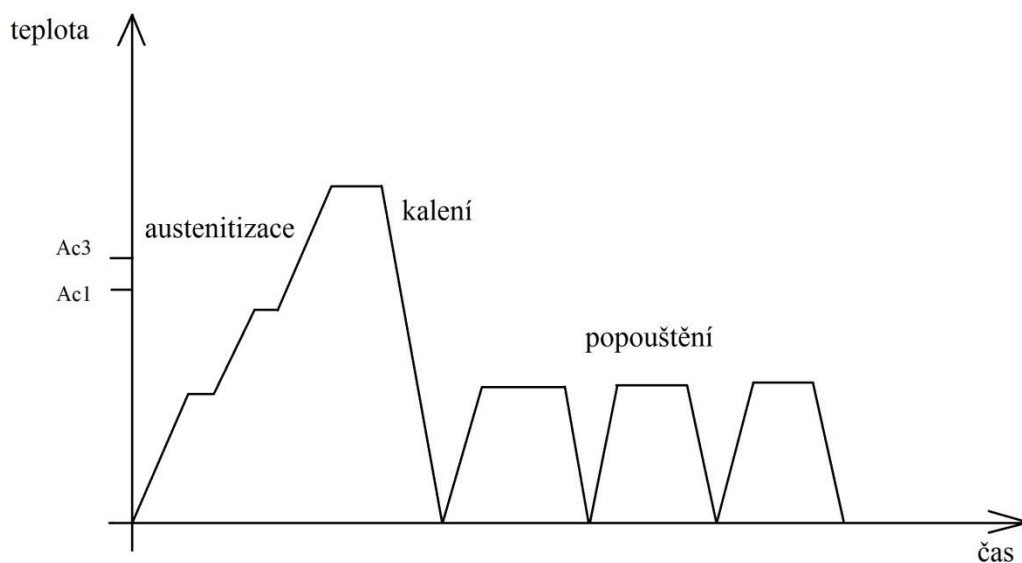
Obr. 4. 3: Změna tvrdosti při popouštění nástrojové oceli s vyšším obsahem karbidotvorných prvků [5]



Obr. 4. 4: Vrstevnicový diagram [5]

4.4 Tepelné zpracování rychlořezných ocelí.

Speciálním případem je tepelné zpracování rychlořezných ocelí. Ohřev by měl být pozvolný a stupňovitý, prodleva na kalicí teplotě by měla být dostatečná pro prohřátí v celém objemu nástroje, je však třeba dávat pozor na hrubnutí zrna (**obr. 4. 5 [6]**). Po kalení zůstává ve struktuře vysoký obsah zbytkového austenitu, proto je následnou operací několikanásobné popouštění, při kterém se sníží podíl zbytkového austenitu.



Obr. 4. 5: Průběh tepelného zpracování nástrojových ocelí [6]

5 Metalografie [7]

Pro zobrazení struktury materiálu po tepelném zpracování je potřeba nejdříve vyrobit metalografický vzorek. Postup přípravy metalografického vzorku je následující:

- Volba místa – jde o místo, odkud bude odebrán vzorek, tak aby vystihl charakter struktury zkoumané součásti. Většinou se odebírá více vzorků, např. ve směru kolmém i rovnoběžném ke směru tváření.
- Odběr vzorku – musí se dbát na minimální tepelné a mechanické ovlivnění struktury.
- Preparace vzorku – zalévání za studena nebo zalisování za tepla z důvodu uchycení vzorku při broušení a leštění.
- Značení vzorku – určí se poloha plochy výbrusu vůči předmětu, na kterém se provádí metalografický rozbor.
- Broušení – provádí se brusnými papíry.
- Leštění – provádí se diamantovými pastami, chemicky nebo elektrolyticky.
- Vyvolání struktury – chemickým, elektrochemickým nebo tepelným naleptáním; jedná se o nejcitlivější operaci při přípravě metalografického vzorku.

Metalografické vzorky jsou pozorovány pod mikroskopy optickými (osvětlení vzorku pomocí normálního světla, maximální zvětšení přibližně 5000x) nebo elektronovými (obraz tvořen pomocí svazku urychlených elektronů).

6 Mechanické zkoušení kovů [7], [8]

Principem zkoušení mechanických vlastností materiálu je působení vnějších mechanických sil na zkoušený materiál a následné vyhodnocení s kvantitativním vyjádřením zkoušených vlastností. Výsledek zkoušky vyjadřuje chování materiálu při zkoušce a představuje vlastnost materiálu. Odezva materiálu na působení vnějších sil je závislá na několika faktorech, kterými jsou:

- způsob a úroveň zatížení (vnější síly působící na jednu nebo více ploch ohraničujících zkušební těleso)
- tvar a rozměry zkušebního tělesa vyrobeného ze zkoušeného materiálu
- materiál zkušebního tělesa definovaný chemickým složením a fyzikálním stavem struktury
- ostatní podmínky zkoušky (např. teplota, při níž zkouška probíhá, nebo prostředí, ve kterém se odehrává samotná zkouška)

Zkoušky mechanických vlastností můžeme rozdělit podle účinku zatížení na zkušební těleso a to tak že:

- pokud nedojde k trvalým změnám např. tvaru, rozměrů, pak jsou to nedestruktivní zkoušky
- jestliže se zkušební těleso deformuje nebo poruší, mluvíme o destruktivních zkouškách, které se dále dělí podle **tab. 6.1** [9]

Tab. 6.1: Rozdělení destruktivních zkoušek [9]

Zatížení	Krátkodobé	Dlouhodobé
Statické	<ul style="list-style-type: none">• zkouška tahem• tlakem• ohybem• krutem• stříhem• zkoušky tvrdosti	<ul style="list-style-type: none">• zkouška tečení (creepu)
Dynamické	<ul style="list-style-type: none">• zkoušky tvrdosti• zkouška rázem v ohybu• zkoušky nízkocyklové únavy	<ul style="list-style-type: none">• zkoušky vysokocyklové únavy

Mechanické zkoušky kovů jsou většinou normalizované. Normy stanovují postup zkoušky a podmínky při zkoušce (např. teplotu, rychlost zatěžování, rozměry vzorku, jakost povrchu). Normování mechanických zkoušek kovů zaručuje reprodukovatelnost zkoušky. Znamená to, že výsledky dané zkoušky získané stejným postupem v odlišných laboratořích se dají porovnávat.

6.1 Zkouška tahem

Při zkoušce tahem je zkušební těleso namáháno jednoosým tahem až do přetržení. Cílem je zjistit napěťové a deformační charakteristiky zkoušeného materiálu:

- modul pružnosti
- mez kluzu
- mez pevnosti
- tažnost
- kontrakce

V průběhu zkoušky je registrována síla, způsobující prodloužení zkušební vzorku. Závislost síly na prodloužení je pak znázorněna tahovým diagramem. Tahový diagram charakterizuje průběh odporu zkoušeného materiálu proti deformaci a porušení. Diagramy mohou být zobrazeny v různých formách, nejčastěji jsou v souřadnicích $\mathbf{F}-\Delta\mathbf{L}$ (síla a prodloužení) nebo $\mathbf{R}-\varepsilon$ (smluvní napětí a smluvní poměrná deformace). Celá zkouška je popsána v normě ČSN EN 10002 [10]. Podle dané normy je zjišťován tzv. smluvní tahový diagram, přičemž obsahem smlouvy jsou vztahy pro výpočet smluvního napětí a smluvní poměrné deformace. Obě charakteristiky se získají z hodnot naměřených během zkoušky v závislosti na původních rozměrech zkušební tělesa.

Smluvní napětí:
$$R = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]}$$

Smluvní poměrná deformace:
$$\varepsilon = 100 \cdot \frac{(L_u - L_0)}{L_0} \text{ [%]}$$

kde S_0 je počáteční plocha příčného průřezu zkoušené délky

L_0 je počáteční měřená délka

F měřená síla

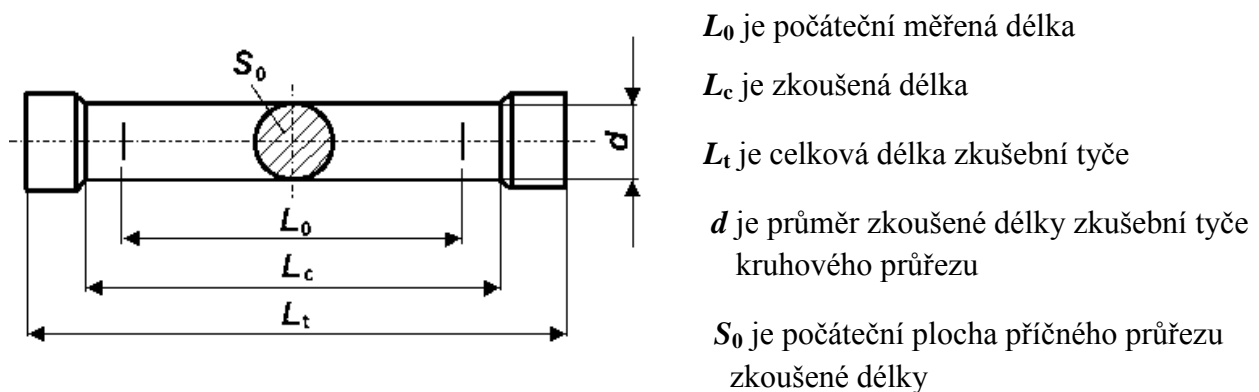
L_u délka zkušební tělesa po přetržení

6.1.1 Druhy zkušebních tyčí

Zkušební tyče se rozdělují podle:

- tvaru průřezu na tyče kruhové nebo ploché, vyrobené z plechů nebo pásů
- tvaru upínacích hlav – s osazenými hlavami, s hladkými válcovými hlavami a se závitovými hlavami
- podle poměru $k = L_0/\sqrt{S_0}$ (L_0 je počáteční měřená délka zkušební tyče, S_0 je počáteční plocha příčného průřezu zkoušené délky) na tyče poměrné, u nichž $k = 5,65$ (přednostně), resp. $k = 11,3$, a tyče s jiným poměrem k - ty jsou označovány jako nepoměrné. Poměr počátečních rozměrů tyče má vliv na hodnotu tažnosti.

Nejčastěji používaným tělesem na zkoušku tahem je hladká zkušební tyč kruhového průřezu s hladkými nebo závitovými hlavami. Rozměry tyče jsou dány příslušnou normou, přičemž základní rozměr je počáteční měřená délka L_0 a počáteční plocha příčného průřezu zkoušené délky S_0 . Zkušební tyč má dvě upínací hlavy a mezi nimi válcovou zkoušenou část, na které se vyhodnocuje deformace. Tvar takové tyče je uveden na **obr. 6. 1** [11].



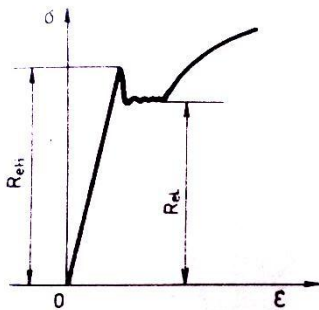
Obr. 6. 1: Základní rozměry zkušební tyče pro zkoušku tahem [11]

6.1.2 Mez kluzu

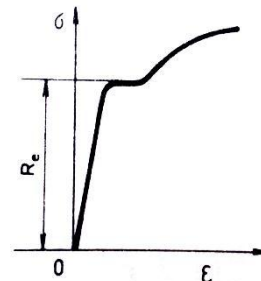
Charakterizuje přechod mezi elastickou a elasticko-plastickou oblastí zatěžovací křivky. Fyzikálně se mez kluzu charakterizuje jako nejmenší napětí, při kterém začíná plastická deformace. Značí se R_e a vypočítá se ze vztahu:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

U některých slitin kovů s malým množstvím přísad vzniká výrazná mez kluzu projevující se přechodovým jevem znázorněným na **obr. 6. 2 [8]** a **obr. 6. 3 [8]**. Po dosažení určitého napětí – horní mez kluzu R_{eH} , dojde k náhlému poklesu napětí na dolní mez kluzu R_{eL} , od které se zkušební těleso dále deformuje při stálém nebo mírně kmitajícím napětí.

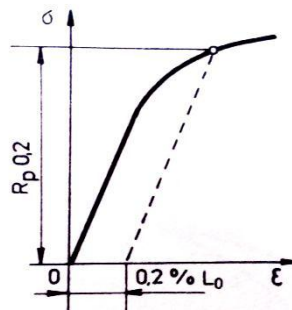


Obr. 6. 2: Přechodový jev zatížení u výrazné meze kluzu [8]



Obr. 6. 3: Výrazná mez kluzu R_e [8]

Nevýrazná mez kluzu je charakteristická plynulým přechodem z elastické do elasticko-plastické oblasti deformace. Na zatěžující křivce se neprojevuje žádný nesouvislý, průběh a proto se mez kluzu musí vyjádřit jako smluvní mez kluzu, tj. jako napětí způsobující první plastické deformace dané velikosti, nejčastěji 0,2% původní délky L_0 . Zjišťuje se měřením deformace pomocí průtahoměru nebo rovnou z přesného záznamu tahového diagramu **obr. 6. 4 [8]**.



Obr. 6. 4: Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ určená z trvalé deformace pod zatížením [8]

6.1.3 Mez pevnosti

Mez pevnosti se značí R_m a je definována jako smluvní napětí odpovídající maximálnímu zatížení během zkoušky. Hodnota R_m je důležitou materiálovou charakteristikou, podle které se porovnávají materiály. Pro konstrukční výpočty je však méně vhodná. Hodnota meze pevnosti R_m se vypočítá ze vztahu:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

kde F_m je maximální síla

S_0 je původní průřez zkušební tyče

6.1.4 Tažnost

Tažnost A patří mezi deformační charakteristiky materiálu zjišťované při zkoušce tahem a je definována jako poměrné podélné trvalé prodloužení zkušební tyče po přetržení zkušební tyče. Udává se v procentech a vypočítá se ze vztahu:

$$A = \frac{(L_u - L_0)}{L_0} \cdot 100 [\%]$$

kde L_0 je počáteční měřená délka

L_u délka zkušebního tělesa po přetržení

6.1.3 Kontrakce

Značí se Z a je druhou deformační charakteristikou materiálu zjišťovanou při zkoušce tahem. Je definována jako největší poměrné trvalé zúžení průřezu zkušební tyče změřené po jejím přetržení v místě lomu, udává se také v procentech a je dána vztahem:

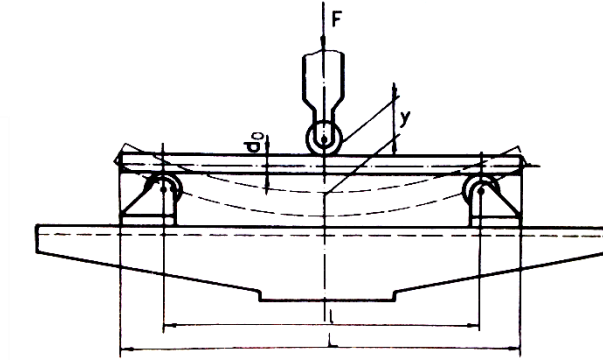
$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 [\%]$$

Kde S_0 je původní průřez zkušební tyče

S_u je plocha nejmenšího průřezu zkušební tyče po přetržení v místě lomu

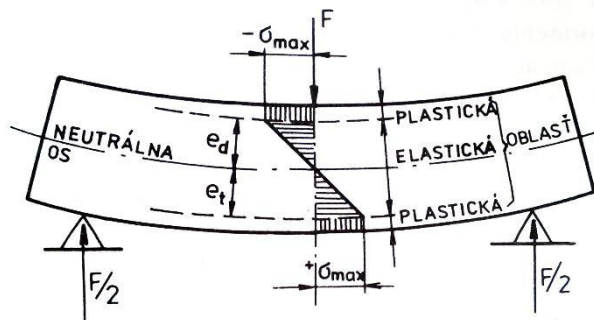
6.2 Zkouška statickým ohybem

Schéma zkoušky je uvedeno na **obr. 6. 7 [8]**. Obvykle se provádí na univerzálních trhacích strojích, které jsou pro tento účel vybavené potřebnými přípravky.



Obr. 6. 7: Schéma zkoušky ohybem [8]

Namáhání ohybem vzniká v průřezu tělesa zatíženého dvojicí příčných sil působících v rovině procházející podélnou osou tělesa. Ohyb je kombinací tahového a tlakového namáhání; ohybový moment M_o vyvolává v polovině průřezu tah a v druhé polovině tlak. Mezi těmito dvěma oblastmi namáhání je neutrální vrstva, kde se napětí rovná nule, jak je to znázorněno na **obr. 6. 5 [8]**. Neutrální osa je totožná s geometrickou osou u materiálů, které mají stejný modul pružnosti v tahu i v tlaku. Pokud tomu tak není, neutrální osa se posouvá na tužší stranu. Jakmile napětí v povrchových vrstvách dosáhne meze kluzu, dojde k plastické deformaci povrchu. K porušení dochází na straně tahových deformací.



Obr. 6. 5: Průběh napětí a deformací v průřezu ohýbaného tělesa [8]

Při zkoušce je zjišťováno ohybové napětí σ_o dané vztahem:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W}$$

kde M_o je moment ohybu

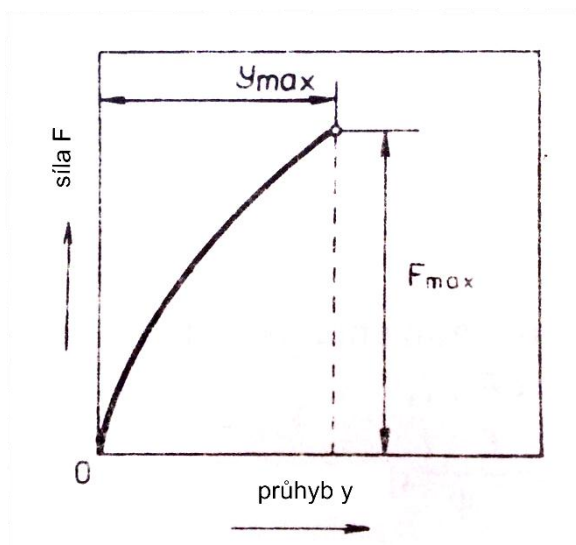
W je modul průřezu

Výsledkem zkoušky v ohybu je určení pevnosti v ohybu, která je definována jako největší ohybové napětí ve zkušební tyči při porušení a dána vztahem:

$$R_{Po} = \frac{M_{max}}{W}$$

Maximální průhyb y_{max} je mírou houževnatosti materiálu v ohybu, a měří se v okamžiku porušení tyče.

Příklad závislosti síly na průhybu vzorku získaný během zkoušky v ohybu křehkého materiálu je uveden na **obr. 6. 6 [8]**. Křehké materiály se porušují při síle F_{max} a při maximálním průhybu y_{max} . Síla F_{max} slouží pro výpočet pevnosti v ohybu; hodnota y_{max} se udává přímo v absolutní hodnotě (mm) pro příslušné podmínky zkoušky.



Obr. 6. 6: Závislost síly na průhybu vzorku získaná při zkoušce v ohybu křehkých materiálů [8]

6.3 Zkoušky tvrdosti

Zkoušky tvrdosti patří v praxi mezi velice užívané a rozšířené nejenom kvůli tomu, že jsou jednoduché a můžeme je provádět i v případech, kdy jiné zkoušky nemohou být použity (např. zkoušení vlastností velkých a těžkých kusů přímo na místě), ale i proto, že se zkouškou poruší jen velmi malá část povrchu zkoušeného kovu.

Dalším důvodem pro široké použití zkoušek tvrdosti je fakt, že byla zjištěna velmi těsná závislost mezi hodnotami tvrdosti a jiných mechanických vlastností materiálu. Pomocí nalezených regresních vztahů lze ze změřených hodnot tvrdosti predikovat další mechanické vlastnosti – nejčastěji je tvrdost používána k odhadu meze pevnosti v tahu. Několik příkladů jak vypočítat mez pevnosti z tvrdosti je uvedeno v **tab. 6. 1 [8]**.

Tab. 6. 1: Tabulka materiálů a přepočtu tvrdosti na mez pevnosti [8]

Materiál	$R_m \dots$ [Mpa]
Uhlíkové a nízkolegované oceli	$R_m = (3,4 \div 3,6) HB$
Austenitická, vyžíhaná ocel	$R_m = (3,7 \div 4,0) HB$
Cu, slitiny Cu	$R_m = (4,0 \div 5,0) HB$
Al, slitiny Al	$R_m = (3,4 \div 4,4) HB$
Ni, slitiny Ni	$R_m = (5,0 \div 5,5) HB$

Zkoušky tvrdosti je možné dělit do skupin podle:

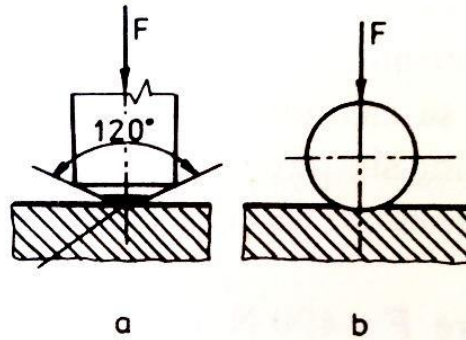
- rychlosti deformace na metody:
 - statické (Brinell, Vickers, Rockwell)
 - dynamické (Poldi kladívko, Baumannovo kladívko, Shoreho skleroskop, duroskop)
- způsobu deformace povrchu na:
 - elastické (Shoreho skleroskop, duroskop)
 - plastické (Brinell, Vickers, Rockwell, Poldi kladívko, Baumannovo kladívko)
- účelu měření tvrdosti na:
 - zkoušky makrotvrdosti (zkouší se tvrdost kovu jako celku)
 - zkoušky mikrotvrdosti (stanovuje se tvrdost jednotlivých složek struktury kovu nebo slitiny)

Každá zkušební metoda je definována dohodnutými podmínkami zkoušky. Díky tomu se naměřená hodnota tvrdosti, která je zjištěná určitou metodou může porovnávat s výsledky jiných zkoušek provedených za stejných podmínek.

V dalším textu je pozornost věnována metodě měření tvrdosti podle Rockwella, neboť je to nejčastější způsob určování tvrdosti nástrojových ocelí.

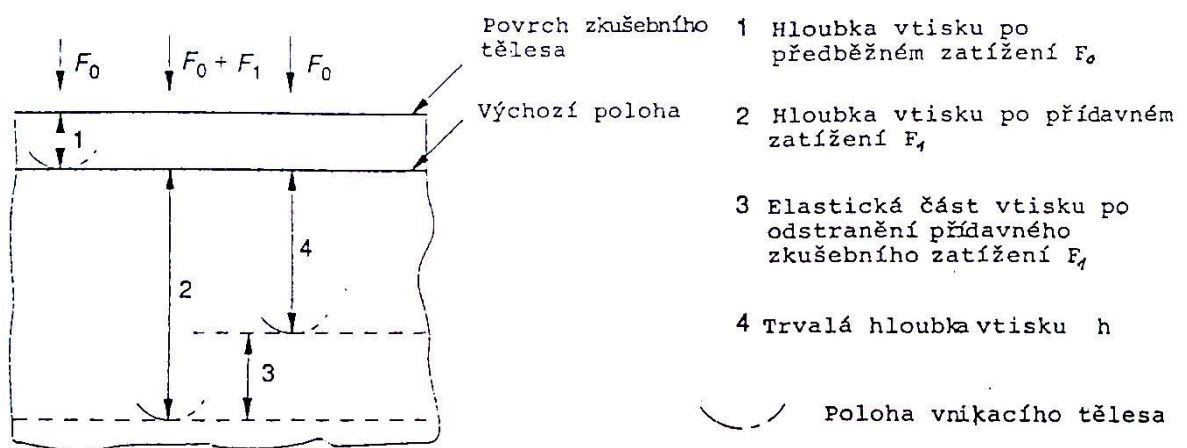
6.3.1 Tvrdość podle Rockwella

Metoda byla vyvinuta S. P. Rockwellem v roce 1922. Měří se trvalá hloubka vtisku h po odstranění přídavného zatížení. Z hodnoty h se určí tvrdość podle Rockwella. Jako zkušební hrot se používá diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° nebo ocelová kulička s průměrem $1/16'' \approx 1,59$ mm. Jak je vidět na **obr. 6. 8** [8].



Obr. 6. 8: Princip Rockwellovy metody měření tvrdości [8]

Obvykle se zkouší při okolní teplotě od 10°C do 35°C . Postup měření tvrdości je znázorněn na **obr. 6. 9** [12]. Zkušební těleso musí být uloženo na tuhé podložce a podepřeno takovým způsobem, že zkoušený povrch je v rovině kolmé k ose vnikajícího tělesa ve směru zatížení. Vnikající těleso se přivede do styku se zkoušeným povrchem a zatíží se předběžným zatížením F_0 . Měřicí zařízení se pak nastaví do počáteční polohy a zatížení se zvýší se z F_0 na F v čase ne menším než 2 s a ne větším než 8 s. Poté se přídavné zatížení F_1 odlehčí tak, aby zůstalo pouze předběžné zatížení F_0 , přičemž trvání celkového zatížení F musí být $4 \text{ s} \pm 2$ s. Po dobu zkoušky musí být zkušební přístroj chráněn před rázy a chvěním. Hodnota tvrdości podle Rockwella se stanovuje z trvalé hloubky vtisku h a obvykle se odečítá přímo na měřicím zařízení [12].



Obr. 6. 9: Postup měření tvrdości podle Rockwella [12]

Rockwellova metoda je velmi rozšířená, protože je rychlá a pohodlná. K zjištění tvrdosti není potřeba zvlášť měřit rozměry vtisku indentoru v materiálu ani následně používat tabulky pro určení tvrdosti zkoušeného materiálu.

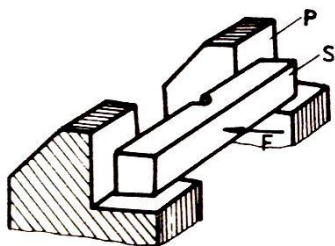
6.4 Zkouška rázem v ohybu [1], [8]

Cílem zkoušky rázem v ohybu je stanovení hodnoty práce spotřebované na zlomení zkušební tělesa při stanovených podmínkách zkoušky. Podmínkami zkoušky se myslí:

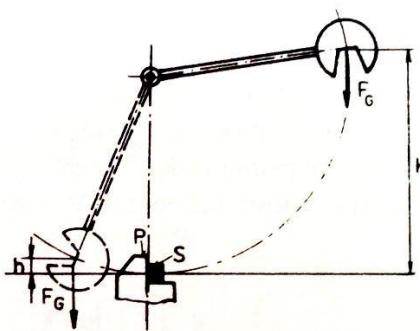
- způsob namáhání (tříbodový symetrický ohyb)
- rychlost zatěžování (nárazovou rychlostí $v = 4,5 \div 7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)
- teplota zkoušeného tělesa
- geometrický tvar a rozměry zkoušeného tělesa (obvykle je to čtyřhran s rozměry $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}$)
- tvar, hloubka a ostrost vrubu

Princip zkoušky spočívá v tom, že zkušební těleso S , které má uprostřed vrub, položíme na podpěry P a s úderem beranu kladiva v rovině, která leží v ose vrubu, dojde ke zlomení zkušební tyče (schématické znázornění je na **obr. 6. 10** [8]). Hodnotou měřenou při zkoušce je práce spotřebovaná na zlomení tělesa.

Zkušebním zařízením je Charpyho kyvadlové kladivo, jehož beran je na začátku zkoušky upnut do výšky H a po odjištění západky vlivem účinku gravitační síly F_G padá po kruhové dráze dolů, jak je to znázorněno na **obr. 6. 11** [8]. Potenciální energie získaná v nejvyšší poloze se postupně mění na kinetickou energii, která dosahuje svého maxima v dolní poloze v okamžiku nárazu kladiva na zkušební těleso.



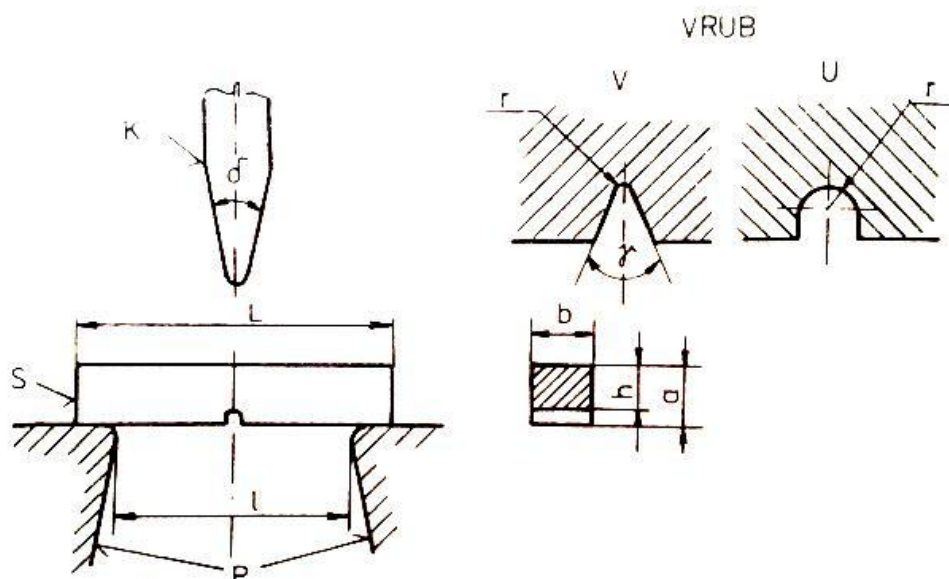
Obr. 6. 10: Princip zkoušky vrubové houževnatosti [8]



Obr. 6. 11: Princip kyvadlového kladiva [8]

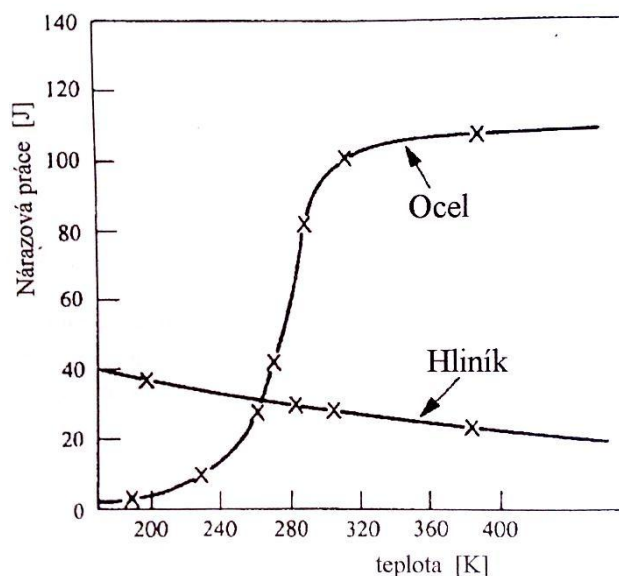
Část potenciální energie je spotřebována na deformaci a lom zkušební tělesa, zbylá energie vychýlí kyvadlo ze svislé polohy do výšky h . Práce spotřebovaná při přeražení vzorku je dána rozdílem potenciální energie na začátku a na konci zkoušky a je mírou houževnatosti zkoušeného materiálu.

Hodnota nárazové práce se výrazně liší při různých podmínkách zkoušky, a proto se musí zkušební postup řídit normami. Zkušební tělesa mají jasně dané rozměry a jsou uprostřed opatřena uměle vytvořeným vrubem tvaru U nebo V (obr. 6. 12 [8]).



Obr. 6. 12: Uspořádání zkoušky rázem v ohybu a tvar vrubů [8]

Hodnoty nárazové práce se mění s teplotou u materiálů s mřížkou fcc jen nevýrazně, zatímco u materiálů s bcc mřížkou silně. Proto jsou u těchto materiálů určovány tzv. tranzitní křivky, tj. křivky závislosti nárazové práce na teplotě (příklad je uveden na obr. 6. 13 [1]).



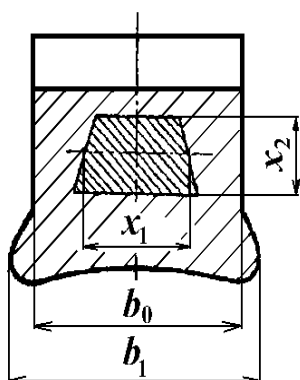
Obr. 6. 13: Teplotní závislost nárazové práce oceli a hliníku [1]

Poloha tranzitní křivky na teplotní ose je upřesněna pomocí tzv. přechodové neboli tranzitní teploty T_T charakteristické pro daný materiál. Tranzitní teplota může být určena z velikosti nárazové práce nebo ze vzhladu lomové plochy zkušební tyče po přeražení:

- tranzitní teplota 27 J (T_{27J}) je teplota, při které nárazová práce potřebná na přeražení vzorku dosáhne právě hodnoty 27 J
- tranzitní teplota 0,5 ($T_{0,5}$) je teplota, při které nárazová práce potřebná na přeražení vzorku dosáhne právě průměrné hodnoty určené vztahem:

$$KV_{0,5} = \frac{KV_{min} + KV_{max}}{2}$$

- tranzitní teplota 50 % ($T_{50\%}$) je teplota, při které procento tvárného lomu na lomové ploše dosáhne právě 50 %. Procento tvárného lomu P_L [%] zjišťujeme měřením rozměrů štěpně porušené oblasti na lomové ploše $S_{\text{š}}$ (**obr. 6.14 [13]**).



$$S_{\text{šL}} = x_1 \cdot x_2$$

$$P_{\text{šL}} = \frac{S_{\text{šL}}}{S_0} \cdot 100$$

$$P_L = 100 - P_{\text{šL}}$$

Obr. 6.14: Vyhodnocení procenta tvárného lomu P_L [13]

Vzhled lomové plochy přeraženého tělesa úzce souvisí s hodnotou nárazové práce:

- Na přeražení vzorku z houževnatého materiálu je zapotřebí velké množství nárazové práce a lomová plocha je potom tvořena tvárným lomem.
- Pokud je materiál křehký, pak lomovou plochu tvoří převážně štěpný lom.

V provozu by pracovní teplota měla být vyšší než teplota tranzitní, neboť jinak může dojít k porušení materiálu i při zatížení, které za normální teploty nezpůsobí žádné poškození.

7 Experimentální část práce

7.1 Popis experimentu

Nástrojová ocel 1.2379 je tepelně zpracována na primární tvrdost 57 ± 1 HRC a 60 ± 1 HRC a na sekundární tvrdost 57 ± 1 HRC a 60 ± 1 HRC. Úkolem je provést zkoušky mechanických vlastností, kterými jsou:

- zkouška tahem
- zkouška ohybem
- zkouška tvrdosti podle Rockwella
- zkouška rázem v ohybu

Dále se provede metalografická analýza vzorků oceli a vyhodnocení struktury. Z výsledků potom můžeme říct, zda chemické složení odpovídá předepsaným normám, mechanické vlastnosti jsou adekvátní k požadavkům na tuto ocel a tepelné zpracování se provedlo správným postupem.

7.1.1 Experimentální materiál

Předmětem zkoumání je ocel 1.2379 (X155CrVMo12-1) [3], [14], jejíž chemické složení je uvedeno v **tab. 7. 1** [14]. Jedná se o ledeburitickou chrom – vanadovou ocel s vysokou odolností proti abrazivnímu i adheznímu opotřebení. Má dobrou houževnatost, výbornou prokalitelnost (kalení může probíhat na vzduchu) a rozměrovou stálost, je vhodná k nitridaci, velice těžce se brousí a nesnadno obrábí, obtížné je i tváření za tepla.

Tato ocel je používána pro výrobu:

- nástrojů pro stříhání za studena – nože tabulových nůžek, kruhové nůžky, nože na stříhání drátů apod.
- nástrojů pro tváření za studena – nástroje k protlačování a tlačení i při vysokých tlacích, tvarovací lisovadla, tažidla, průvlaky, nástroje ke tváření závitů atd.
- řezné nástroje – nástroje k obrábění materiálů nízké pevnosti, dřeva a ostatních nekovových materiálů.
- formy – velmi namáhané formy a jejich části pro tváření plastů, formy na lisování prášků, na sklo, porcelán a keramické materiály.

Tab. 7. 1: Chemické složení oceli 1.2379 [14]

C	Mn	Si	Cr	Mo	V
1,53 %	0,4 %	0,35 %	12 %	0,85 %	0,85 %

7.1.2 Zkoušené vzorky

Ze zkoumané oceli 1.2379 byly vyrobeny vzorky pro metalografickou analýzu a dále pro zkoušku tahem a zkoušku rázem v ohybu. Vzorky byly rozděleny do 4 skupin a podrobeny čtyřem typům tepelného zpracování, které sestávalo z kalení a následného popuštění na primární nebo sekundární tvrdost, jak je uvedeno v **tab. 7. 2**.

Tab. 7. 2: Přehled tepelného zpracování a označení experimentálního materiálu

Číslo skupiny	Teplota kalení [°C]	Teploty popouštění [°C]			Předpokládaná tvrdost po tepelném zpracování
1	1020	200	-	-	primární HRC = 57±1
2	1015	200	-	-	primární HRC = 60±1
3	1060	520	510	535	sekundární HRC = 57±1
4	1060	510	510	-	sekundární HRC = 60±1

7.2 Experimentální metody zkoušení

7.2.1 Metalografická analýza

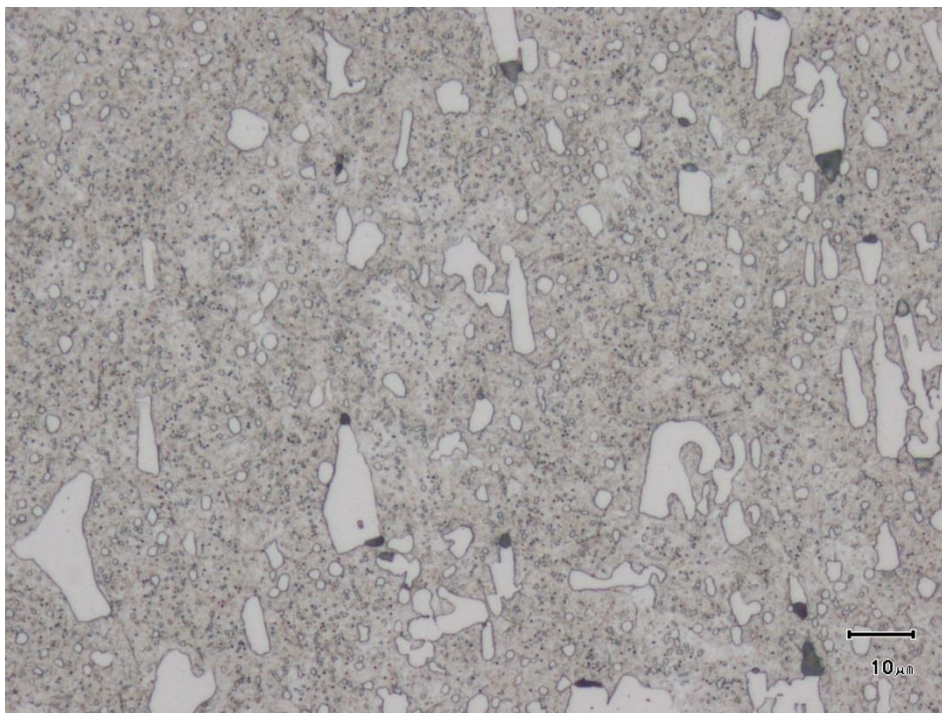
Vzorky pro metalografickou analýzu byly připraveny následujícím způsobem:

- broušeny na ruční metalografické brusce brusným papírem nejprve 220 μm , dále 500 μm a 800 μm
- leštěny na metalografické leštičce pastou 3 μm a dále 1 μm
- naleptány leptadlem Vilella Bain

Pozorování struktury bylo prostřednictvím mikroskopu Olympus 6X71 a fotky byly pořizovány pomocí stereo lupy Olympus U-CMAD3. U každé skupiny byly nafoceny série fotek při zvětšení 500x a 1000x.

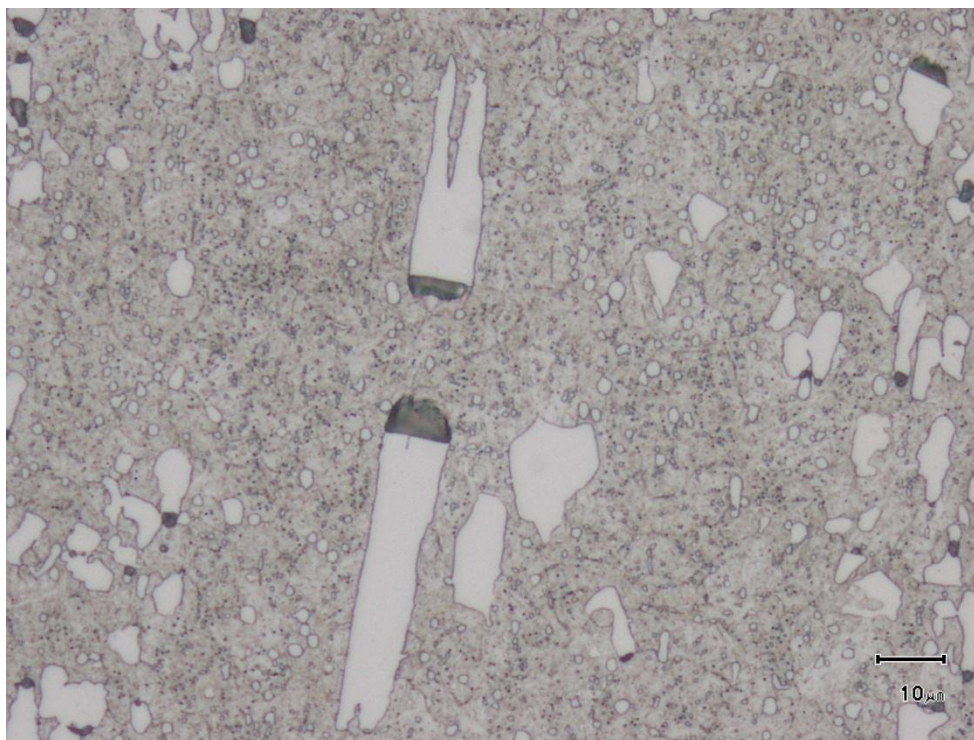
Vybrané snímky struktur jsou uvedeny na **obrázcích 7. 1 až 7. 4**.

Na **obrázku 7. 1** je zobrazena struktura vzorku skupiny 1, kaleného z teploty 1020°C a 1x popuštěného z teploty 200°C. Dosažená tvrdost měla být 57 ± 1 HRC.



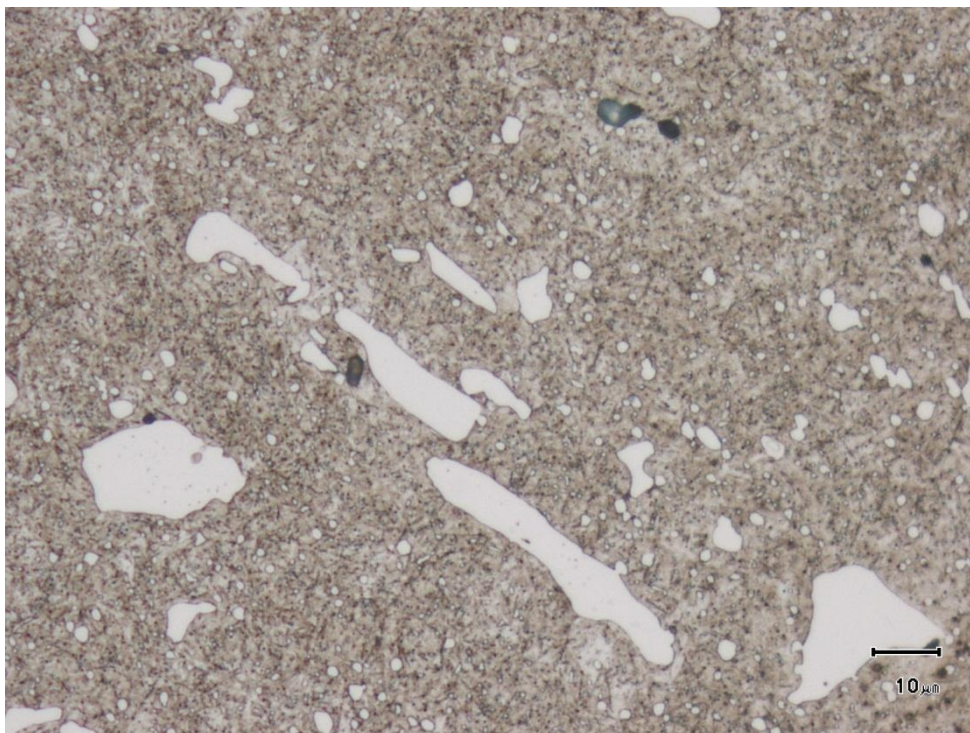
Obr. 7. 1: Struktura vzorku skupiny 1

Na **obrázku 7. 2** je zobrazena struktura vzorku skupiny 2, kaleného z teploty 1015°C a 1x popuštěného z teploty 200°C. Dosažená tvrdost měla být 60 ± 1 HRC.



Obr. 7. 2: Struktura vzorku skupiny 2

Na **obrázku 7. 3** je zobrazena struktura vzorku skupiny 3, kaleného z teploty 1060°C a popuštěného z teplot 520°C, 510°C, 535°C. Dosažená tvrdost měla být 57 ± 1 HRC.



Obr. 7. 3: Struktura vzorku skupiny 3

Na **obrázku 7. 4** je zobrazena struktura vzorku skupiny 4, kaleného z teploty 1060°C a popuštěného 2x z teploty 510°C. Dosažená tvrdost měla být 60 ± 1 HRC.



Obr. 7. 4: Struktura vzorku skupiny 4

7.2.2 Vyhodnocení metalografické analýzy

Můžeme si všimnout, že při tepelném zpracování na primární tvrdost jsou ve struktuře přítomny hrubé eutektické karbidy v martenzitických jehlicích (**obr. 7. 2**), zatímco při tepelném zpracování na sekundární tvrdost vznikají kromě relativně hrubých eutektických karbidů i jemnější karbidy legujících prvků uložené v základní martenzitické struktuře a po hranicích původních austenitických zrn (**obr. 7. 4**).

U struktur skupiny 1 a 2 tepelně zpracovaných na primární tvrdost (**obr. 7. 1 a obr. 7. 2**) se vyskytují velice jemné martenzitické jehlice s poměrně velkými a nerovnoměrně rozloženými karbidy, místy uloženými v řádcích. Po tepelném zpracování na sekundární tvrdost u skupin 3 a 4 (**obr. 7. 3 a obr. 7. 4**) jsou vidět výraznější martenzitické jehlice s menšími eutektickými karbidy a malými karbidy legujících prvků rovnoměrněji rozloženými v matici i po hranicích původních austenitických zrn. Řádkovitost karbidů není patrná.

Je možno předpokládat, že poměrně velké a tvrdé karbidy zvyšují odolnost materiálu proti opotřebení, avšak jejich řádkovitost může zhoršovat mechanické vlastnosti nástrojů. Pokud budou v materiálu vyloučeny jemnější karbidy, které vyztuží matici a přitom ji moc nenaruší svým vrubovým účinkem, dá se předpokládat, že materiál bude mít při zachování tvrdosti o trochu vyšší houževnatost.

Z hlediska struktury a z ní vyplývajících předpokládaných mechanických vlastností je tedy pro účely provozního využití vhodnější materiál obsahující eutektické karbidy i drobné karbidy speciálních prvků uložené v jemné martenzitické základní matici. Uvedené požadavky nejlépe splňuje materiál zpracovaný postupem 4.

7.2.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Zkouška tvrdosti byla provedena podle normy ČSN EN 10109-1[12] na zkušebním zařízení LECO LR s kuželovým indentorem . V každé skupině vzorků bylo naměřeno 6 hodnot tvrdostí, z nichž byly vypočítány průměrné hodnoty a porovnány s předpokládanou tvrdostí materiálu dosaženu po jeho tepelném zpracování. Takto zjištěné hodnoty tvrdosti jsou uvedeny v **tab. 7. 3** a graficky znázorněny v **grafu 7. 1**.

7.2.4 Vyhodnocení zkoušek tvrdosti

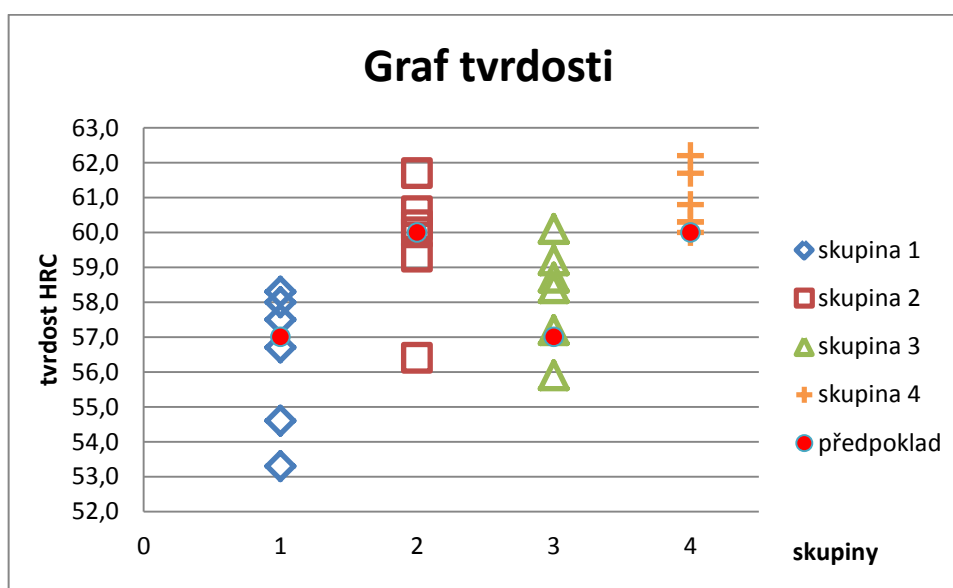
Nejvyšší hodnoty tvrdosti i nejmenší rozptyl naměřených hodnot byly zjištěny u materiálu podrobeného tepelnému zpracování typu 4. Tvrdosti ale překračují povolený interval předpokládané HRC 60 ± 1 . Materiál 2 nejlépe splňuje předpoklad tvrdosti HRC 60 ± 1 , i když rozptyl hodnot je větší. Avšak může to být způsobeno náhodností měřených veličin, která by se dala vyloučit opakováním experimentu na větším počtu vzorků. Materiály 2 a 3 mají poměrně velký rozptyl měřených hodnot; průměrná naměřená tvrdost materiálu 1 splňuje předpoklad HRC 57 ± 1 , tvrdost materiálu 3 je větší než požadovaná HRC 57 ± 1 .

Celkově se dá říci, že tepelné zpracování na nižší tvrdost (typ 1 a 3) dává horší výsledky než tepelné zpracování na tvrdost vyšší (typ 2 a 4) bez ohledu na to, jestli se jedná o tvrdost primární (typ 1 a 2) nebo sekundární (typ 3 a 4).

Pro potřeby praxe je možno doporučit tvrdost získanou tepelným zpracováním typu 2.

Tab. 7. 3: Přehled výsledků zkoušek tvrdosti

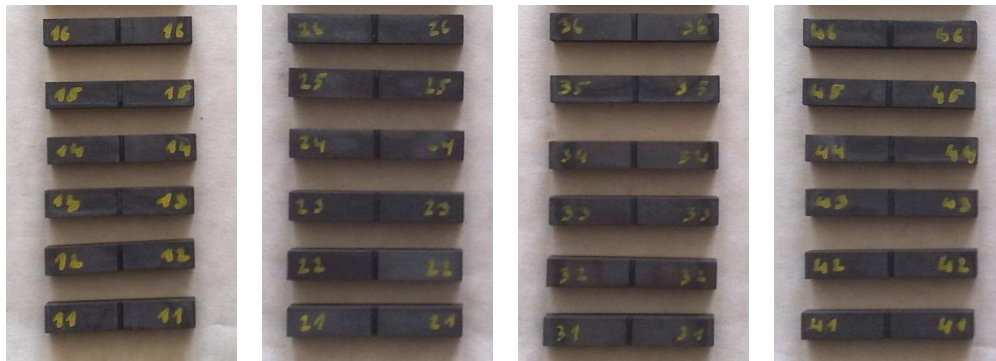
číslo skupiny	tvrdost HRC							
	1		2		3		4	
	skutečná hodnota	Δ skutečné a předp.	skutečná hodnota	Δ skutečné a předp.	skutečná hodnota	Δ skutečné a předp.	skutečná hodnota	Δ skutečné a předp.
1. vzorek	57,5	0,5	60,6	0,6	59,2	2,2	60,3	0,3
2. vzorek	58,0	1,0	59,3	-0,7	58,7	1,7	61,7	1,7
3. vzorek	54,6	-2,4	60,0	0,0	57,2	0,2	62,2	2,2
4. vzorek	58,3	1,3	61,7	1,7	60,1	3,1	60,0	0,0
5. vzorek	53,3	-3,7	60,2	0,2	55,9	-1,1	60,3	0,3
6. vzorek	56,7	-0,3	56,4	-3,6	58,4	1,4	60,8	0,8
průměr	56,4	-0,6	59,7	-0,3	58,3	1,3	60,9	0,9
předpoklad	57,0±1	-	60,0±1	-	57,0±1	-	60,0±1	-



Graf 7. 1: Grafické srovnání průměrných tvrdostí

7.2.5 Zkouška rázem v ohybu

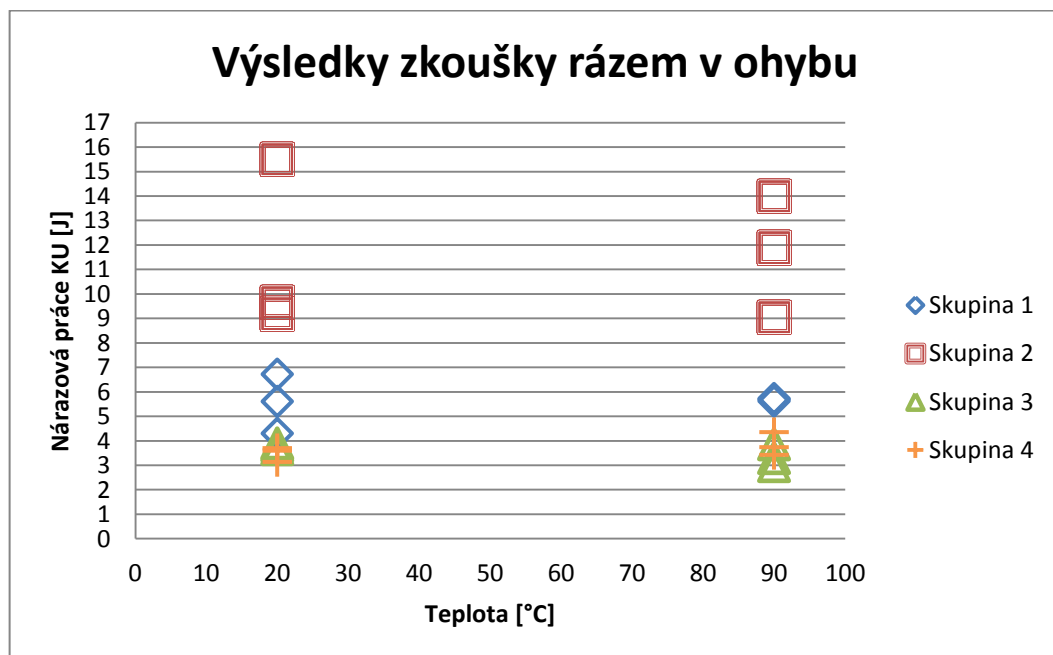
Pro zkoušku rázem v ohybu bylo v každé skupině materiálu k dispozici 6 zkušebních těles (obr. 7. 5). Zkouška byla provedena na Charpyho hydraulickém rázovém kladivu PSD 50/15 o nominální energii 50 J za teploty 20°C a 90°C. Temperování vzorků na vyšší teplotu probíhalo v horké vodě. Zkouškou byly zjištěny hodnoty nárazové práce, které jsou uvedeny v tab. 7. 4 a zakresleny do grafu 7. 2.



Obr. 7. 5: Vzorky pro zkoušku rázem v ohybu

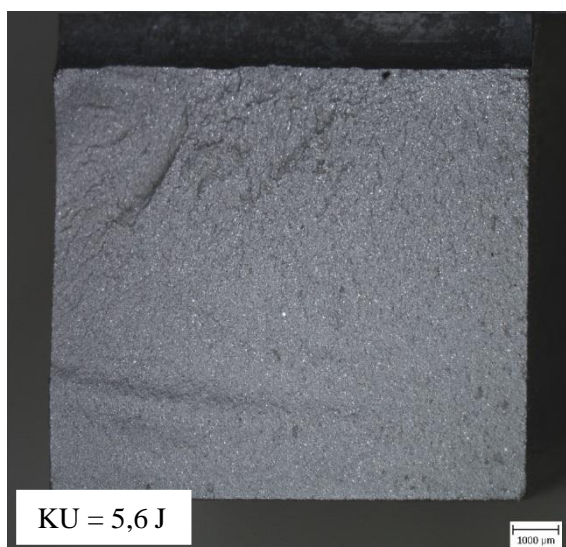
Tab. 7. 4: Přehled výsledků zkoušky rázem v ohybu

T [°C]	Skupina 1			Skupina 2			Skupina 3			Skupina 4		
	KU [J]			KU [J]			KU [J]			KU [J]		
20	4,3	5,6	6,7	9,8	15,5	9,2	3,9	3,8	3,7	3,6	3,14	3,7
90	5,7	5,7	5,6	9,1	11,9	14	3	3,9	3,3	4,4	3,7	3,4

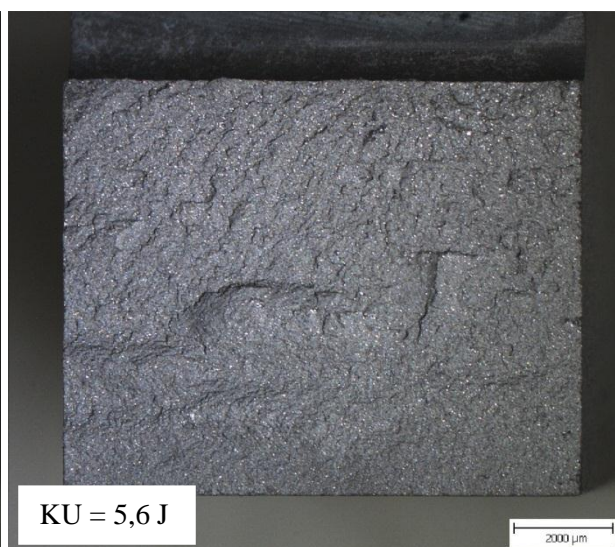


Graf 7. 2: Výsledky zkoušky rázem v ohybu

Na **obrázcích 7. 6 až 7. 13** jsou zobrazeny lomové plochy vybraných vzorků po přeražení. Jsou uvedeny i hodnoty nárazové práce potřebné na přeražení daného vzorku. Snímky byly pořízeny na stereolupě Olympus SZ61.



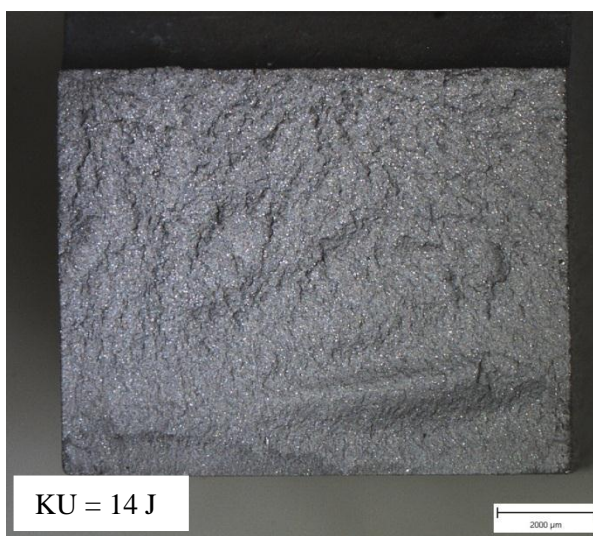
Obr. 7. 6: Lomová plocha vzorku skupiny 1 při zkušební teplotě 20 °C



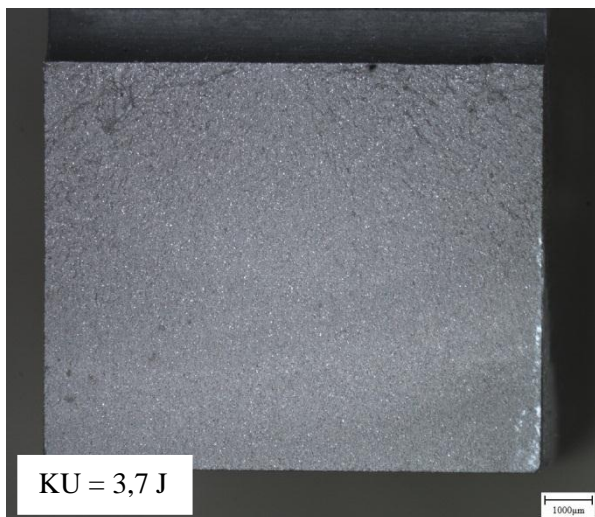
Obr. 7. 7: Lomová plocha vzorku skupiny 1 při zkušební teplotě 90 °C



Obr. 7. 8: Lomová plocha vzorku skupiny 2 při zkušební teplotě 20 °C



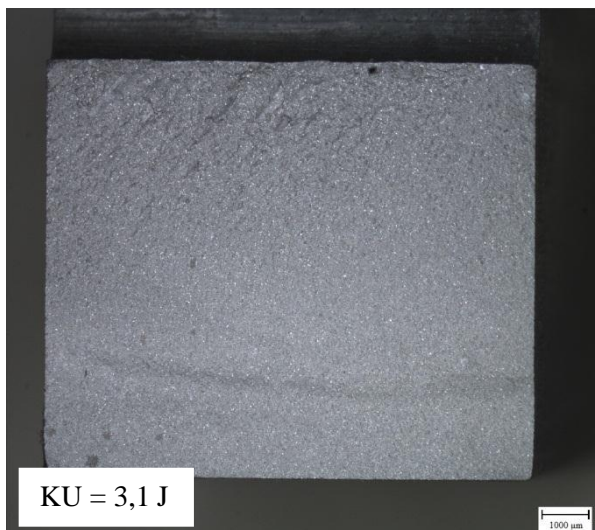
Obr. 7. 9: Lomová plocha vzorku skupiny 2 při zkušební teplotě 90 °C



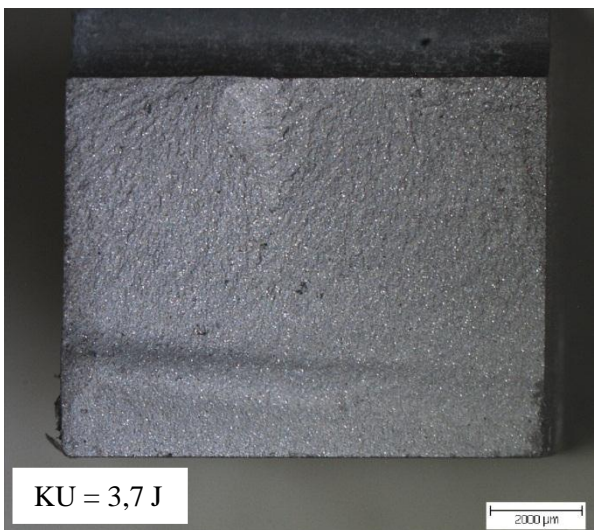
Obr. 7. 10: Lomová plocha vzorku skupiny 3 při zkušební teplotě 20 °C



Obr. 7. 11: Lomová plocha vzorku skupiny 3 při zkušební teplotě 90 °C



Obr. 7. 12: Lomová plocha vzorku skupiny 4 při zkušební teplotě 20 °C



Obr. 7. 13: Lomová plocha vzorku skupiny 4 při zkušební teplotě 90 °C

7.2.6 Porovnání výsledků zkoušky rázem v ohybu

Na základě výsledků je možné říci, že hodnoty nárazové práce u všech skupin jsou relativně nízké. U žádného ze zkoušených materiálů zvýšení zkušební teploty z 20°C na 90°C neovlivnilo velikost nárazové práce.

Nejvyšší hodnotu nárazové práce vykazují vzorky skupiny 2 a druhou nejvyšší hodnotu mají vzorky skupiny 1. Hodnoty skupin 3 a 4 se příliš neliší. Z toho je možno usoudit, že ocel, kalená a popuštěná na primární tvrdost je houževnatější než ocel, která byla kalena a popuštěna na sekundární tvrdost.

8 Závěr

V teoretické části předkládané bakalářské práce byl uveden souhrn základních informací o soustavě Fe – Fe₃C. Dále byly zmíněny možnosti ovlivňování struktury a tím i mechanických vlastností pomocí legování materiálu a jeho tepelného zpracování. Jako další byl popsán postup při určování struktury materiálu a stručný popis metod, pomocí kterých zjišťujeme základní mechanické vlastnosti.

V experimentální části byl hodnocen vliv 4 typů tepelného zpracování na strukturu a mechanické vlastnosti nástrojové oceli 1.2379. Byly vyrobeny 4 skupiny vzorků, které byly zakaleny z různě vysoké kalící teploty a poté jednostupňově popuštěny z teploty 200°C, resp. násobně z teploty 510°C až 535°C. U všech materiálů byla metalografickou analýzou zjištěna struktura a dále byly určeny hodnoty tvrdostí a nárazové práce jako míra houževnatosti zkoumaných materiálů.

Komplexním posouzením výsledků experimentů provedených na zkoumaném materiálu je možno konstatovat, že z hlediska:

- struktury je pro účely provozního využití nejvhodnější materiál obsahující eutektické karbidy i drobné karbidy speciálních prvků uložené v jemné martenzitické matici, uvedené požadavky nejlépe splňuje materiál zpracovaný postupem typu 4
- tvrdosti nejlépe vyhovuje materiál skupiny 2 splňující předpoklad tvrdosti HRC 60 ± 1, i když rozptyl hodnot je větší
- nárazové práce se jako nejvhodnější pro praxi jeví materiál skupiny 2

Zkoušená ocel se používá kromě jiného na výrobu nožů zpracovávající komunální odpad, mnohdy i velkých rozměru, tzn., že drtí nebo melou odpadní materiál. Nástroje takto provozně zatížené potřebují mít vysokou tvrdost a ořezuvzdornost při zachování přiměřené houževnatosti.

Na základě výsledků experimentů je možno vyslovit závěr, že předpokládanému provoznímu zatížení nejlépe vyhoví nástroje vyrobené ze zkoumaného materiálu 1.2379 zakaleného z teploty 1015°C a popuštěného 1x z teploty 200°C, s průměrnou tvrdostí 59,7 HRC a nárazovou prací až 15,5 J, tedy materiál označený pro účely této práce jako materiál skupiny 2.

Seznam použité literatury

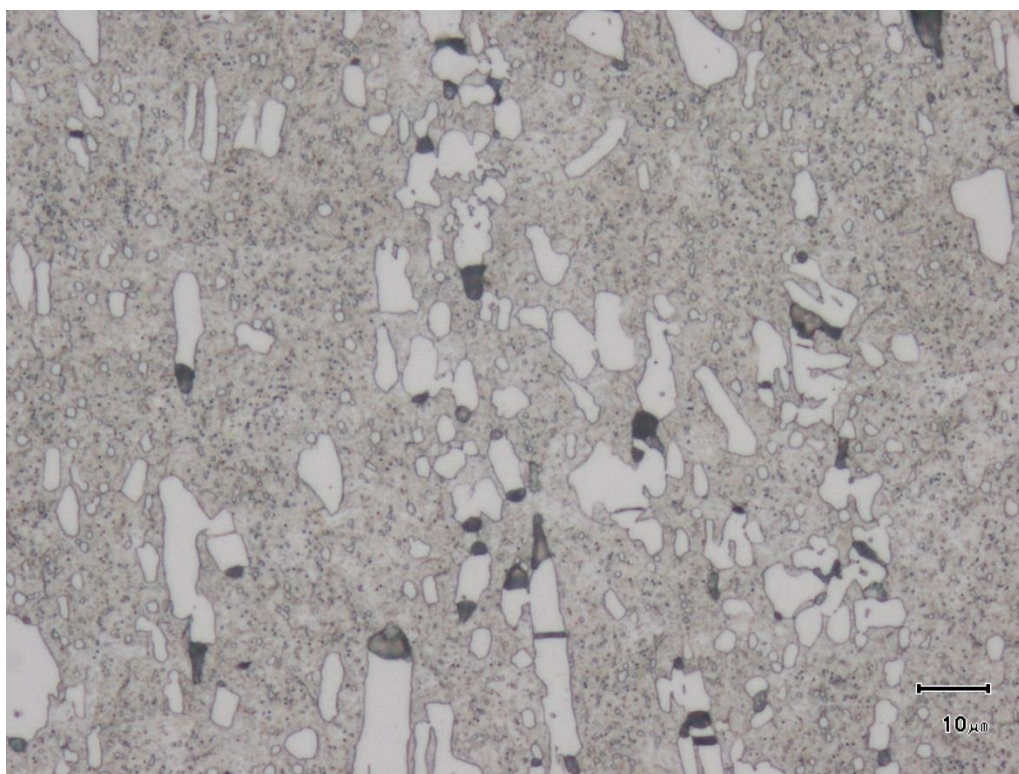
- [1] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 1. vyd. Brno: CERM, 1999, 350 s. ISBN 80-720-4130-4.
- [2] ČSN EN 10025+A1. *VÝROBKY VÁLCOVANÉ ZA TEPLA Z NELEGOVANÝCH KONSTRUKČNÍCH OCELÍ*. Praha: Český normalizační institut, 1996.
- [3] FREMUNT, Přemysl. *Nástrojové oceli*. Brno: Dům techniky, 1994, 229 s
- [4] ČSN EN 10020. *Definice a rozdělení ocelí*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [5] JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka*. 4. vyd. Praha: SNTL, 1983, 342 s.
- [6] Oficiální výukové stránky Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT [online]. 2014 [cit. 2014-5-9]. Dostupné z: <ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/07%20-%20Nastrojove%20oceli.ppt>
- [7] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, c2001, 505 s. ISBN 80-720-4193-2.
- [8] VELES, Pavol. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1989, 408 s
- [9] Oficiální výukové stránky Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT [online]. 2014 [cit. 2014-5-9]. Dostupné z: <ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/OBECNY%20UVOD.doc>.
- [10] ČSN EN 10002-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za okolní teploty*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [11] Oficiální výukové stránky Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT [online]. 2014 [cit. 2014-5-9]. Dostupné z: ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/ZKOUSKA%20TAHEM.doc
- [12] ČSN EN 10109-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti - Část 1: Zkouška podle Rockwella*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [13] Oficiální výukové stránky Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT [online]. 2014 [cit. 2014-5-9]. Dostupné z: <ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/ZKOUSKA%20RAZEM%20V%20OHYBU.doc>.
- [14] BESTAR [online]. 2014 [cit. 2014-5-9]. Dostupné z: http://www.bestar-steel.com/site_files/files/material_data/BE2379.pdf

Seznam příloh

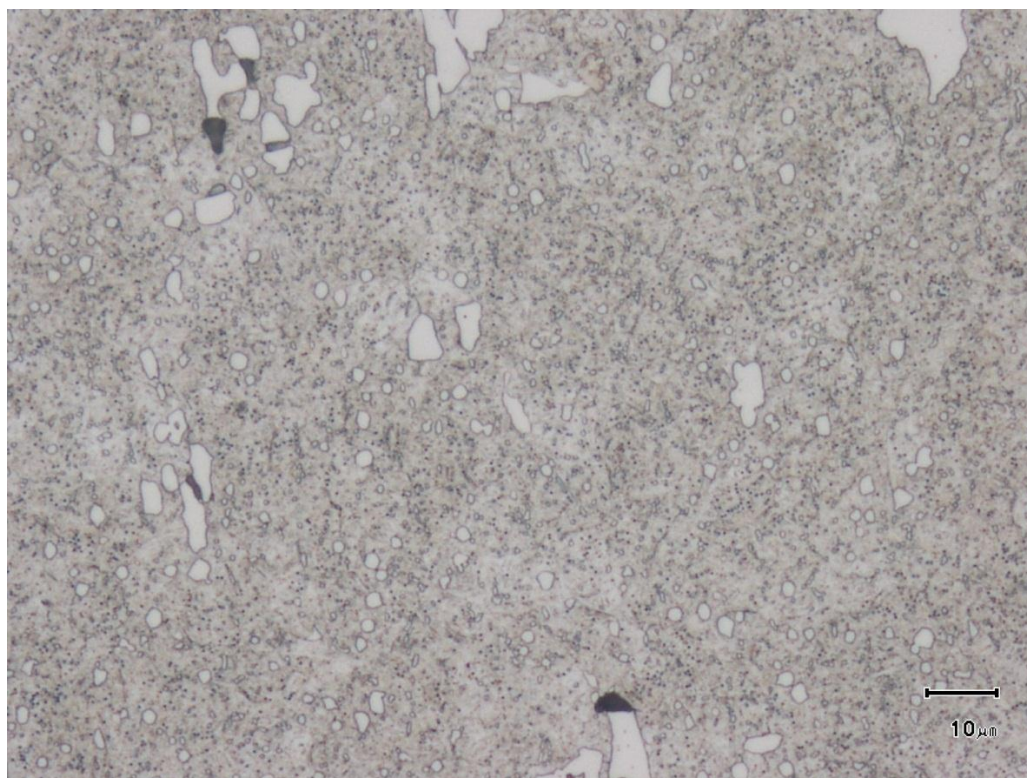
- Příloha 1. 1: Metalografický vzorek skupiny 1 zvětšený 500x
- Příloha 1. 2: Metalografický vzorek skupiny 1 zvětšený 500x
- Příloha 1. 3: Metalografický vzorek skupiny 1 zvětšený 1000x
- Příloha 1. 4: Metalografický vzorek skupiny 1 zvětšený 1000x
- Příloha 2. 1: Metalografický vzorek skupiny 2 zvětšený 500x
- Příloha 2. 2: Metalografický vzorek skupiny 2 zvětšený 500x
- Příloha 2. 3: Metalografický vzorek skupiny 2 zvětšený 1000x
- Příloha 2. 4: Metalografický vzorek skupiny 2 zvětšený 1000x
- Příloha 3. 1: Metalografický vzorek skupiny 3 zvětšený 500x
- Příloha 3. 2: Metalografický vzorek skupiny 3 zvětšený 500x
- Příloha 3. 3: Metalografický vzorek skupiny 3 zvětšený 1000x
- Příloha 3. 4: Metalografický vzorek skupiny 3 zvětšený 1000x
- Příloha 4. 1: Metalografický vzorek skupiny 4 zvětšený 500x
- Příloha 4. 2: Metalografický vzorek skupiny 4 zvětšený 500x
- Příloha 4. 3: Metalografický vzorek skupiny 4 zvětšený 1000x
- Příloha 4. 4: Metalografický vzorek skupiny 4 zvětšený 1000x

Přílohy

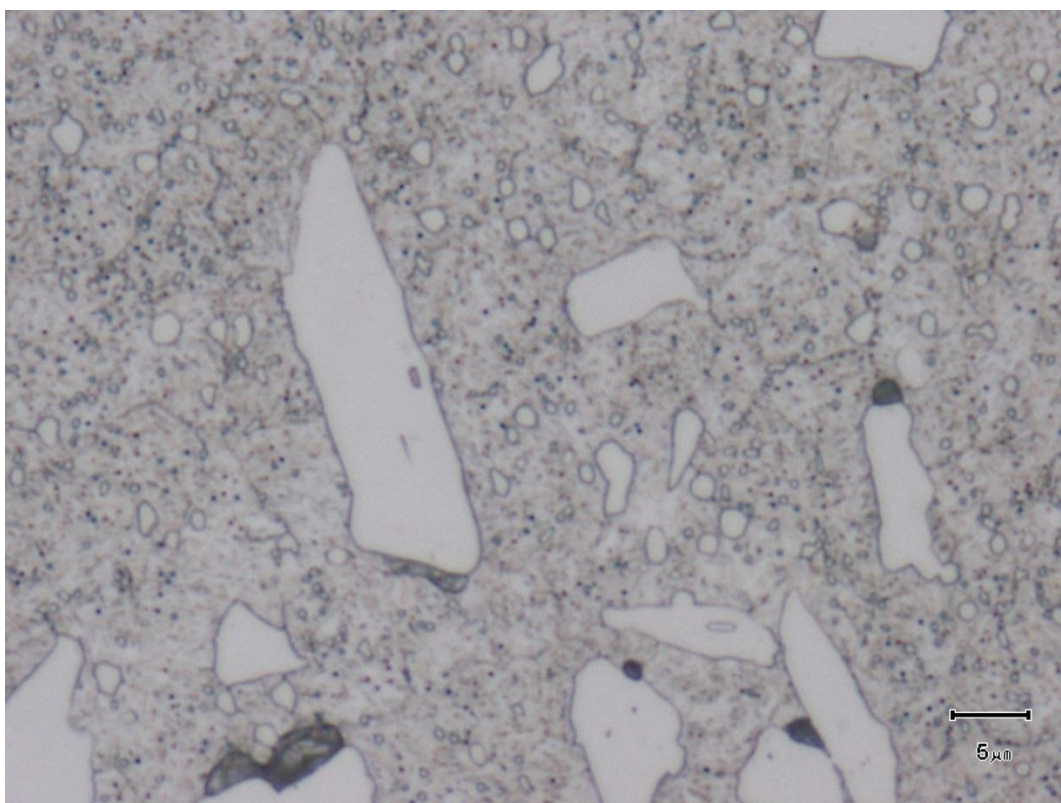
Příloha 1: Metalografické vzorky skupiny 1



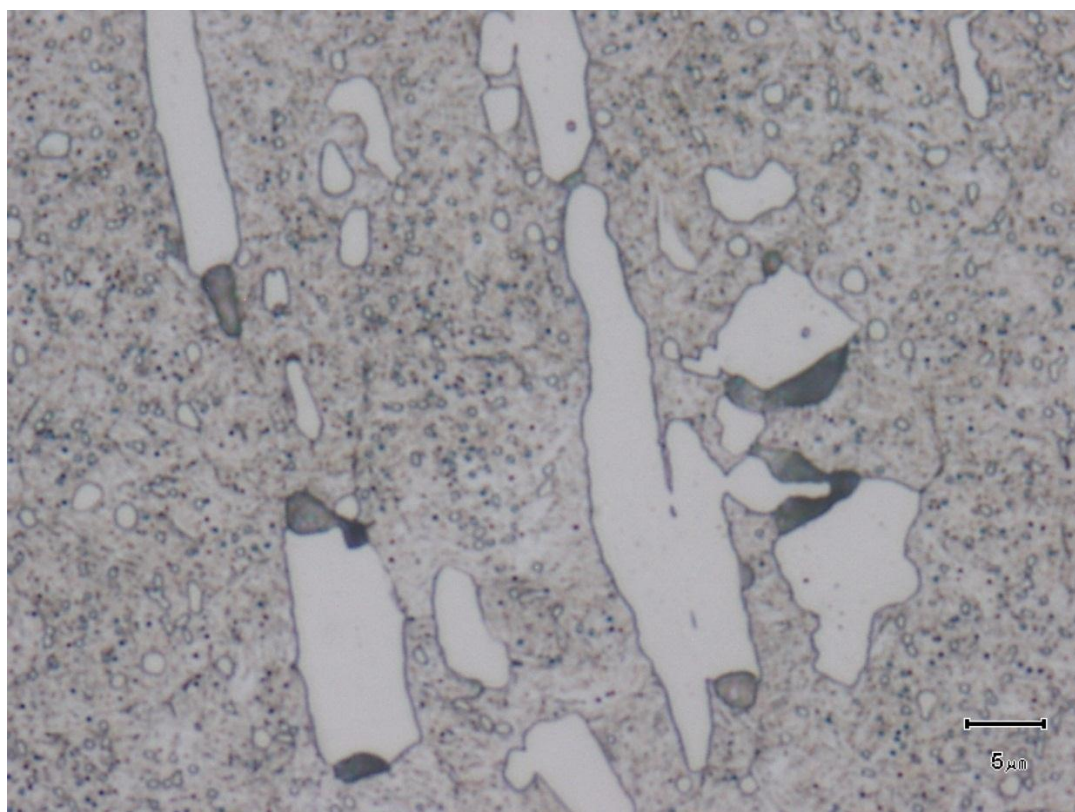
Příloha 1. 1: Metalografický vzorek skupiny 1 zvětšený 500x



Příloha 1. 2: Metalografický vzorek skupiny 1 zvětšený 500x

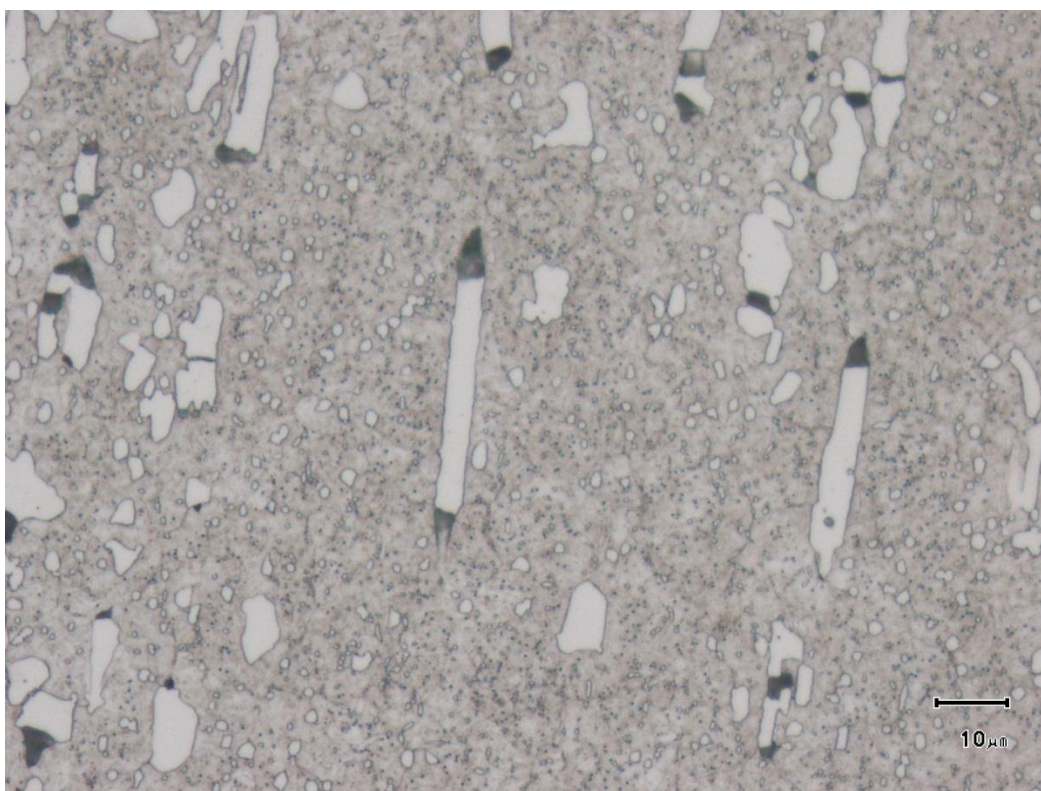


Příloha 1. 3: Metalografický vzorek skupiny 1 zvětšený 1000x

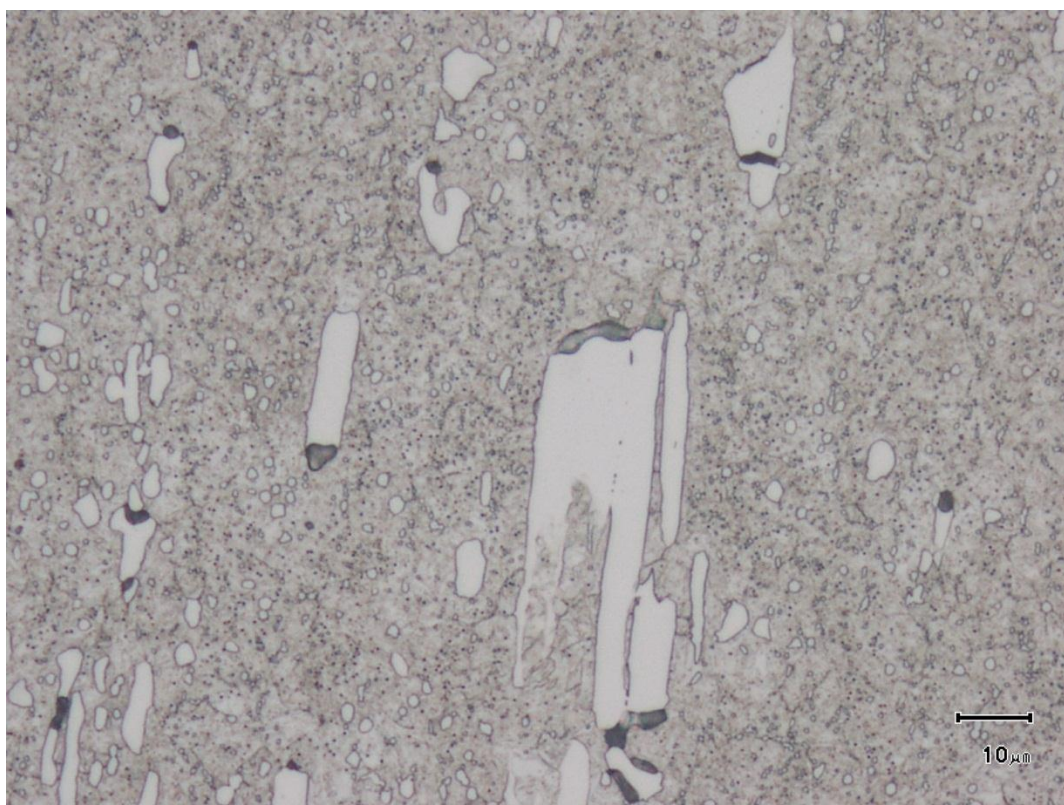


Příloha 1. 4: Metalografický vzorek skupiny 1 zvětšený 1000x

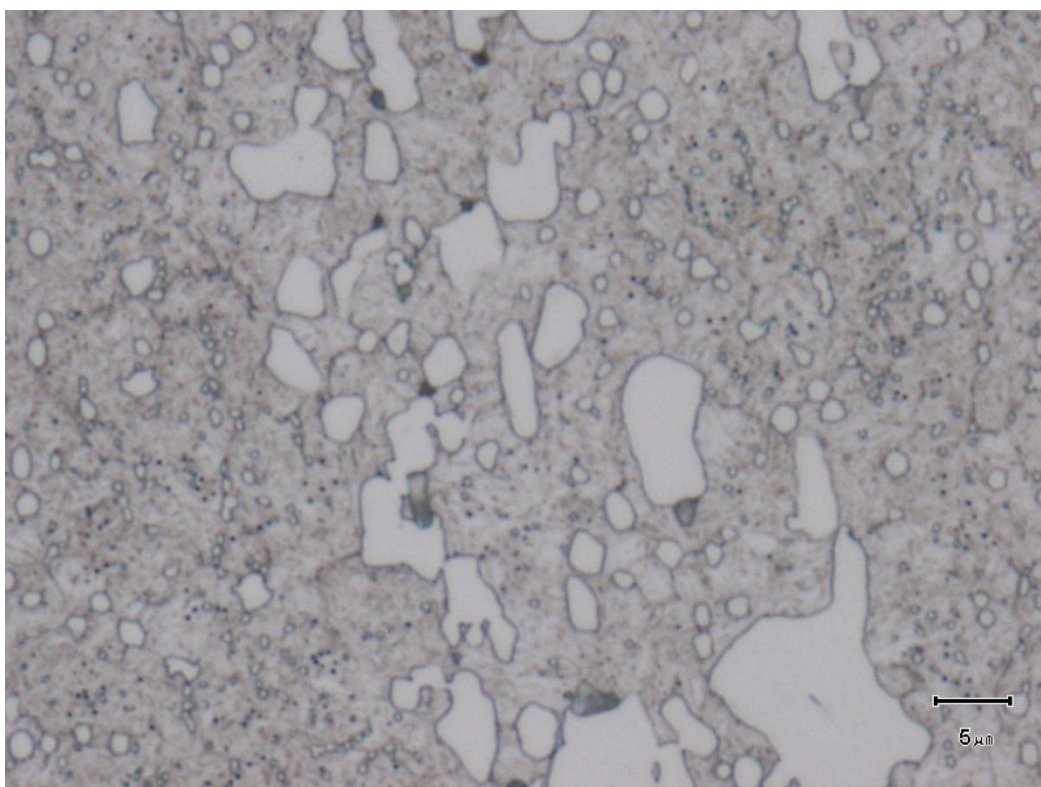
Příloha 2: Metalografické vzorky skupiny 2



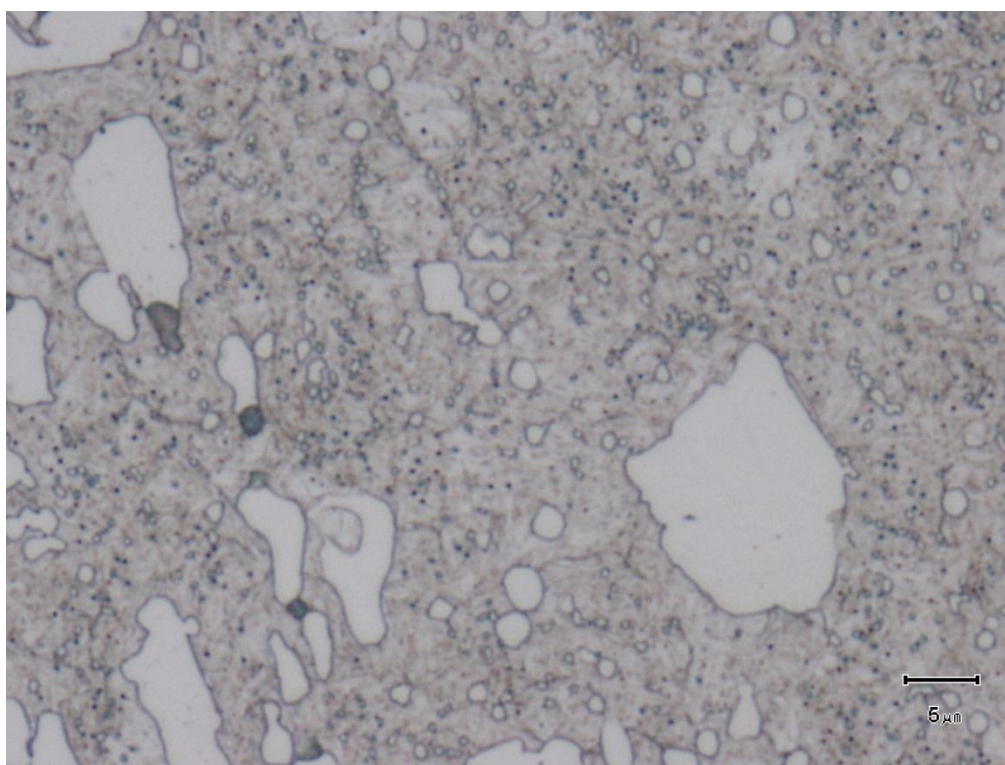
Příloha 2. 1: Metalografický vzorek skupiny 2 zvětšený 500x



Příloha 2. 2: Metalografický vzorek skupiny 2 zvětšený 500x

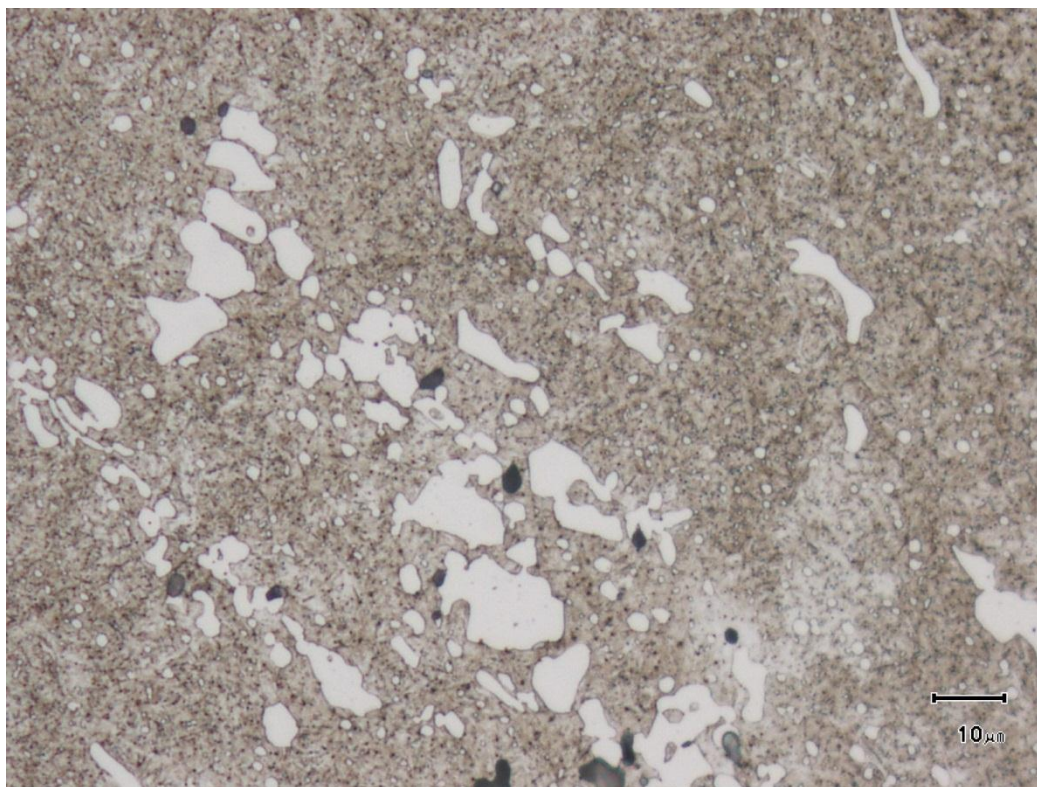


Příloha 2. 3: Metalografický vzorek skupiny 2 zvětšený 1000x

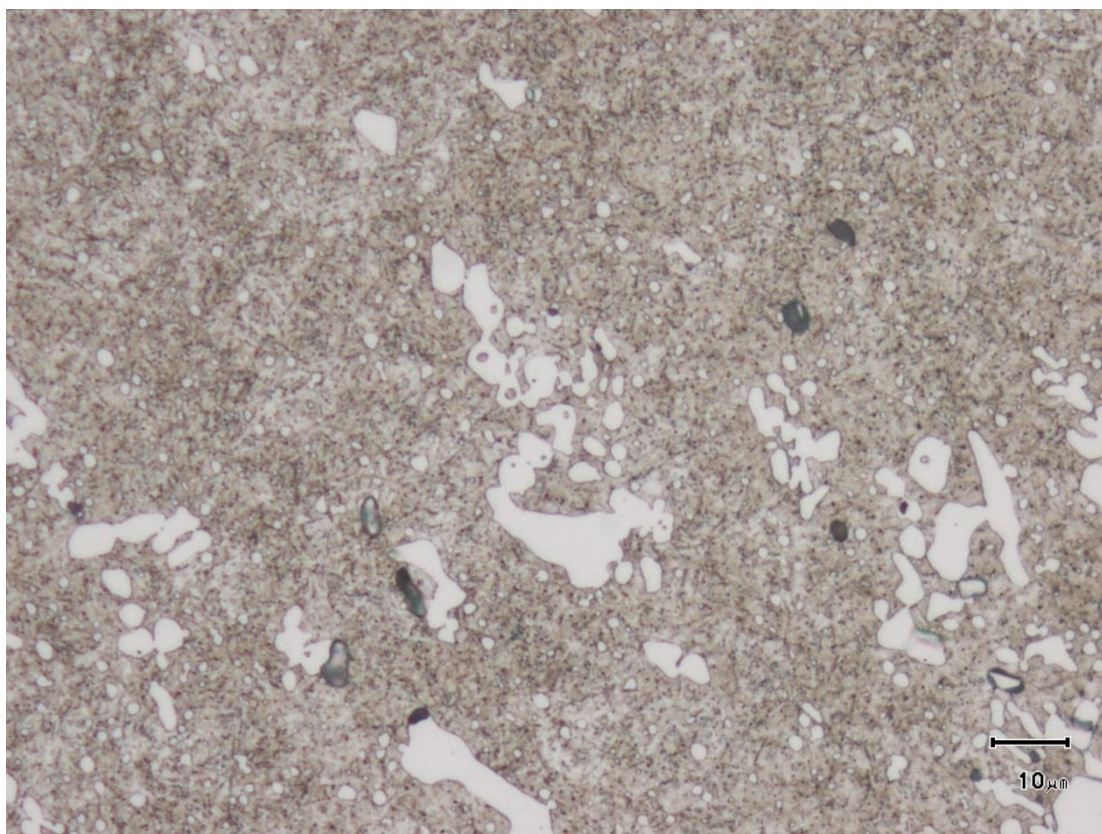


Příloha 2. 4: Metalografický vzorek skupiny 2 zvětšený 1000x

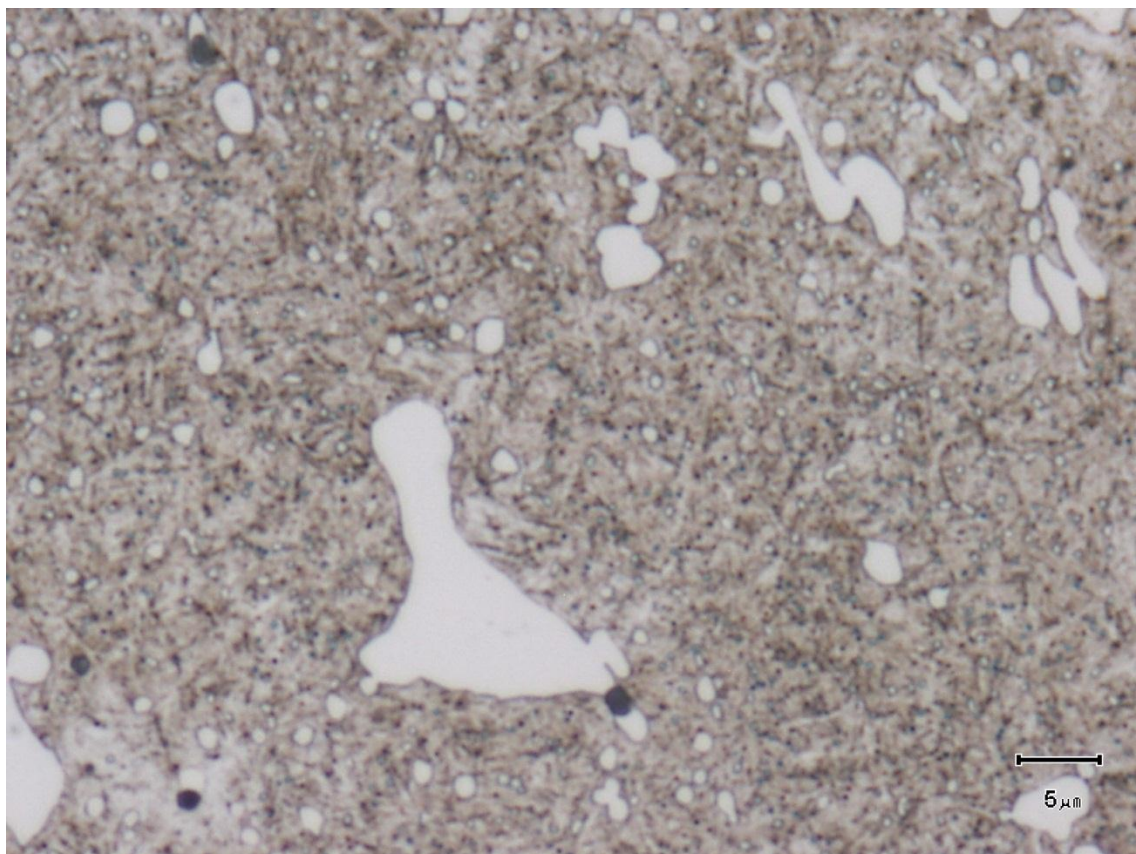
Příloha 3: Metalografické vzorky skupiny 3



Příloha 3. 1: Metalografický vzorek skupiny 3 zvětšený 500x



Příloha 3. 2: Metalografický vzorek skupiny 3 zvětšený 500x

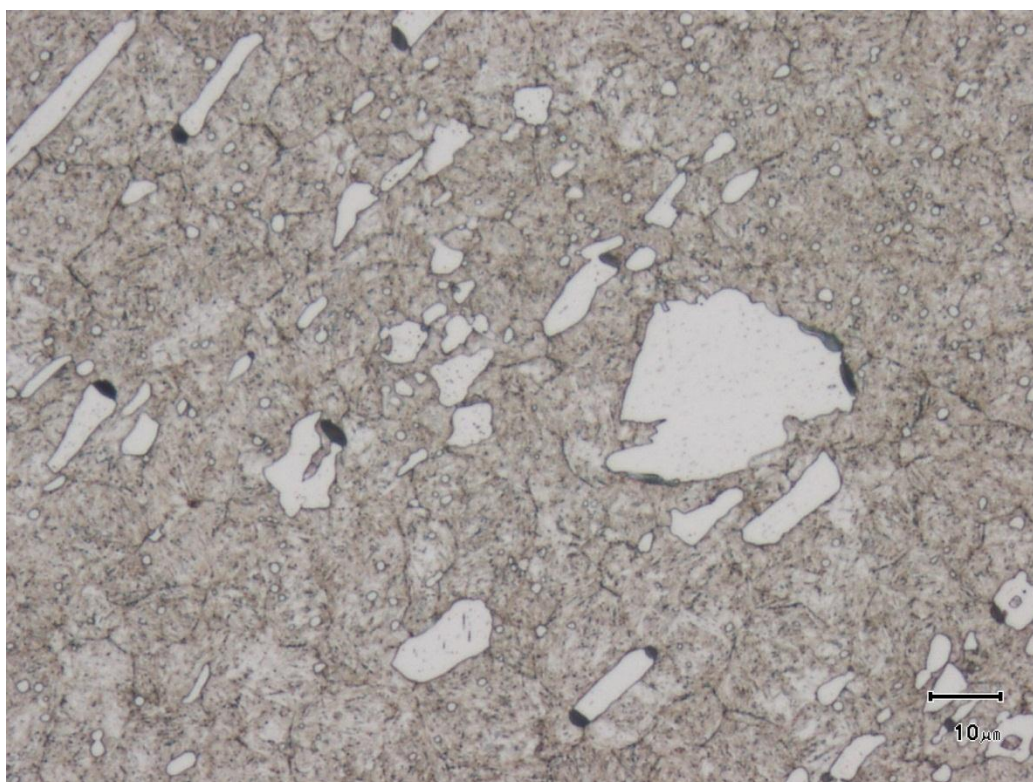


Příloha 3. 3: Metalografický vzorek skupiny 3 zvětšený 1000x

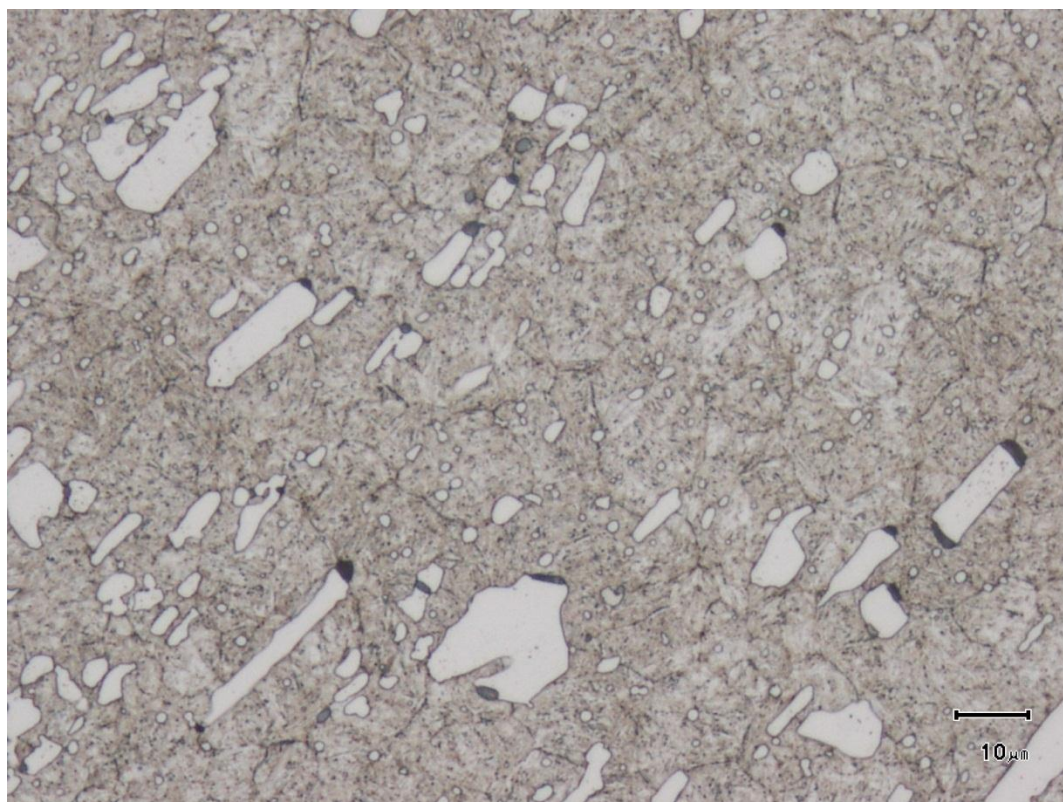


Příloha 3. 4: Metalografický vzorek skupiny 3 zvětšený 1000x

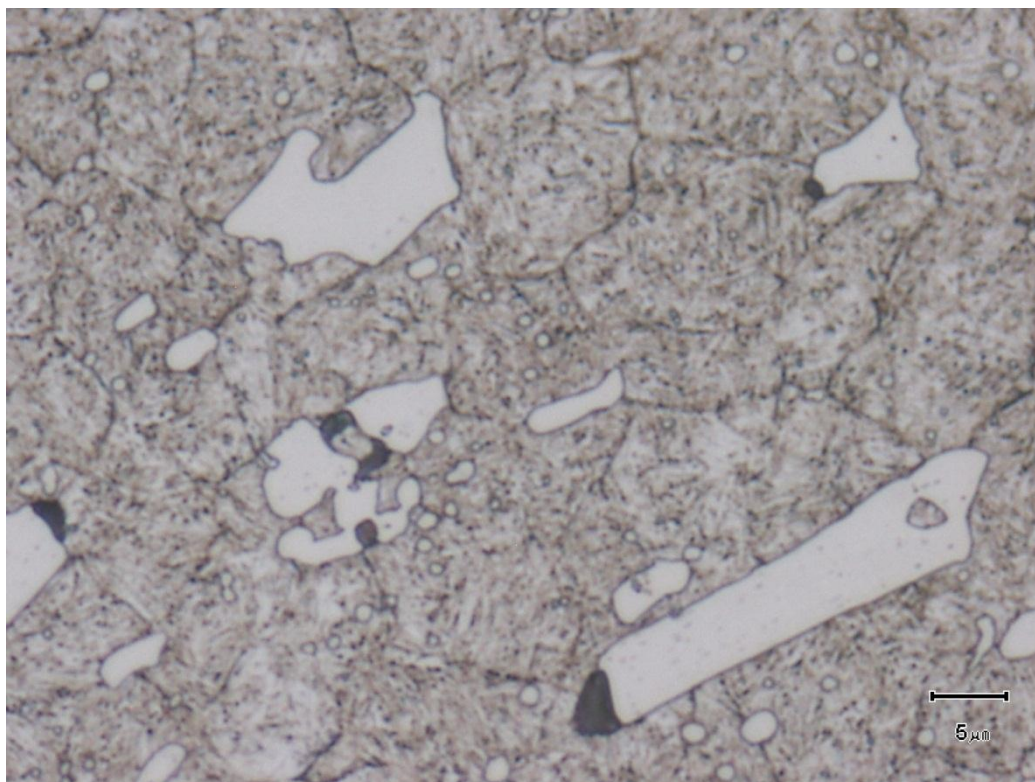
Příloha 4: Metalografické vzorky skupiny 4



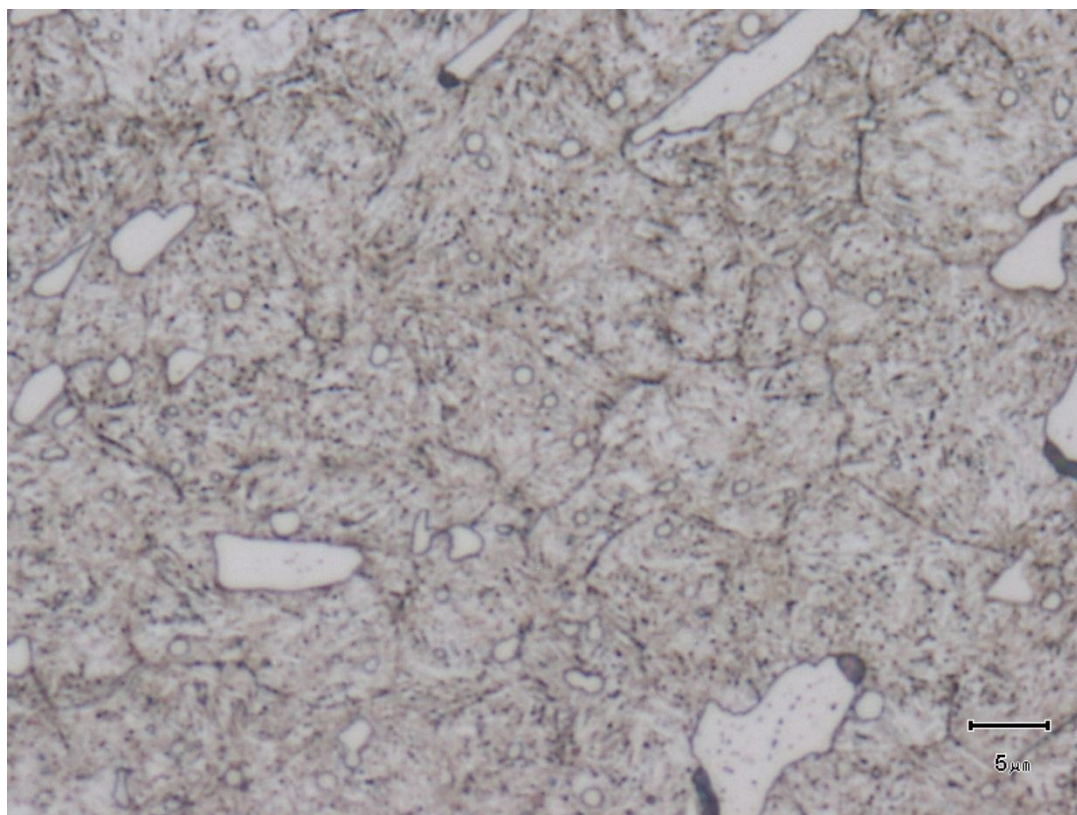
Příloha 4. 1: Metalografický vzorek skupiny 4 zvětšený 500x



Příloha 4. 2: Metalografický vzorek skupiny 4 zvětšený 500x



Příloha 4. 3: Metalografický vzorek skupiny 4 zvětšený 1000x



Příloha 4. 4: Metalografický vzorek skupiny 4 zvětšený 1000x