



Vliv stupně prokování na výsledné mechanické vlastnosti materiálu

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: **David Mizera**

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David Mizera**
Osobní číslo: **S14000116**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Vliv stupně prokování na změnu struktury a mechanických vlastností kovových materiálů**
Zadávající katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Základní principy tváření za tepla a za studena. Způsoby ohřevu materiálu. Rozdělení operací kování. Kovací diagram. Stupeň prokování. Materiály používané pro kování za tepla a za studena.
2. Metalografická příprava vzorků pro hodnocení struktury. Přehled nejčastěji používaných zkoušek tvrdosti u kovových materiálů (výhody, nevýhody, charakteristické použití).
3. Pro zvolené materiály experimentální zjištění vlivu stupně prokování na změnu struktury a mechanických vlastností.
4. Vyhodnocení experimentu.
5. Závěr.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] ASM HANDBOOK. *Volume 14 - Forming and Forging*. 6th ed. Materials Park: ASM International, 2004. s. 978. ISBN 0-87170-020-4.
- [2] ASM HANDBOOK. *Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation*. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.
- [3] HOSFORD, W.F., CADDEL, R. *Metal Forming (Mechanics and Metallurgy)*. 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2007. s. 312. ISBN 978-0-521-88151-0.
- [4] PTÁČEK, L. et al. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademickénakladatelství CERM, 2003. s. 516. ISBN 80-7204-283-1.
- [5] POLMEAR, I. *Ligth Alloy - From traditional Alloys to Nanocrystals*. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. s. 421. ISBN 0-7506-6371-5.
- [6] TSCHAETSCH, H. *Metal Forming Practise (Processes Machines Tools)*. Berlin: Springer-Verlag, 2006. s. 405. ISBN-10: 3-540-33216-2.
- [7] MICHNA, Š., NOVÁ, I. *Technologie a zpracování kovových materiálů*. Prešov: Adin, 2008. s. 326. ISBN 978-80-89244-38-6.
- [8] MICHNA Š. a kol. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin s.r.o., 2005. 700 s. ISBN: 80-89041-88-4.
- [9] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 64 s. Třídící znak 420310.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.**

Katedra strojírenské technologie

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Michaela Kolnerová, Ph.D.**

Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: **1. listopadu 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **1. února 2019**

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 28.06.2018

Podpis: 

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlu Solfronkovi Ph.D. za jeho pomoc při experimentálním měření, cenné rady s psáním práce a za jeho čas, který mi věnoval. Dále bych rád poděkoval paní Ing. Ivě Novákové Ph.D. za přípravu vzorků a asistenci s měřením. Poděkování patří i mé rodině za podporu nejen při psaní práce, ale také při celém studiu.

Anotace:

Bakalářská práce se zaměřuje na změnu struktury a mechanických vlastností kovových materiálů vlivem stupně prokování. Teoretická část je zaměřena na technologii kování a tvářecí procesy rozdělené v závislosti na teplotě. Dále je popsána metalografická příprava vzorků a přehled základních zkoušek tvrdosti u kovových materiálů. V experimentální části byly pro zvolený materiál realizovány zkoušky pěchování při různých teplotách tváření, stupni deformace a rychlosti ochlazování. Změna struktury a mechanických vlastností testovaného materiálu byla hodnocena pomocí metalurgických výbrusů a zkoušky dle Vickerse.

Klíčová slova:

Kování, tváření, mechanické vlastnosti, tvrdost, deformace, struktury

Annotation:

The bachelor thesis is focusing on structure and mechanical properties changing due to forging ratio. The theoretical part is focused on forging processes and forging technology, divided by temperature. There is also described the metallographic sample preparation and an overview of hardness tests for metallic materials. In the experimental part, upsetting tests were performed for the selected material at different forming temperatures, degree of deformation and cooling speed. The change of the structure and mechanical properties of the tested material was evaluated by using scratch pattern and Vickers hardness test.

Keywords:

forging, forming, mechanical properties, hardness, deformation, structures

1. Obsah

Seznam zkratk a symbolů	9
1 Úvod	11
2 Teoretická část	12
2.1 Technologie tváření kovů	12
2.1.1 Strukturální změny při ohřevu	12
2.2 Rozdělení tvářecích procesů podle teploty	13
2.2.1 Tváření za studena	13
2.2.2 Tváření za tepla	14
2.2.3 Tváření za poloohřevu	15
2.3 Ohřev materiálu	15
2.3.1 Zařízení pro ohřev kovů k tváření	17
2.4 Kování	18
2.4.1 Stupeň prokování a deformace	19
2.4.2 Rychlost deformace	22
2.4.3 Kovací síly	23
2.4.4 Rozdělení kování	23
2.5 Tepelné zpracování oceli	26
2.5.1 Diagram metastabilní soustavy Fe-Fe ₃ C	27
2.6 Příprava vzorku pro optickou metalografii	30
2.6.1 Metalografický výbrus	30
2.6.2 Postupy přípravy výbrusů	31
2.6.3 Hodnocení výbrusů	33
2.7 Zkoušky tvrdosti	33
2.7.1 Zkouška podle Brinella	33
2.7.2 Zkouška podle Rockwella	34
2.7.3 Zkouška podle Vickerse	34
3 Experimentální část	36
3.1 Zkušební vzorky	36
3.2 Příprava vzorků	36
3.3 Řízená deformace vzorků	38
3.4 Hodnocení struktury	40

3.5	Měření tvrdosti	44
3.5.1	Výsledné hodnoty měření	45
3.6	Vyhodnocení výsledků	48
3.6.1	Tvrdost	48
3.6.2	Struktura	53
4	Závěr	59
	Seznam použité literatury	61
	Seznam Příloh	63

Seznam zkratek a symbolů

Označení	Rozměr	Význam
R_m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
R_e	[MPa]	Mez kluzu v tahu
T	[°C]	Teplota
T_{tav}	[°C]	Teplota tání daného kovu
t	[h]	Doba ohřevu z teploty 0 °C na 1200 °C
K	[1]	Součinitel vlivu chemického složení materiálu
D	[m]	Průměr nebo délka strany průřezu ohřívaného materiálu
P	[1]	Stupeň prokování
h_0	[m]	Původní výška polotovaru
h_1	[m]	Výška polotovaru po tváření
S_0	[m ²]	Počáteční průřez polotovaru
S_1	[m]	Průřez polotovaru po prodloužení
X	[1]	Proměnná hodnota
x_1	[1]	Integrační horní mez
x_2	[1]	Integrační dolní mez
w_0	[m]	Původní šířka polotovaru
l_0	[m]	Původní délka polotovaru
w_1	[m]	Šířka po tváření
l_1	[m]	Délka po tváření
V	[m ³]	Objem polotovaru
ε	[%]	Stupeň deformace
ε_x	[1]	Skutečný stupeň deformace
ε_1	[1]	Stupeň přechování
ε_2	[1]	Stupeň laterálního toku
ε_3	[1]	Stupeň prodloužení
w_m	[%/s]	Průměrná rychlost deformace
t_d	[s]	Čas trvání deformace

Označení	Rozměr	Význam
V	[m/s]	Rychlost posuvu nástroje
F	[N]	Deformační síla
k_p	[MPa]	Přetvárný odpor
k_0	[MPa]	Přetvárná pevnost
S	[m ²]	Plocha kovádky
M	[1]	Koeficient závislý na způsobu tváření, rozměrech a tření
HBW	[1]	Tvrdost podle Brinella (kalená ocelová kulička)
HBS	[1]	Tvrdost podle Brinella (kulička z tvrdokovu)
F_H	[N]	Zatěžující síla
S_H	[m ²]	Plocha vtisku
HV	[1]	Tvrdost podle Vickerse
U	[m]	Průměrná hodnota úhlopříček vtisku
α_t	[1]	Součinitel závislý na průřezu materiálu a na rozložení v peci
HRA	[1]	Tvrdost podle Rockwella (diamantový kužel)
HRB	[1]	Tvrdost podle Rockwella (ocelová kulička)
HRC	[1]	Tvrdost podle Rockwella (diamantový kužel)

1 Úvod

Kování je jedna z objemových tvářecích technologií, při které dochází k deformaci ve všech třech souřadných směrech působením rázů za tepla. Cílem této metody je dosažení požadovaného tvaru součásti, ale také zlepšení mechanicko-fyzikálních vlastností. V dnešní době se na samotné tváření kovů také můžeme dívat jako na nejhospodárnější metodu technologického zpracování, a to díky minimálnímu odpadu materiálu.

Z hlediska historie kování patří k nejstarším řemeslům, které lidé znají od dob, co poznali oheň a kovatelné materiály, a s tím i spjatý zájem o mechanické vlastnosti. Je známo, že první pokusy o zpracování železa spadají do 3. tisíciletí př. n. l., nálezy z tohoto období jsou velmi vzácné a pocházejí z oblasti Mezopotámie.

Cílem mé bakalářské práce je zjistit, jak závisí vnitřní struktura a mechanické vlastnosti předem stanoveného kovového materiálu na stupni prokování a na různých tvářecích parametrech, jako jsou například tvářecí teploty, rychlosti ochlazování a další.

Práce je rozdělena do dvou částí. Teoretická část a experimentální část. V první části práce budou vysvětleny a popsány základní operace, principy, pojmy a souvislosti, které budou přímo či nepřímo obsaženy v experimentu. Bude tu odkazováno na odborné texty literatury, ze kterých jsem čerpal. V druhé části budou uvedeny zvolené materiály a teploty pro měření, velikosti deformací, a pomocí měřících postupů zkoumány vlastnosti a struktura vzorků. V závěru této bakalářské práce budou na základě výstupů z experimentálního měření shrnuty a zhodnoceny výsledky v rámci řešené problematiky.

2 Teoretická část

V této části bakalářské práce jsou popsány tvářecí procesy, dělené podle teploty, rozdělení operací kování a používané materiály pro tuto technologii. Dále zde budou uvedeny teoretické postupy metalografické přípravy vzorků pro testování struktury, testy tvrdosti pro kovové materiály a jejich charakteristiky.

2.1 Technologie tváření kovů

Technologie tváření kovů je proces, při kterém nastává změna tvaru či vlastností u výrobku nebo polotovaru v důsledku působení vnějších sil. Při tváření vznikají plastické deformace v okamžiku dosažení napětí na mezi kluzu pro daný materiál. V průběhu tohoto děje vznikají fyzikální změny a změny ve struktuře, které ovlivňují mechanické vlastnosti materiálu. [1]

Pro tváření se používají především materiály s dobrou tvárností, tj. schopnost změnit působením vnějších sil trvale svůj tvar, aniž by se porušila soudružnost. Znamená to přemísťování částic hmoty. Výhodou tváření je vysoká produktivita práce, vysoké využití materiálu a velmi dobrá přesnost tvářených výrobků. Nevýhodou je relativně vysoká cena strojů a nástrojů a rozměry konečného výrobku jsou omezeny. [1]

2.1.1 Strukturální změny při ohřevu

Návrat z deformované struktury zpátky do nedeformované může nastat při vyšších teplotách, kde dojde k teplotně aktivovaným dějům. Tyto děje vedou k odpevnění materiálu

Zotavení

Dosáhne-li za studena deformovaný kov 0,3 teploty tání, dochází v jeho vnitřní stavbě ke změnám, které se projevují postupným zmenšováním zpevnění. Struktura deformovaná předchozím tvářením zůstává beze změny a celý proces probíhá v submikrostruktuře. Tento zotavovací proces je nevratným. [2]

Rekrystalizace

Rekrystalizace probíhá za teplot $T \geq (0,35 \text{ až } 0,45) * T_{\text{tav}}$. Tento proces je doprovázen změnou mechanických a fyzikálních vlastností. Rekrystalizací získává zpevněný materiál (vlivem předchozího tváření) své původní vlastnosti a v některých případech dokonce vlastnosti lepší vzhledem k výchozím hodnotám. Deformovaná krystalová mřížka procesem tváření je nahrazována novou mřížkou, nedeformovanou. [2]

2.2 Rozdělení tvářecích procesů podle teploty

Při změně teploty se mění deformační odpor materiálu proti tváření. Rozdělení tvářecích procesů podle teploty se tak může jinak popsat, jako vztah teploty tvářeného materiálu k teplotě rekrystalizace (zhruba 40 % teploty tání kovu).

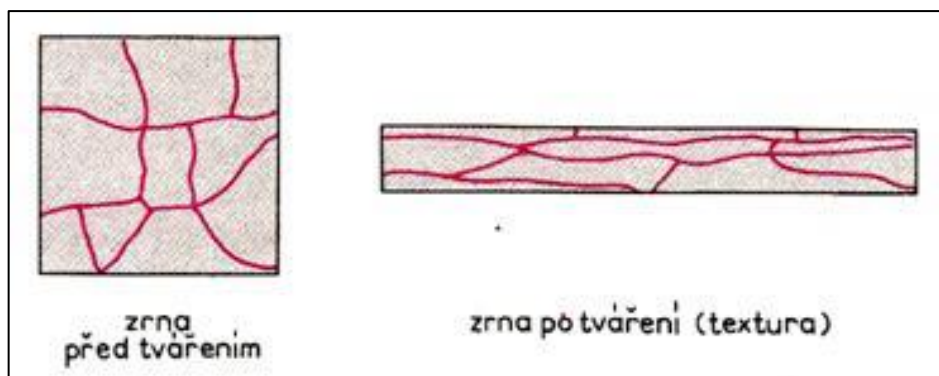
Technologické tvářecí procesy se dají rozdělit podle teploty na:

- tváření za studena
- tváření za tepla
- tváření za poloohřevu.

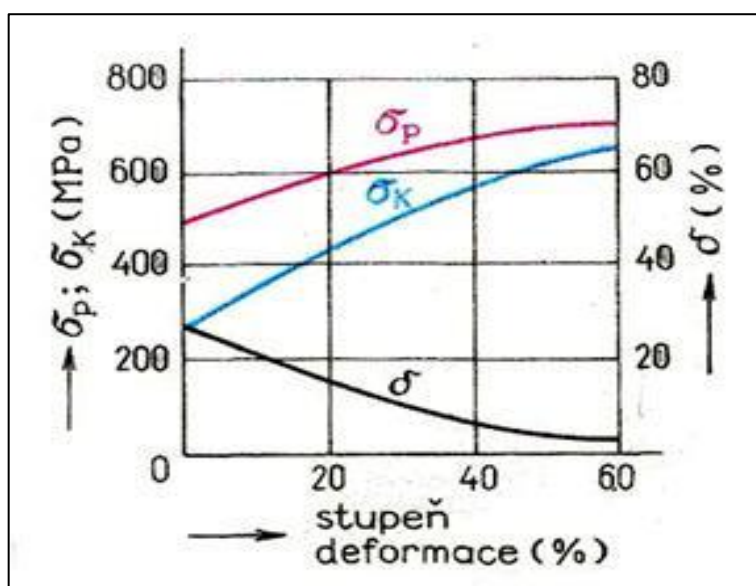
2.2.1 Tváření za studena

Probíhá pod rekrystalizační teplotou, zhruba pod 30 % teploty tání daného materiálu. V průběhu plastické deformace se mění orientace krystalové mřížky. Původní orientace se mění v usměrněnou, zrna se deformují ve směru tváření, vytváří se tzv. textura (Obr. 2.1). Roste mez kluzu a s ní i pevnost a tvrdost materiálu, zároveň se zvyšuje odpor proti dalšímu tváření. Poměr R_e a R_m navzájem blíží, dochází ke zpevnění (Obr. 2.2). Deformační zpevnění také způsobuje snížení elektrické a tepelné vodivosti, odolnosti proti korozi, chemickým vlivům apod. [3] [1]

Provedením rekrystalizace u takto deformovaného materiálu vzniknou zcela nová zrna, která nejsou deformovaná a jsou schopna plastické deformace. Vlivem tohoto procesu vznikne nová zrnitost struktury závislá na stupni deformace. Čím větší deformace byla, tím se dosáhne jemnějšího zrna. Výhodou tváření za studena je vysoká přesnost rozměrů, kvalitní povrch bez okují a zlepšení vlastností zpevněním. Naopak nevýhodou tohoto tváření je nutnost velkých tvářecích sil, nerovnoměrného zpevňování a omezená tvárnost materiálu. [1] [4]



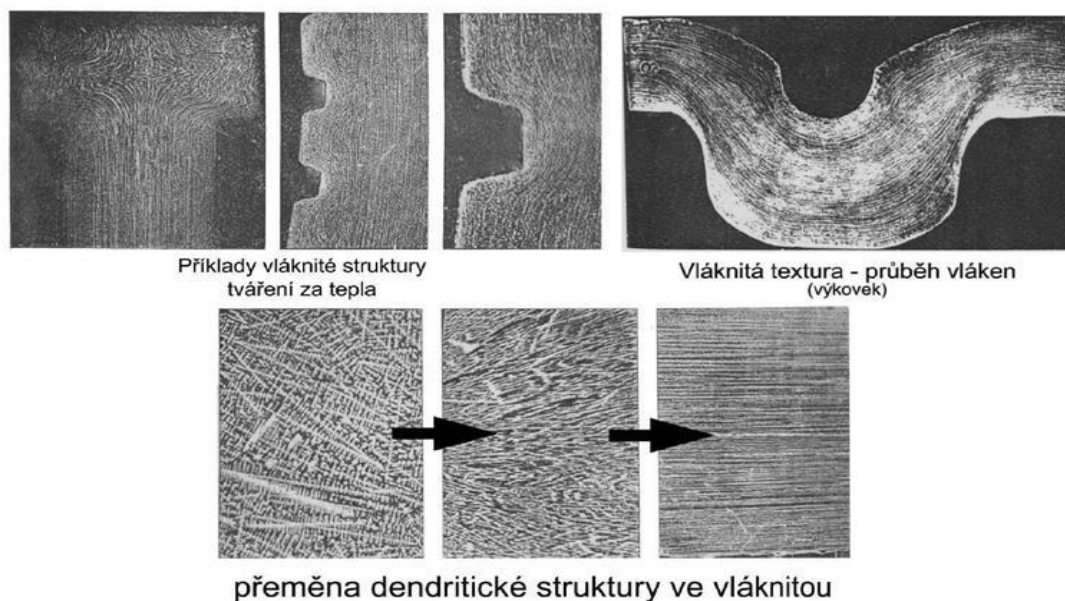
Obr. 2.1 Změna tvaru zrn v důsledku tváření. [1]



Obr. 2.2 Změna mechanických vlastností v závislosti na stupni deformace. [1]

2.2.2 Tváření za tepla

Tváření za tepla probíhá nad rekrytalizační teplotou (tváření nad 70 % teploty tání daného materiálu). U tohoto tváření stačí síly až desetkrát menší v porovnání s tvářením za studena. Další výhodou je odstranění různých trhlin či bublin ve struktuře. Nevýhodou je hrubnutí zrna se zvyšující se tvářecí teplotou, klesá houževnatost a kvalita povrchu vlivem okujení. Po skončení tváření kov nevykazuje žádné stopy po zpevnění, neboť rekrytalizace probíhá ve většině případů rychle (závisí na teplotě a rychlosti deformace), tudíž zpevnění mizí už v průběhu tváření nebo neprodleně po něm. Dalším vlivem tváření za tepla je vznik vláknité struktury (Obr. 2.3), která ovlivňuje mechanické vlastnosti a anizotropii, a kterou nelze odstranit dalším tepelným zpracováním nebo tvářením. Vznik takové struktury je dán spojením povrchových vrstev, kde se usazují nekovové nečistoty (vměstky), které nepodléhají rekrytalizaci. [1] [5]



Obr. 2.3 Příklad přeměny dendritické struktury ingotu na strukturu vláknitou. [6]

2.2.3 Tváření za poloohřevu

Tváření za poloohřevu představuje střední cestu mezi tvářením za studena a tvářením za tepla. Proces probíhá zpravidla při 30 % až 60 % teploty tání daného materiálu. Důvody použití jsou za účelem dosažení zlepšených přetvárných schopností ve srovnání s tvářením za studena, snížení přetvárných odporů a dosažení specifické struktury (z části rekrystalizované a z části vláknité). Tvářením za poloohřevu lze vhodně slučovat některé výhody tváření za tepla a za studena. V současné době představuje rozvíjející se progresivní technologii. [7]

2.3 Ohřev materiálu

Jednou ze základních podmínek pro správné tváření je volba vhodné tvářecí teploty a následný způsob ohřevu materiálu. Jako příklad je možné uvést tvářecí teploty uhlíkových ocelí viz. (Obr. 2.4). Teplota během tváření se postupně snižuje k dolní tvářecí teplotě, a jestli že práce není skončena, je potřeba nový přiměřený ohřev. Při ohřátí kovu na vysoké teploty jsou v materiálu menší odpory proti deformaci, avšak hrubne zrna, snižuje se houževnatost, roste tvorba okujů a oduhličení. Navíc je důležité, aby ohřev byl proveden za stejnoměrného prohřátí v celém průřezu a aby proběhl ideálně co nejrychleji s co nejmenšími ztrátami způsobenými opalem. Při ohřevu mohou také nastat nežádoucí procesy, které negativně ovlivňují povrch oceli. Tyto procesy nazýváme oxidace a oduhličování. Vznik okujů během oxidace povrchu nepříznivě působí na tvářecí nástroje, rozměrovou přesnost a jakost povrchu, navíc vede ke ztrátě materiálu. Oxidace nastává při teplotách vyšších než

600 °C. Při teplotách, které se pohybují nad 900 °C, rychlost tvorby okujů dosahuje vysokých hodnot. Stupeň oxidace je závislý na určitých parametrech, jako jsou například: doba ohřevu, teplota ohřevu, složení pecní atmosféry, druhu materiálu. Pokud bychom chtěli zamezit vzniku okujů, museli bychom materiál ohřívat v ochranné atmosféře. Oduhličení vede ke ztrátě uhlíku z povrchu materiálu, závisí na složení atmosféry v peci, na době a teplotě ohřevu a na obsahu uhlíku v oceli. Doba ohřevu t závisí na tepelné bilanci pece, tepelné vodivosti materiálu a jeho rozložení v peci. [1]

Doba ohřevu

$$t = \alpha_t * k * D * \sqrt{D} \quad [\text{h}] \quad (1)$$

kde:

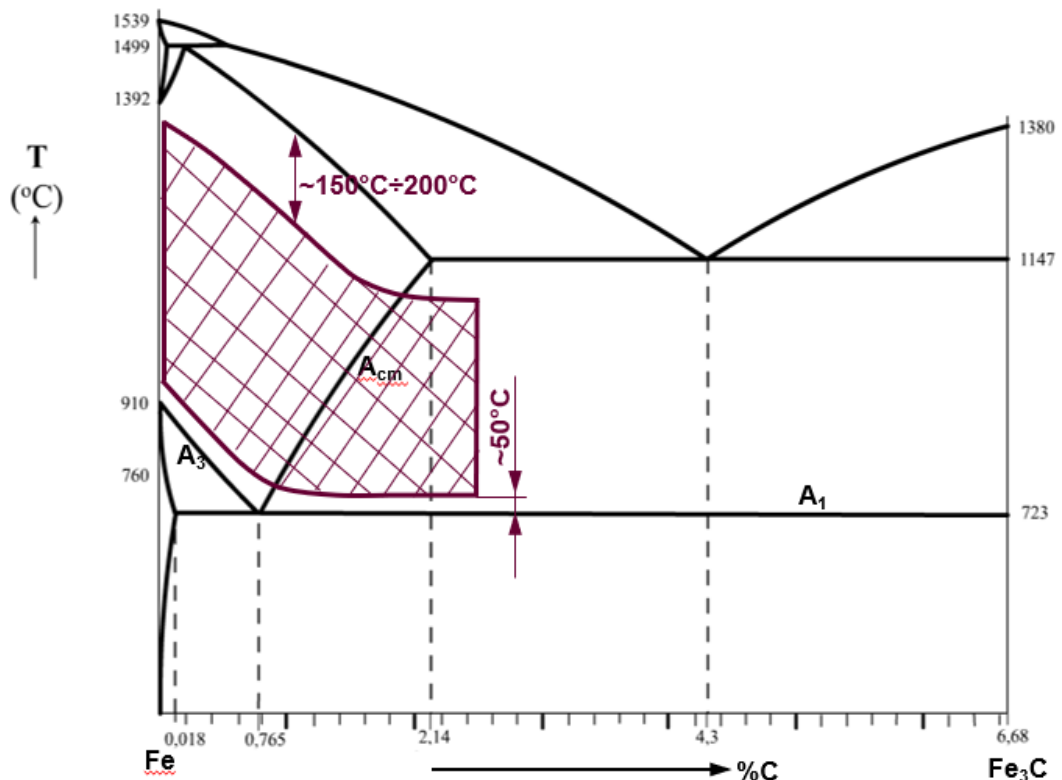
t = doba ohřevu z teploty 0 °C na 1200 °C [h]

α_t = součinitel závisící na průřezu materiálu a na jeho rozložení v peci [1]

k = součinitel vlivu chemického složení materiálu [1]

(u uhlíkových ocelí je roven 10, u legovaných 10 až 20)

D = průměr nebo délka strany průřezu ohřivaného materiálu [m]



Obr. 2.4 Oblast tvářecích teplot pro uhlíkové oceli. [8]

2.3.1 Zařízení pro ohřev kovů k tváření

Postrkové pece

Postrkové pece jsou nejrozšířenější plynové zařízení pro ohřev materiálu. Ohřev v těchto pecích je zajištěn plynovými hořáky. Pec je rozdělena do několika částí s různou teplotou ohřevu, ve kterých je polotovar posunován pomocí zajišťovacích tlaček po pevných profilech. Výhodou je nižší cena ve srovnání s ostatními zařízeními na ohřev materiálu. Naopak nevýhodou postrkové pece je nižší intenzita ohřevu způsobená vzájemným kontaktem polotovarů, delší doba ohřevu materiálu a hromadění okují v peci vlivem nárazů. [8]

Tunelové posuvové pece

U tunelových pecí je ohřev zajišťován plynovými hořáky. Pec je opět rozdělena na části s rozdílnou teplotou ohřevu materiálu. Pohyb polotovarů je zajišťován řadou dopravníků, které mohou být krokové, pásové, válečkové, řetězové a další. Výhody použití těchto pecí jsou snadné vyprazdňování pecí, regulace krokování, snížení opalu zvýšením rychlosti ohřevu, kratší doba ohřevu, snížení poškození povrchu polotovaru. Tyto výhody jsou však kompenzovány vyšší pořizovací cenou pece oproti ostatním zařízením. [8]

Komorové a vozové pece

Ohřev materiálu je opět zajišťován plynovými hořáky. Ohříváný materiál není v peci posunován, ale je stacionární. Pec se používá pro ohřev polotovarů s velkými rozměry s hmotností až do 100 t. Obsahuje také rekuperační hořáky, které slouží k vysokému stupni využití odpadních spalin. Nevýhodou je nízká rychlost ohřevu polotovaru, maximálně 100 °C/hod. v závislosti na velikosti vsázky. Navíc je nutné používat zařízení pro manipulaci s polotovarem. [8]

Karuselové pece

Plynová průchozí pec s kruhovou nístějí, u kterých je zajištěné krokové či plynulé otáčení. Doba ohřevu materiálu je regulovatelná rychlostí průchodu materiálu pecí. Pec je rozdělena na více teplotních pásem, ve kterých je ohřev zajišťován plynovými hořáky. Provoz u těchto pecí je plně automatizovatelný. [8]

Odporové pece

Odporové pece jsou typem elektrických zařízení pro ohřev materiálu. Ohřev je zajištěn topnými odpory, které jsou uloženy ve stěnách, podlaze a stropě pece. Teplota v peci je snadno regulovatelná a dá se jí dosáhnout s velkou přesností. Pec je používána převážně pro výrobky menších rozměrů. Nevýhodou je nízká účinnost ohřevu vysoká cena provozu. [8]

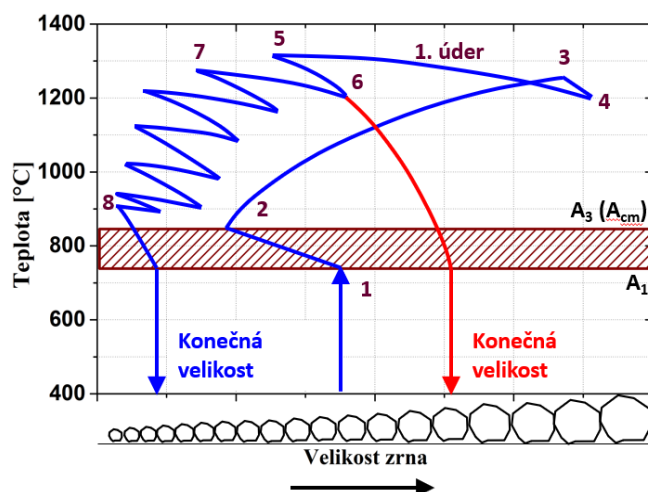
Indukční pece

V indukčních elektrických pecích je materiál ohříván pomocí vířivých proudů s vysokou přesností na požadovanou teplotu. Účinnost a rychlost ohřevu je vysoká. Tato pec má vysoké pořizovací náklady, avšak je jí možné použít pro polotovary širokého rozmezí rozměrů. [8]

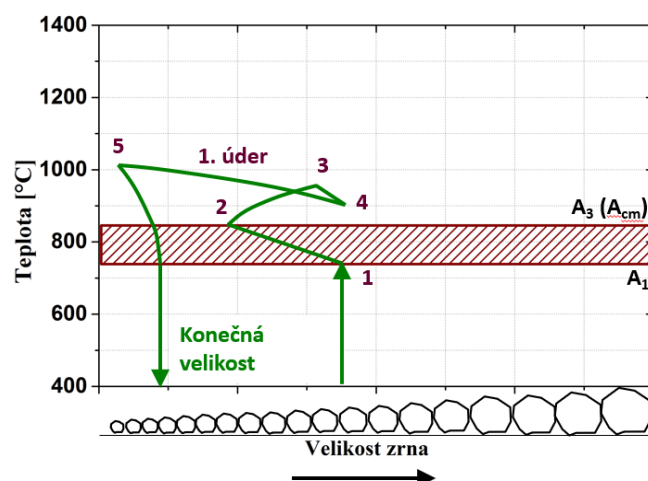
2.4 Kování

Kování je objemové tváření daného materiálu za tepla, prováděné úderem nebo klidně působící silou. Je to přetržitý způsob, díky kterému finální výrobek, tzv. výkovek má požadovaný tvar, příznivou makrostrukturu a mikrostrukturu, zvýšené fyzikální a mechanické vlastnosti. Touto technologií lze zpracovat téměř všechny kovy. Důraz při kování se klade na co nejmenší spotřebu materiálu, co nejlepší přesnost výkovku, vysokou jakost povrchu, příznivý průběh vláken struktury a ekonomii provozu. Kování umožňuje vyrábět tvar požadovaného rozměru a také zlepšovat původní mechanické vlastnosti (stupeň prokování) a strukturu. Účelem prokování je odstranění nestejnoroďé hrubé lící struktury a metalurgických vad, které snižují tvárnost, fyzikální a mechanické vlastnosti kovů (Obr. 2.5 a Obr. 2.6). [1]

V praxi se používá řada metod tváření kováním. Nejjednodušeji se dají rozdělit na volné a zápusťkové kování. Při volném kování se na materiál působí opakovanými údery pouze na část povrchu materiálu, nikoliv na celý. Při zápusťkovém kování se naopak působí jedním nebo více údery na celý nebo téměř celý povrch tvářeného polotovaru. Z těchto dvou základních typů kování lze z hlediska uspořádání a konstrukce nástrojů odvodit řadu specializovaných způsobů kování. Příkladem může být rotační kování. [7]



Obr. 2.5 Kovací diagram pro buchary. 1-2 zjemnění zrna vlivem překrystalizace, 3 konec ohřevu, 3-4 manipulace a hrubnutí zrna, 4-5 první úder a nárůst teploty, 5-6 manipulace, 6-7 druhý úder a nárůst teploty, 8 konec procesu tváření. [8]



Obr. 2.6 Kovací diagram pro lisování. 1-2 zjemnění zrna vlivem překrystalizace, 3 konec ohřevu, 3-4 manipulace a hrubnutí zrna, 4-5 první úder a nárůst teploty, 5 konec procesu tváření. [8]

2.4.1 Stupeň prokování a deformace

K vytváření vláken ve struktuře dochází tvářením za tepla, při kterém se mění základní tvar krystalů, dendritů. Protože nastává rekystalizace, deformovaná zrna se mění znovu na zrna zcela nová, díky čemuž mizí textura. Avšak jak už je popsáno v kapitole tváření, nečistoty v povrchových vrstvách krystalů nepodléhají procesu rekystalizace, tudíž nemění svůj tvar a vzniká vláknitá textura, kterou nelze odstranit tvářením ani tepelným zpracováním.

Vláknitost ovlivňuje anizotropii vlastností ve směru vláken a ve směru příčném. Je ovlivněna stupněm prokování p a stupněm deformace. Proto při tváření za tepla je důležitý správný směr vláken. Největší normálové napětí má stejný směr jako směr vláken, tečné napětí má směr kolmý. [1]

Stupeň prokování se může definovat, jako změna průřezu kovaného materiálu v závislosti na kování (Obr. 2.7). S měnícím se stupněm prokování se mění tvar a forma krystalů. Dochází k tvoření vláken. Mechanické vlastnosti se zvyšují ve směru vláken, avšak přílišné prokování by mohlo mít za následek překování, které by vedlo k poškození materiálu. [9]

Pro základní operaci kování pýchováním je dán vztahem:

$$p = \frac{h_0}{h_1} \quad [1] \quad (2)$$

kde:

p = stupeň prokování [1]

h_0 = počáteční výška polotovaru [m]

h_1 = výška polotovaru po tváření [m]

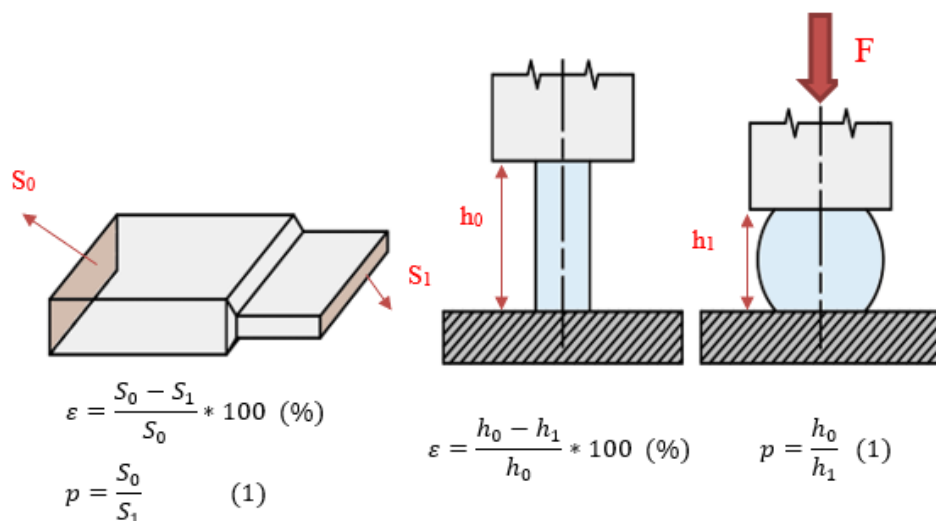
Pro operaci kování prodlužováním je dán vztahem:

$$p = \frac{S_0}{S_k} \quad [1] \quad (3)$$

kde:

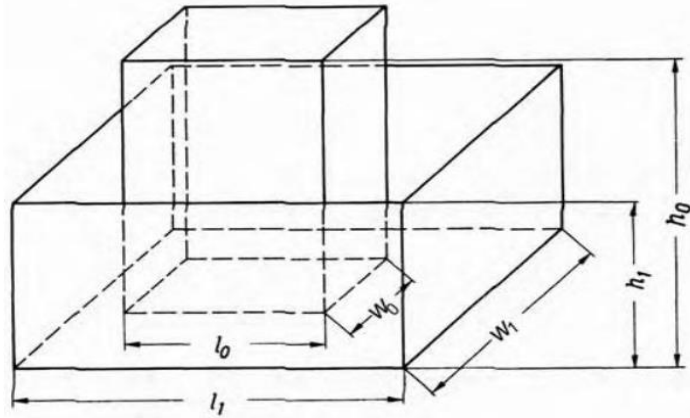
S_1 = počáteční průřez polotovaru [m²]

S_k = průřez polotovaru po prodlužování [m²]



Obr. 2.7 Stupeň prokování a deformace u základních operací kování (prodlužování, pýchování).

Skutečný stupeň deformace je míra rozsahu deformace. Výpočet je dán obecným vztahem mezi nekonečně malým číslem dx a existujícím rozměrem x . Meze pro výpočet integrálu se volí podle rozměru, který se v průběhu tváření změní nejvíce (Obr. 2.8).



Obr. 2.8 Hranol před tvářením s rozměry l_0 , h_0 , w_0 a po tváření s rozměry l_1 , h_1 , w_1 . [10]

Předpokládá se také, že objem tělesa, který má být deformován, zůstává během tváření konstantní. Pokud například dojde ke zmenšení šířky, musí naopak dojít k nárůstu výšky a délky. To znamená, že jedna z těchto tří deformací je vždy rovna zápornému součtu dvou dalších deformací [10]

Integrací s mezemi od x_0 až x_1 nám dává vztah:

$$\varepsilon_x = \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{x} = \ln \frac{x_1}{x_0} \quad [1] \quad (4)$$

kde:

ε_x = skutečný (logaritmický) stupeň deformace [1]

x = proměnná hodnota [m]

x_1 = integrační horní mez [m]

x_0 = integrační dolní mez [m]

Vztah pro výpočet objemu je:

$$V = l_0 * w_0 * h_0 = l_1 * w_1 * h_1 \quad [m^3] \quad (5)$$

kde:

V = objem polotovaru [m³]

l_0 = původní délka polotovaru [m]

w_0 = původní šířka polotovaru [m]

l_1 = délka po tváření [m]

w_1 = šířka po tváření [m]

Stupně deformace se dají rozdělit podle zvoleného rozměru:

- Stupeň pětování

$$\boldsymbol{\varepsilon}_1 = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad [1] \quad (6)$$

- Stupeň laterálního toku

$$\boldsymbol{\varepsilon}_2 = \ln \frac{w_1}{w_0} \quad [1] \quad (7)$$

- Stupeň prodloužení

$$\boldsymbol{\varepsilon}_3 = \ln \frac{l_1}{l_0} \quad [1] \quad (8)$$

2.4.2 Rychlost deformace

Rychlost deformace se určí z rychlosti posuvu nástroje a počáteční výšky polotovaru:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{v}{h_0} \quad [s^{-1}] \quad (10)$$

kde:

$$v \quad = \text{rychlost posuvu nástroje} \quad [m/s]$$

Pokud deformace probíhá v čase t , střední rychlost deformace se může spočítat vzorcem:

$$\mathbf{W}_m = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}}{t_d} \quad [%/s] \quad (9)$$

kde:

$$\boldsymbol{\varepsilon} \quad = \text{stupeň deformace} \quad [\%]$$

$$\mathbf{W}_m \quad = \text{střední rychlost deformace} \quad [\% / s]$$

$$t_d \quad = \text{čas trvání deformace} \quad [s]$$

2.4.3 Kovací síly

Velikost deformační síly F je dána součinem přetvárného odporu a průmětu plochy polotovaru do roviny kolmé ke směru působící síly: [1]

$$F = k_0 * S \quad [N] \quad (11)$$

$$k_0 = k_p * m \quad [MPa] \quad (12)$$

kde:

F = deformační síla [N]

k_0 = přetvárný odpor [MPa]

k_p = přetvárná pevnost [MPa]

S = plocha kovádkla [mm²]

m = koeficient závislý na způsobu tváření, rozměrech a tření [1]

2.4.4 Rozdělení kování

Volné kování

Volné kování můžeme popsat, jako tváření na kováčtině, při kterém tvářený materiál může téci, hlavně ve směru kolmém k působení síly. Nejjednodušší tvářecí proces volného kování je pěchování. Dochází k plastické deformaci mezi dvěma plochami. Používá se při kování plochých výkovek nebo jako předběžná operace pro prokování materiálu, snížení anizotropie a lepší průběh vláken. Další a nejpoužívanější technologií je prodlužování. Je to provedení většího množství pěchování za sebou. Volné kování se dále dělí na kování volné ruční a volné strojní. [1]

Volné ruční kování se používá k výrobě malých výkovek v kusové výrobě. Aby bylo možné obvykle jednoduše materiály zpracovat do určitého požadovaného tvaru, je nutné při tváření užití různých kovářských prací. Jsou to práce, které: [11]

- kov tvarují: pěchování, prodlužování, hlazení, osazování, ohýbání, nakrucování
- kov rozdělují: sekání, prosekávání, děrování
- spojují kovy: svařování, spojování sponami, spojování zděremi

K ohřátí daného kovu slouží kovářská výheň, která může být stabilní či přenosná. Nástroje jsou ruční kladiva (jednoruční, dvouruční), sekáče, kováčtiny různých velikostí a tvarů, kleště pro držení materiálu a různá měřidla. Jako pomocné zařízení pro kovářny se používají např. kovářské svěráky, stolní pákové nůžky, ohýbadla, pilníky. [12]

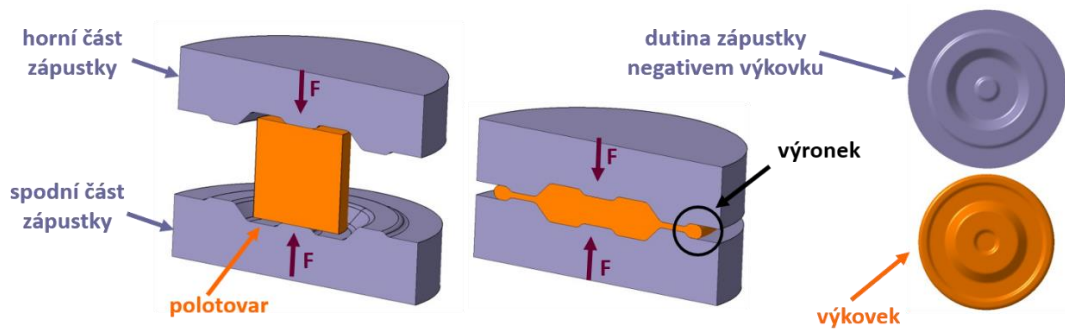
Volné strojní kování se používá k výrobě výkovků od malých hmotností až po hmotnosti několika tun. K tváření se využívá různých strojů, zejména bucharů a lisů. Bucharý působí rázy (úderý beranu), čímž dochází u materiálu k prokování, i když jen do určité hloubky. Proto bucharý působí více rázy a tím se dosáhne většího stupně prokování. Navíc při působení úderý beranu odpadají z materiálu okuje, díky čemu je povrch výkovku čistý. Lisy na rozdíl od bucharu působí klidným zvyšujícím se tlakem (Obr. 2.9), a proto je materiál prokovan v celém průřezu. [1] [12]



Obr. 2.9 Příklad volného strojního kování na lisu. [13]

Zápustkové kování

Při zápustkovém kování dochází k deformování materiálu v dutině zápustky. Zápustka je nejčastěji tvořena dvěma částmi nástroje, jehož dutina odpovídá negativu hotového výkovku. Při Zápustkovém kování dochází k deformování materiálu v dutině zápustky. Zápustka je nejčastěji tvořena dvěma částmi nástroje (Obr. 2.10), jehož dutina odpovídá negativu hotového výkovku. Zápustky kovou objemnější polotovary, než je výsledný výrobek, neboť přebytečný kov vyplní výronkovou drážku kolem zápustkové dutiny a vytvoří výronek. U zápustkového kování je zajištěna vysoká rozměrová přesnost, kvalita povrchu a mechanické vlastnosti. Jako stroje pro tento způsob kování se opět používají lisy i bucharý. Při kování na lisech, kdy působící tvářecí síla plynule vzrůstá, je prioritní směr deformace materiálu ve směru kolmém na směr této síly. V případě bucharů, kdy je síla dynamického charakteru, je prioritní směr deformace v rovnoběžném směru se silou. [8]

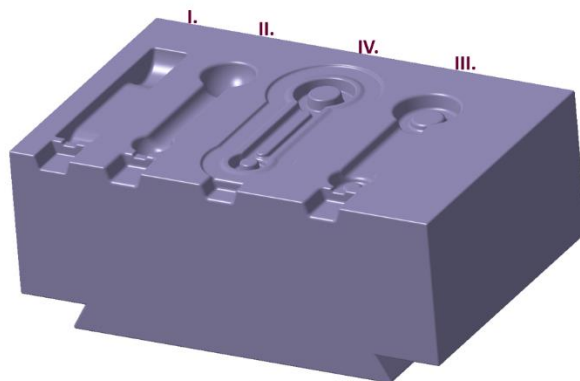


Obr. 2.10 Dvoudílná forma zápustky s výronkovou drážkou. [8]

Při zápustkovém kování záleží počet kovacíh dutin na tvaru výkovku, který je potřeba kováním vyrobít. U složitějších tvarů výkovku je třeba použít postupových zápustek (Obr. 2.11). V nástroji je umístěno více typů dutin, které postupně mění polotovár na požadovaný tvar. Dutiny v zápustce se rozdělují na:

- prodlužovací – kování 1 úderem, malá redukce průřezu, pohyb kovu ve směru osy, malá redukce průřezu
- rozdělovací – kování na 2 až 4 údery s otáčením o 90°, cíl je vytvořit ideální předkovek
- předkovací – kování na 1 až 3 údery, změna průřezu z kruhového na konečný, dutina obsahuje úkosy a zaoblení
- dokončovací – kování na 1 úder, získání požadovaného tvaru, přebytečný materiál se přemísťuje do výronkové drážky

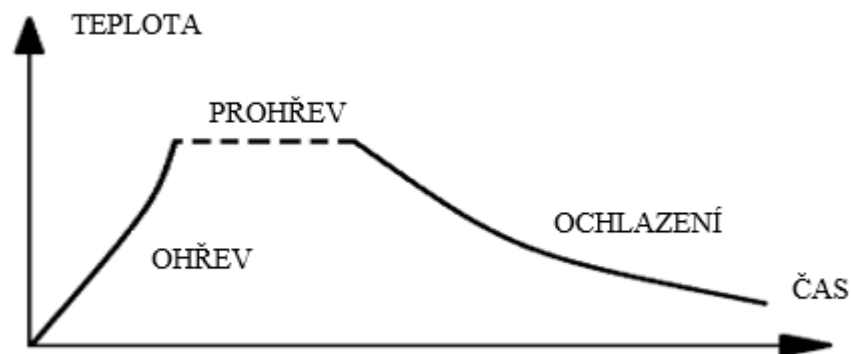
Po vyndání výkovku z formy následují operace ostřížení výronku a probíjení otvorů, pokud se na výkovku nějaké nacházejí. [8]



Obr. 2.11 Postupová zápustka. I. prodlužovací dutina, II. rozdělovací dutina, III předkovací dutina, IV. dokončovací dutina. [8]

2.5 Tepelné zpracování oceli

Tepelné zpracování oceli je postup, při kterém se řízeně mění teploty a někdy také chemické složení oceli. Cílem takového postupu je dosažení požadovaných mechanických vlastností materiálu. Za určitých podmínek může dojít k pozitivním efektům. Průběh při tepelném zpracování je u všech způsobů a kovových materiálu víceméně stejný. Skládá se z ohřevu na potřebnou teplotu, dostatečná výdrž na teplotě a následné ochlazení (Obr. 2.12). Tento postup je možno vícekrát opakovat. Konkrétní druh tváření je navíc charakterizován rychlostí a průběhem ohřevu. Vhodná teplota a rychlost závisí na námi požadovaných vlastnostech a stavbě struktury. U některých postupů je nutné kov zahřívat pozvolna, aby rozdíl mezi teplotou uvnitř a na povrchu nebyl veliký. Velké teplotní rozdíly mohou mít za následek teplotní dilatace, které způsobují pnutí a porušení pevnosti. Pro předejití tomuto jevu se používají pece s regulovatelnou teplotou, někdy více pecí s rozdílnou teplotou. Jiné postupy zase vyžadují prudký ohřev povrchu kovu, jako např. kalení ocelí a litin. [14]

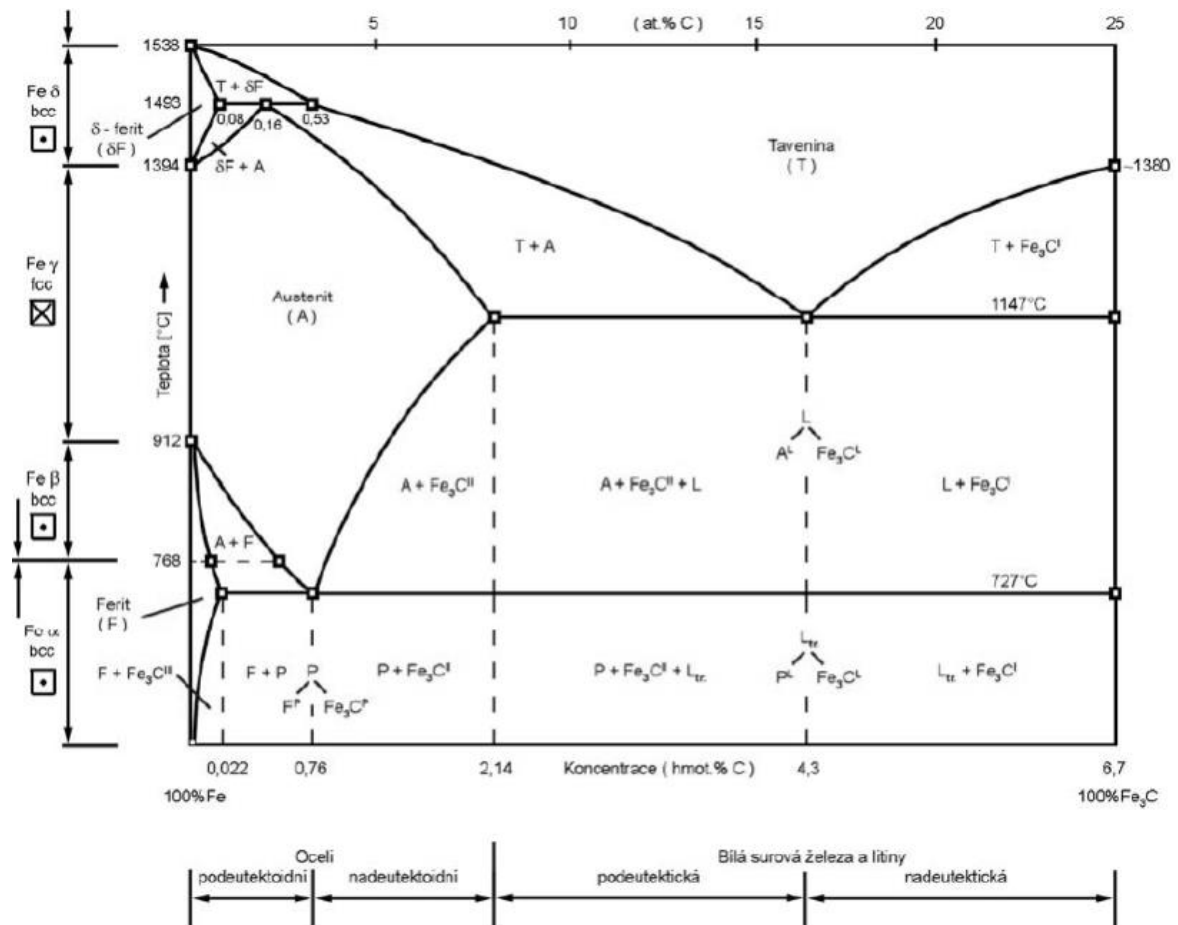


Obr. 2.12 Průběh teplot při tepelném zpracování v závislosti na čase.

Volba výšky konečné teploty ohřevu závisí na strukturních změnách, které probíhají při tepelném zpracování. V některých případech zůstává struktura stejná jako za normálních teplot, v jiných případech se naopak materiál převádí do rozdílných strukturních oblastí. Rychlost ochlazování závisí na cíli zpracování. Pokud má být během chladnutí zachován rovnovážný stav soustavy, probíhá ochlazování pomalu. Příkladem může být chladnutí materiálu v peci s regulovatelnou rychlostí chlazení. V jiném případě může být cílem zpracování rychlé ochlazení, díky kterému se potlačí změny, které by vznikly v rovnovážném stavu. Ochlazování stejně jako ohřev může probíhat stupňovitě, tj. průchod materiálu více druhy prostředí. [14]

2.5.1 Diagram metastabilní soustavy Fe-Fe₃C

Soustava železo – karbid železa je pro technickou praxi nejdůležitější, jelikož má význam pro slitiny s nízkým obsahem uhlíku, což jsou oceli. Na diagramu Fe₃C (Obr. 2.13) lze pozorovat průběh změn při ochlazování slitin železa s různým obsahem uhlíku. Všechny slitiny železa a uhlíku se nacházejí v tekutém stavu, pokud teploty dosahují hodnot nad čarami ACD. Tyto čáry se nazývají likvidus, udávají teploty začátku tuhnutí taveniny. Čáry AECF, zvané solidus, udávají teploty konce tuhnutí. Pod těmito čarami se nacházejí slitiny již v tuhém stavu. Uhlík se v této soustavě vylučuje ve formě karbidu železa (cementit). [15]



Obr. 2.13 Strukturální popis metastabilní soustavy Fe-Fe₃C. [16]

Oceli se dají rozdělit do několika skupin podle obsahu C. Při hodnotách do 0,77 % obsahu uhlíku se oceli nazývají podeutektoidní, jsou to oceli konstrukční s významnou houževnatostí. Při hodnotě 0,77 % je ocel nazývána jako eutektoidní neboli perlitická. Nad hodnotami 0,77 % až do 2,11 % je to ocel nadeutektoidní, nástrojová ocel s velkou tvrdostí a dobrou kalitelností. Slitiny s větším obsahem uhlíku než 2,11 % jsou litiny. Dělí se na podeutektické (2,11 % až 4,3 %), eutektické (4,3 %) a nadeutektické (4,3 % až 6,687 %). [15]

Při ochlazování oceli s obsahem uhlíku do 0,77 % z tekutého stavu, slitina začne tuhnout při teplotě odpovídající bodu, kde se pomyslná svislice dotkne čáry likvidu. Z taveniny se začnou vylučovat krystaly austenitu tuhého roztoku uhlíku v železe γ , a to až do teploty odpovídající bodu na čáře solidu, kde je již všechna ocel ztuhlá. Ocel se změnila v austenit, který se nemění do teploty odpovídající bodu na čáře GS. Po poklesu teploty pod čáru GS se začne vylučovat tuhý roztok uhlíku v železe α , jinak také zvaný ferit, a to až do teploty odpovídající bodu na čáře PS, která je zhruba na hodnotě 727 °C. Při teplotě 727 °C se zbytek austenitu změnil v perlit, tj. směs krystalů feritu a cementitu. Dalším ochlazováním se ferit již nemění. Při ochlazování oceli s obsahem uhlíku 0,77 % se austenit nemění až do teploty 727 °C, kdy se všechn přemění v eutektoid zvaný perlit. [15]

V případě oceli s obsahem uhlíku od 0,77 % až do 2,11 % se při teplotách, které určuje čára SE, začnou vylučovat krystaly cementitu (karbidu železa). Proces probíhá opět do teploty 727 °C, kdy se zbylý austenit mění v perlit, přičemž cementit se již nemění. Tento cementit se nazývá sekundární nebo také segregáční. [15]

U ocelí s obsahem uhlíku v rozmezí 2,11 % až 4,3 % se do konce tuhnutí všechna tavenina v austenit nezmění. Při teplotě 1148 °C, která je dána čárou EC, zbytek taveniny tuhne v ledeburit a sekundární cementit. Při teplotě na čáře SK se austenit mění v perlit. Tavenina s obsahem uhlíku 4,3 % ztuhne najednou při teplotě 1148 °C na ledeburit. [15]

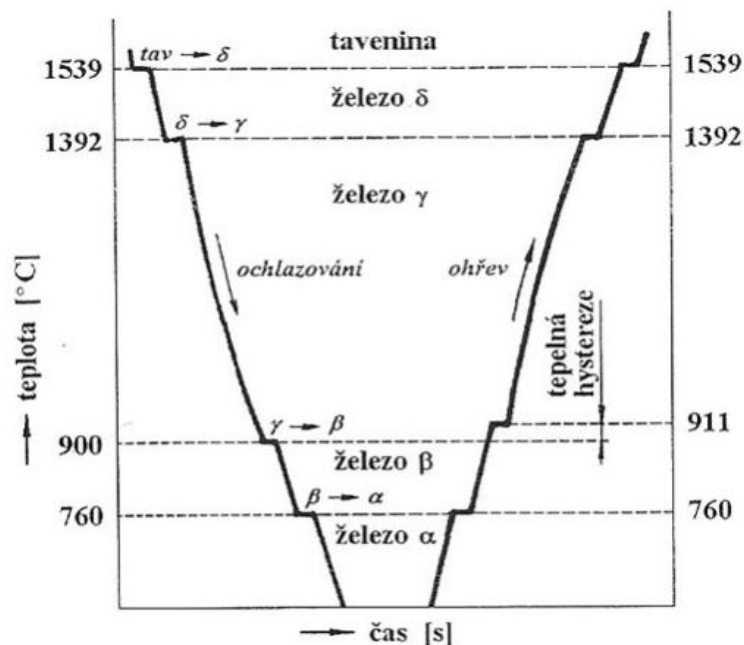
Z chladnoucí taveniny s obsahem 4,3 % až 6,67 % uhlíku při teplotách daných čarou CD se začínají vylučovat krystaly primárního cementitu. Při teplotě 1148 °C zbylá tavenina tuhne v ledeburit. [15]

Čára ECF zvaná také jako eutektikála, udává teplotu začátku tuhnutí chladnoucí taveniny v ledeburit. Čára MOSK udává teploty, při nichž slitina ztrácí magnetičnost. Dále pak čára PSK (eutektoidála) udává teplotu 727 °C, při které se u slitin s obsahem uhlíku do 4,3 % mění zbylý austenit v perlit. [15]

Alotropie železa

Železo se v závislosti na teplotě (Obr. 2.14) vyskytuje ve dvou krystalových modifikacích:

- Modifikace železo α s kubickou prostorově centrovanou krystalovou mřížkou, stabilní při teplotách nižších než 910 °C. Do teploty 760 °C je tato modifikace železa magnetická.
- Modifikace železo γ s kubickou plošně centrovanou krystalovou mřížkou, stabilní v teplotním rozmezí 910-1400 °C.
- Modifikace železo δ s kubickou prostorově centrovanou krystalovou mřížkou, stabilní v teplotním rozmezí 1400-1539 °C. [17]



Obr. 2.14 Závislost modifikací železa na teplotě. [18]

Složka

Složka je v případě binárních rovnovážných diagramů látková náplň soustavy. V tomto smyslu je složka chemicky čistá látka, prvek nebo sloučenina. Účastní se reakcí v soustavě, ale nemůže při nich vznikat či zanikat. [19]

Fáze

Fáze je homogenní oblast soustavy tvořená jednou nebo více složkami (např. austenit jako tuhý roztok uhlíku v železe γ). Je charakteristická určitými chemickými, mechanickými a fyzikálními vlastnostmi, má vlastní krystalovou stavbu a od okolí je oddělena

mezifázovým rozhraním, na němž dochází ke skokovým změnám vlastností. Při změnách teploty nebo složení mohou nastat fázové změny. [19]

tavenina	- roztavená slitina železa a uhlíku
ferit	- intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe α s obsahem uhlíku do 0,018 hm.%
δ ferit	- intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe δ s obsahem uhlíku do 0,01 hm.%
austenit	- intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe γ s obsahem uhlíku do 2,14 hm.%
cementit	- sloučenina Fe_3C s obsahem uhlíku do 6,68 hm.%

Struktura (strukturní směs)

Struktura vznikne složením několika fází (Obr. 2.19). Příkladem může být struktura eutektika skládající se z fází austenitu a cementitu. [19]

ledeburit	- směs austenitu a cementitu vznikající z taveniny při eutektické krystalizaci
perlit	- směs feritu a cementitu vznikající při eutektoidní přeměně austenitu

2.6 Příprava vzorku pro optickou metalografii

Při optické metalografii je metalografický vzorek pozorován pomocí optických mikroskopů, konkrétně jsou používány především mikroskopy světelné nebo speciální metalografické. Vzorek materiálu je připraven ke studiu a zkoumání struktury, která není bez předchozích úprav vzorku pozorovatelná. K zviditelnění této struktury jsou používány série postupů, které mají svá pravidla a musejí se dodržovat, aby nedošlo k změně struktury během přípravy. Příprava vzorku je nezbytná pro zobrazování mikrostruktury, následné analýzy, měření a hodnocení kvality studovaného materiálu. Je možné například identifikovat poměrné zastoupení jednotlivých metalurgických fází kovu, měření mikrotvrlosti materiálu. [20]

2.6.1 Metalografický výbrus

Metalografický vzorek je vzorek, který je připravený za účelem zkoumání struktury. Pokud jedna plocha vzorku je připravena k analýze, nazývá se výbrus. Kromě výbrusů je také možné analyzovat speciálně připravené tenké řezy, pozorovatelné pomocí mikroskopů na průchod světla nebo transmisních elektronových mikroskopů. Na základě materiálu vzorku, který má být analyzován a s ohledem na použitou mikroskopickou metodu, je nutné zvolit odpovídající postup pro přípravu. [20]

2.6.2 Postupy přípravy výbrusů

Obecné základní přípravy konvenčních výbrusů začínají odběrem a preparací materiálu, dále pak pokračují broušením, leštěním a leptáním pro lepší viditelnost struktury. [20]

Odběr vzorku

Vzorky z měkkých materiálů, které jsou také snadno obrobitelné, jsou obvykle odebrány řezáním či frézováním. Tvrdší a hůře obrobitelné materiály se dělí odlamováním nebo rozbrušováním pod chladicí kapalinou nebo pomocí elektrojiskrových řezaček. Při odběru vzorku je důležité, aby se struktura neměnila v důsledku tepelného a mechanického působení. Teplota nesmí dosáhnout hodnot, při nichž by docházelo k fázovým transformacím. Nevhodným typem odběru materiálu je řezání kyslíko-acetylenovým plamenem, či obloukem. Velikost vzorku se volí v závislosti na možnostech mikroskopu, pomocí něhož budeme pozorovat strukturu. Při odběru vzorek bývá označen tak, aby byla zřejmá poloha plochy výbrusu vůči předmětu, jehož rozbor má být proveden. Je také třeba dbát na správné značení vzorků, aby nedošlo k jejich případné záměně a ztrátě informací. [20]

Preparace vzorku

Pokud nastane případ, že vzorek má velmi malé rozměry nebo pokud je velmi křehký, měkký a je potřeba se dobrousit do určité výšky vzorku, pak je nezbytné vzorek zalít za studena či zalisovat za tepla.

Při zalévání za studena se vzorek umísťuje do formy tak, aby plocha určená k úpravě byla v kontaktu se dnem formy. Vzorek se zalévá připravenou hmotou, která se nechává vytvrdit. Jako zalévací chemikálie se používají epoxidové, práškové akrylátové nebo polyesterové pryskyřice promíchané s příslušným tvrdidlem v určitém poměru. Tento proces je možné doplnit o vakuovou preparaci, při níž se hmota vytvrzuje ve vakuové komůrce pod tlakem. Tato procedura zajistí vyplnění všech pórů a zamezuje vznik vzduchových bublin v pryskyřici. Zalisování za tepla probíhá při teplotách 100 °C až 180 °C pod vysokým tlakem 30 kN až 50 kN. Jako forma se používá teplotní komůrka lisu, kam se vloží vzorek a přidá se pryskyřice ve formě prášku. [20]

Broušení vzorku

Cílem broušení vzorku je odstranění povrchových nerovností. Provádí se ručně, či mechanizovaně. Při ručním broušení brusným papírem pohybujeme vzorkem stále jedním směrem. Po dosažení relativně rovinného povrchu pomocí drsného brusného papíru se vzorek opláchne, a přechází se na brusný papír s menší drsností. Broušení je prováděno do té doby, dokud zcela nezmizí drážky značící předchozí směr broušení. Brusné papíry se obvykle používají SiC a Al₂O₃ se zrnitostí 60 až 2400 dle normy FEPA. Mechanizované broušení se provádí na metalografických bruskách. Vzorek je při broušení přitlačován na uchycený brusný papír, rotující na vodorovném kotouči. Běžně rychlosti otáčení jsou 30 až 150 otáček za minutu. Vzorek je chlazen chladícím médiem, aby nedošlo k znehodnocení struktury. Při přechodu na jemnější brusný papír se vzorek opět oplachuje a brousí se ve směru kolmém k předchozímu. [20]

Leštění vzorku

Při leštění dochází hlavně k deformaci a snížení povrchové drsnosti. Úbytek materiálu je minimální, případně žádný. Leštění se provádí mechanicky nebo elektrolyticky. Mechanické leštění má velmi podobný postup jako broušení. Vzorek je přitlačován na rotující leštící kotouč s leštícím médiem. Potahový materiál kotouče bývá většinou samet, satén, flanel nebo kord. Během leštění pohybujeme se vzorkem proti směru otáčení kotouče tak dlouho, dokud nedosáhneme zrcadlového lesku. Elektrolytické leštění se provádí tak, že vzorek zapojený jako anoda je ponořen v elektrolytu. Při průchodu elektrického proudu mezi vzorkem a katodou se za vhodných podmínek vytvoří na povrchu vzorku anodický film s malou elektrickou vodivostí. Film dosahuje maximální tloušťky v místech prohlubní vzorku a minimální tloušťky nad výstupky. Proudová hustota dosahuje největších hodnot v místech nejmenší tloušťky. Výstupky se rozpouštějí a povrch vzorku se uhlazuje. [20]

Leptání vzorku

Pomocí leptání vzorků vyvoláváme jejich mikrostrukturu. Tento proces se zpravidla provádí ponořením vzorku do leptacího činidla na určitou dobu. Každý materiál vyžaduje určitou techniku leptání včetně volby leptadla. Mezi základní způsoby leptání patří chemické leptání, leptání na hranice zrn, plošné a selektivní leptání. Chemické leptání je proces, při kterém nanášíme na povrch vzorku chemické leptadlo. Jelikož jednotlivé strukturní součásti mají svoji vlastní rozpouštěcí schopnost, dochází po působení leptadla ke vzniku povrchového reliéfu, díky kterému strukturní součásti zviditelní. Leptání na hranice zrn se

používá u většiny materiálů. K naleptání dochází hlavně v oblasti hranic zrn, neboť atomy v této oblasti mají největší volnou energii. Dochází k zviditelnění jednotlivých zrn, což umožňuje jejich studium. Plošné leptání se používá ke zkoumání jednotlivých zrn. U každého zrna s rozdílnou orientací je rozdílná leptatelnost, díky které vzniká povrchový reliéf. Různě orientovaná zrna jsou tedy naleptána do jiné hloubky. Selektivní leptání je metoda, při které vzniká povrchový reliéf v důsledku rozdílné schopnosti strukturních součástí odolávat leptadlům. Fáze jsou naleptány do různých hloubek, a proto jsou při mikroskopickém zkoumání různě zbarvené. [20]

2.6.3 Hodnocení výbrusů

Metalografické výbrusy se hodnotí makroskopicky nebo mikroskopicky, a to v neleptaném nebo naleptaném stavu. Při makroskopickém zkoumání jsou výbrusy pozorovány ve skutečné velikosti, případně při malém zvětšení. K mikroskopickému pozorování se používají světelné mikroskopy zvětšením do 1000x, laserové konfokální mikroskopy se zvětšením do 10000x. Pokud je třeba vyššího zvětšení, používá se elektronová mikroskopie. [20]

2.7 Zkoušky tvrdosti

Tvrdot je definována jako odpor, který klade materiál proti vniknutí cizího tělesa. Hodnoty tvrdosti se uvádějí často bezrozměrně, případně s udáním způsobu měření či příslušné stupnice. Měření tvrdosti probíhá na zkušebních vzorcích nebo na hotových výrobcích. Zkoušky tvrdosti lze rozdělit podle různých hledisek, nejčastěji na zkoušky vrypové, odrazové a vnikací. Mezi nejpoužívanější vnikací zkoušky tvrdosti patří zkouška podle Brinella, Rockwella a Vickerse. [21]

2.7.1 Zkouška podle Brinella

Zkouška je prováděna podle normy ČSN 42 0371. Tvrdot je zjišťována vtlačáním ocelové kuličky nebo kuličky z tvrdokovu o určitém průměru do zkušebního vzorku zatěžující silou, která má kolmý směr k povrchu vzorku. Po odlehčení se měří průměr vtisku d . Průměr kuličky je závislý na tloušťce měřeného materiálu. Je zde pravidlo, že minimální tloušťka materiálu musí být alespoň desetinásobek hloubky vtisku. Síla zatížení kuličky je konstantní, u slitin železa bývá zpravidla 10 až 15 sekund. Tvrdot podle Brinella se označuje písmeny HBW (kulička z tvrdokovu) nebo HBS (ocelová kulička). Příklad značení této tvrdosti může být 350 HBS 10/30/20 znamenající tvrdost podle Brinella 350 měřená s ocelovou kuličkou o průměru 10 mm zatěžující silou 300 N po dobu 20 s. [21]

Výsledná tvrdost podle Brinella se počítá podle vztahu:

$$HB = \frac{0,102 * F_{HB}}{S_{HB}} \quad [1] \quad (13)$$

kde:

HB	= tvrdost podle Brinella	[1]
F _H	= zatěžující síla	[N]
S _H	= plocha vtisku	[m ²]

2.7.2 Zkouška podle Rockwella

Zkouška je prováděna podle normy ČSN 42 0373. Tvrdost se zjišťuje podle Rockwellova tvrdoměru. Měření probíhá na základě měření rozdílu hloubky vtisku vnikajícího tělesa (ocelová kulička nebo diamantový kužel) mezi dvěma stupni zatížení. Vrcholový úhel kuželu je 120° a poloměr kulové části je 0,2 mm (pro diamantový kužel se zkouška značí HRA nebo HRC). Kulička má průměr 1,5875 mm (zkouška se značí HRB). Kužel nebo kulička na povrchu vzorku nejprve zatížena předběžnou silou 100 N, aby se překonal vliv povrchových nepřesností. Zatěžovací síla se poté pozvolna zvyšuje na hodnotu zatížení předepsanou normou. Poté se síla opět zmenšuje na předběžné zatížení 100 N, a probíhá následné zjištění hodnoty přírůstku hloubky h vtisku oproti výchozí poloze při 100 N. Označení tvrdosti podle Rockwella se zapisuje počátečními písmeny zkoušky HR, dále druhem zkoušky a hodnotou tvrdosti např. HRC60. Rockwellova zkouška je rychlá a relativně jednoduchá, slouží pro měření velké série výrobků. [21]

Normalizované zkoušky tvrdosti

HRA – Tvrdost určená diamantovým kuzelem při celkovém zatížení 600 N, používané pro slinuté karbidy a tenké povrchové vrstvy.

HRB – Tvrdost určena ocelovou kuličkou při celkovém zatížení 1000 N, používané pro měkké kovy.

HRC – Tvrdost určená diamantovým kuzelem při celkovém zatížení 1500 N, používané pro tvrdé, kalené a popouštěné materiály. [21]

2.7.3 Zkouška podle Vickerse

Zkouška je prováděna podle normy ČSN 42 0374. Do materiálu je vtlačován diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° mezi protilehlými stěnami. Měří se střední délka obou úhlopříček vtisku. V praxi se používají tabulky, kde podle délky úhlopříčky a velikosti zatěžující síly lze odečíst odpovídající tvrdost. Metoda měření tvrdosti

podle Vickerse je přesná a málo závislá na zatížení. Velikost zatěžující síly se pohybuje v rozmezí od 10 do 1000 N a doba zatížení 10 až 180 s. Použité zatížení se poté píše do značení tvrdosti, např. měření se zatížením 10 kg se zapisuje jako HV10. [21] Tvrdost podle Vickerse se počítá podle následujícího vztahu:

$$HV = \frac{0,189 * F_H}{U^2} \quad [1] \quad (14)$$

kde:

U = průměrná hodnota úhlopříček vtisku [m]

3 Experimentální část

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit a porovnat změny mechanických vlastností, konkrétně změny tvrdosti materiálu a změny vnitřní struktury v závislosti na různých tvářecích parametrech. Deformace byly prováděny za tepla při různých teplotách, rychlostech deformací a rychlostech ochlazování. Pro následné hodnocení těchto vzorků byla provedena zkouška tvrdosti podle Vickerse a mikroskopické pozorování vnitřní struktury. Měření probíhalo v laboratořích Katedry strojírenské technologie TU v Liberci.

3.1 Zkušební vzorky

Jako základní materiál pro experiment byla zvolena ocel s označením S355J2 podle normy ČSN 41 1503. S355J2 je konstrukční uhlíková nelegovaná jakostní ocel válcována za tepla. Tato ocel je vhodná pro svařované konstrukce, které mohou podléhat statickému i dynamickému namáhání, pro výrobu tvářených součástí, ohýbaných profilů a trubek. Experiment byl prováděn na šestnácti stejných zkušebních vzorcích ve formě kruhových tyčí o průměru 10 mm (Obr. 3.1). V Tab. 3.1 je uvedeno chemické složení oceli.

Tab. 3.1 Chemické složení oceli S355J2.

Ocel S355J2						
Prvek	Fe	C	Si	Mn	P	S
Max hm. %	Báze	0,2	0,1 – 0,7	1,6	0,035	0,045

3.2 Příprava vzorků

Ze zkušebního materiálu S355J2 bylo nejprve pomocí pásové pily na kov (Obr. 3.1) nařezáno šestnáct kusů vzorků. Každý vzorek měl přibližnou délku 95 mm.



Obr. 3.1 Pásová pila na kov. [22]

Po nařezání následovalo zarovnání čela na 90 mm a sražení hran na hrotovém soustruhu značky SZIM (Obr. 3.2), aby v pozdějším testování bylo možné vzorky správně uchytit do čelistí lisu.

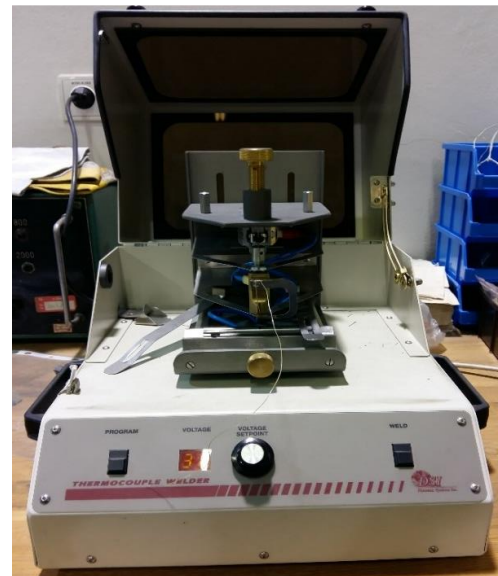


Obr. 3.2 Hrotový soustruh.

Dalším a posledním krokem v přípravě vzorků pro řízenou deformaci bylo pájení termočlánků k povrchu materiálu (Obr. 3.3), bez kterých by nebylo možné zahřát kov na námi zvolenou teplotu. Pájení se provádělo na termočlánkové svářečce Thermocouple Welder (Obr. 3.4). Použité kovy pro termočlánky byly alumel a chromel.



Obr. 3.3 Vzorky s připájenými termočlánky.



Obr. 3.4 Termočlánková svářečka Thermocouple Welder.

3.3 Řízená deformace vzorků

Řízená deformace materiálu byla prováděna na testovacím systému Gleeble 3500 (Obr. 3.5) od společnosti Dynamic Systems Inc, používaném k termicko-mechanickému zkoumání materiálů.



Obr. 3.5 Termomechanický testovací systém Gleeble 3500. [23]

Jako řídicí parametry pro kování byly zvoleny dvě teploty, dvě deformace, dvě rychlosti deformace a dvě rychlosti ochlazování. Tyto parametry jsou zapsány v tabulce 3.2.

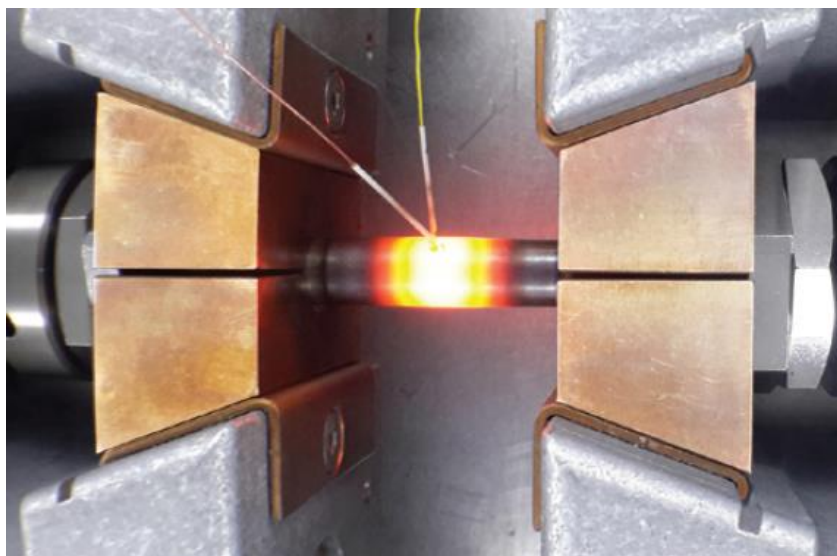
Tab. 3.2 Parametry měření.

vzorek	teplota [°C]	deformace [mm]	rychlost deformace [mm/s]	rychlost ochlazování [°C/s]
1	900	5	0,167	5
2	900	5	0,167	15
3	900	10	0,167	5
4	900	10	0,167	15
5	900	5	10	5
6	900	5	10	15
7	900	10	10	5
8	900	10	10	15
9	1100	5	0,167	5
10	1100	5	0,167	15
11	1100	10	0,167	5
12	1100	10	0,167	15
13	1100	5	10	5
14	1100	5	10	15
15	1100	10	10	5
16	1100	10	10	15

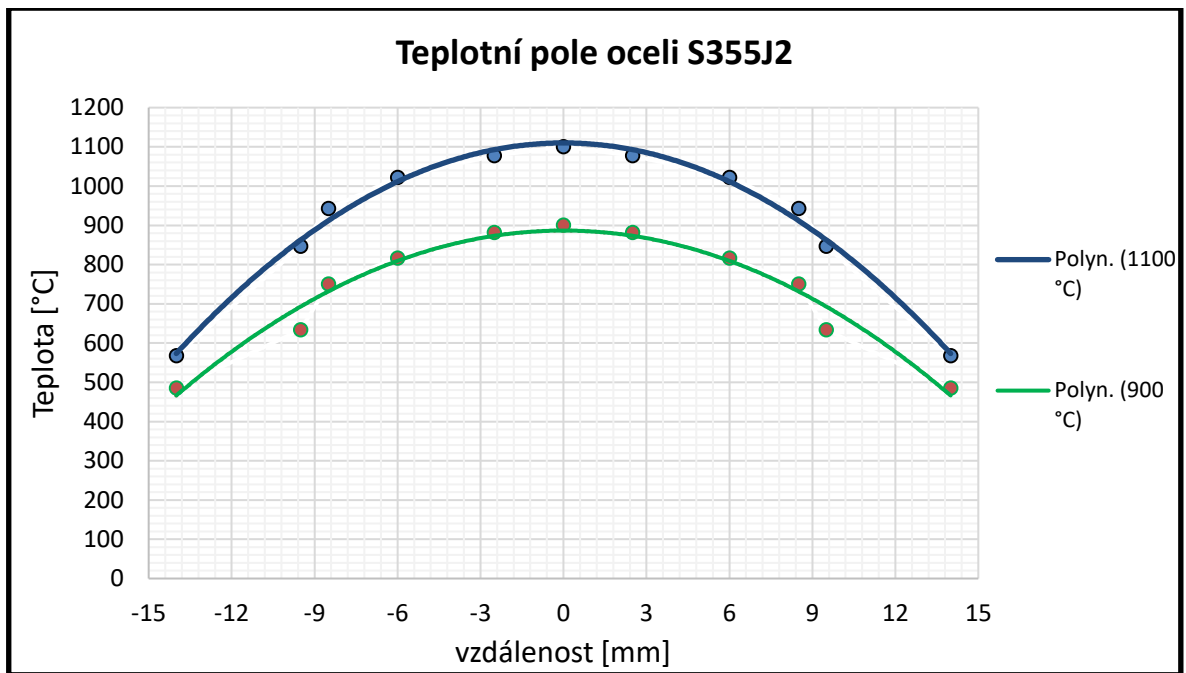
V prvním kroku bylo nejprve nutné správně upevnit vzorky do austenitických vysokolegovaných ocelových čelistí stroje (Obr. 3.7) a zapojit termočlánky. Volná délka vzorku mezi čelistmi činila 40 mm. Po spuštění zkoušky bylo v testovací komoře vytvořeno vakuum. Vzorky byly postupně zahřívány na předem zvolenou kovací teplotu rychlostí 5 °C/s. Pak byla nastavena výdrž na dané teplotě po dobu 1 minuty pro lepší rozložení teplot. Teplotní pole oceli S355J2 je graficky znázorněné na Obr. 3.8. Vypracování toho teplotního pole nebylo součástí mé bakalářské práce, proto tento obrázek byl pouze převzat z diplomové práce viz. zdroje. Dále byla zahájena deformace vzorku, při které obě čelisti začali stlačovat materiál a tím docházelo k pěchování ve střední části vzorku. Poslední fází bylo chlazení vzorku na teplotu 20 °C a následné vyjmutí z čelistí.



Obr. 3.6 Ukázka vzorku po řízené deformaci (vzorek 16).



Obr. 3.7 Detail hydraulických čelistí a zahřívání vzorku ve vakuové komoře. [24]



Obr. 3.8 Grafické znázornění rozložení teplot ve volné části vzorku z oceli S355J2 s použitím vysokolegovaných čelistí. [25]

3.4 Hodnocení struktury

Nejdříve bylo nutné provést metalografickou přípravu vzorku, aby bylo možné strukturu vůbec pozorovat. Deformované vzorky byly nařezány uprostřed v podélném směru na rozbrušovací pile Buehler (Obr. 3.9 a).



a)

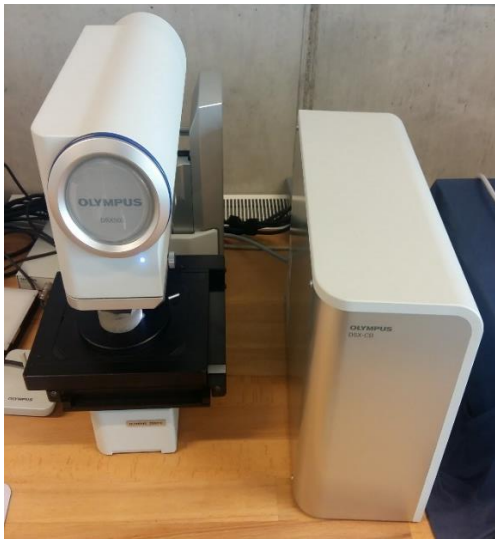


b)

Obr. 3.9 a) Rozbrušovací pila Buehler na metalografické vzorky, **b)** bruska/leštička Phoenix 4000.

Dále proběhlo zalití materiálu do pryskyřice (Dentacryl), broušení na brusce Phoenix 4000 (Obr. 3.9 b) za účelem odstranění povrchových nerovností, a proces leštění, aby se odstranily rýhy po broušení. Nakonec byl povrch vzorku naleptán ve 3 % Nitalu.

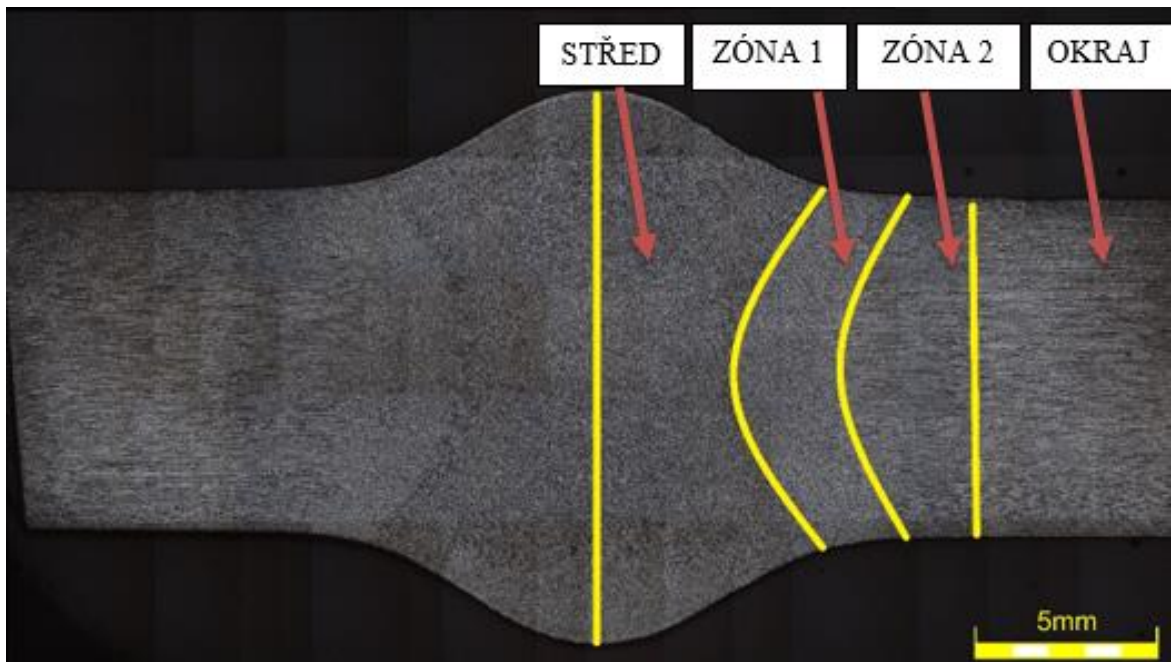
Zkoumání struktury probíhalo na hotových výbrusech na mikroskopu Olympus DSX500 (Obr. 3.10). Na mikroskopu byly fotografie pořizovány vždy ze 4 oblastí s různou strukturou, tj. uprostřed, zóna 1, zóna 2, okraj vzorku viz. Obr.3.12. Ukázky jednotlivých oblastí vzorku 15 s 500x zvětšením jsou na obrázcích 3.13, 3.14, 3.15 a 3.16.



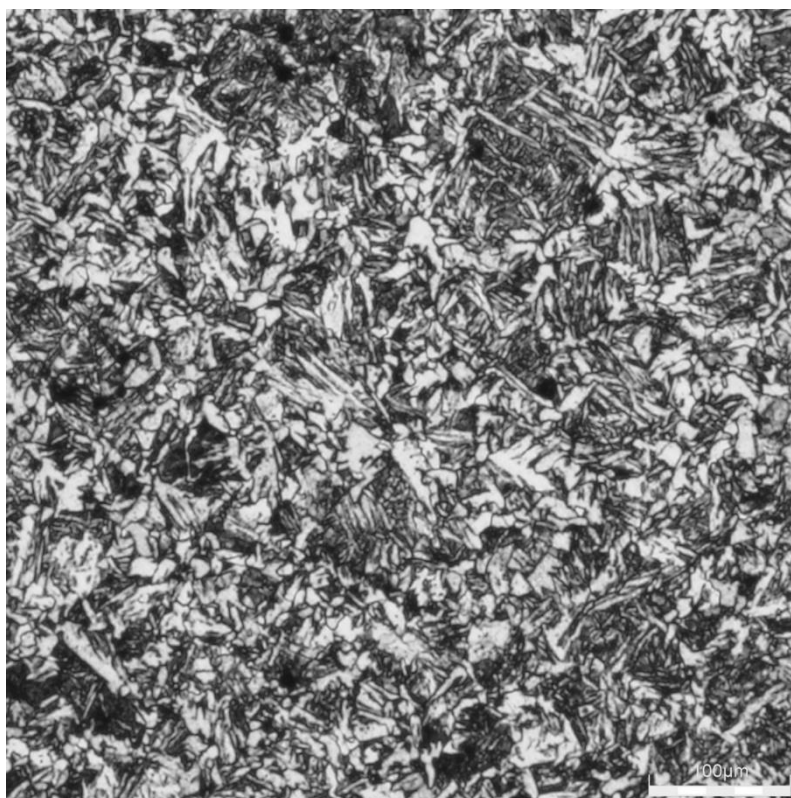
Obr. 3.10 Mikroskop Olympus DSX500.



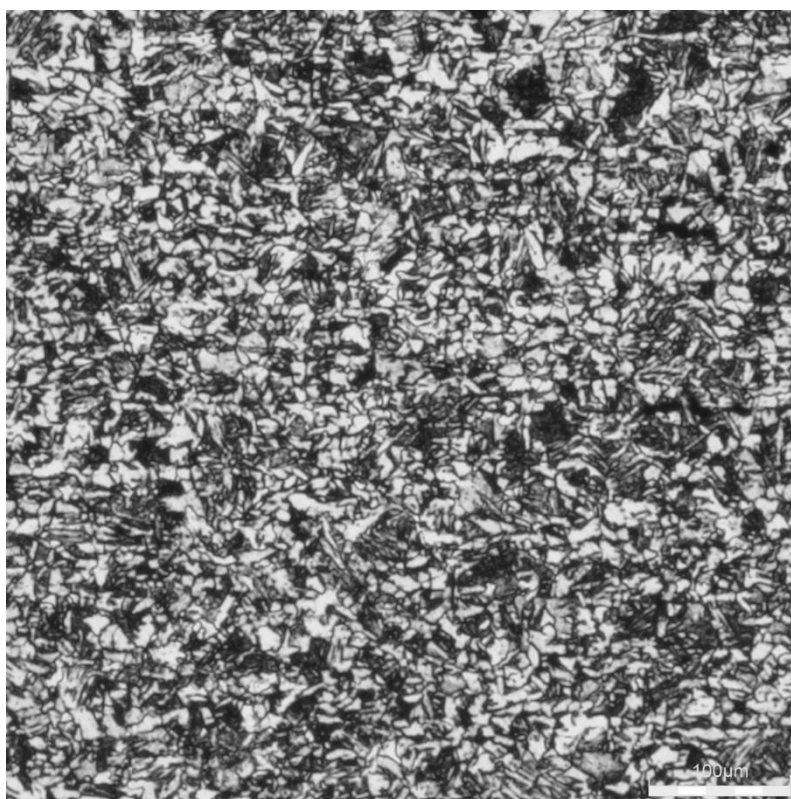
Obr. 3.11 Hotový výbrus zalitý v pryskyřici.



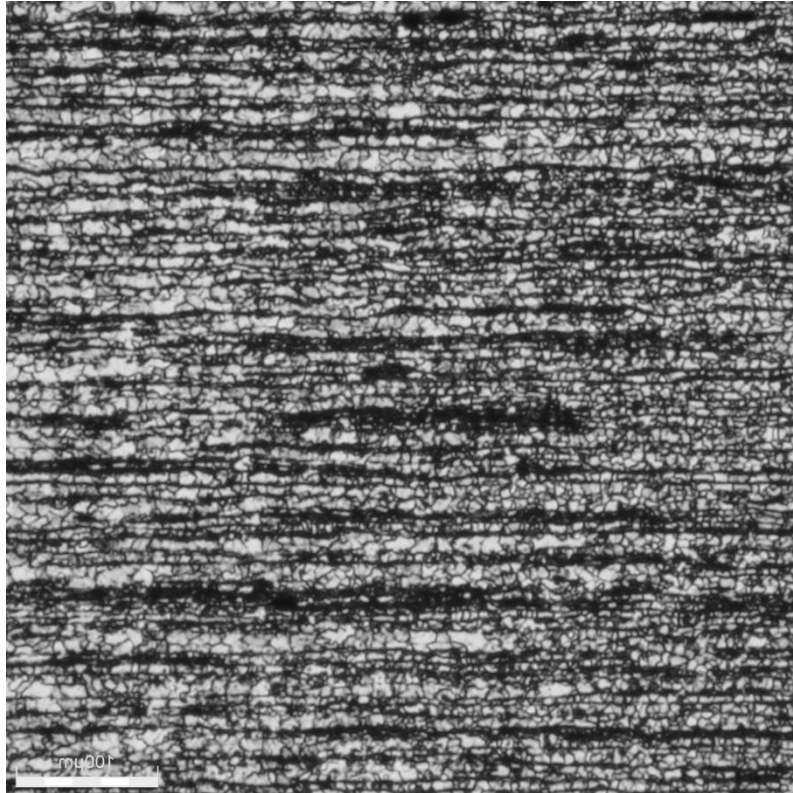
Obr. 3.12 Fotka vzorku 15 (teplota 1100 °C, deformace 10 mm, rychlost def. mm/s, ochlazování 5 °C/s). Rozdělení vzorku na 4 oblasti s postupně měnící se strukturou.



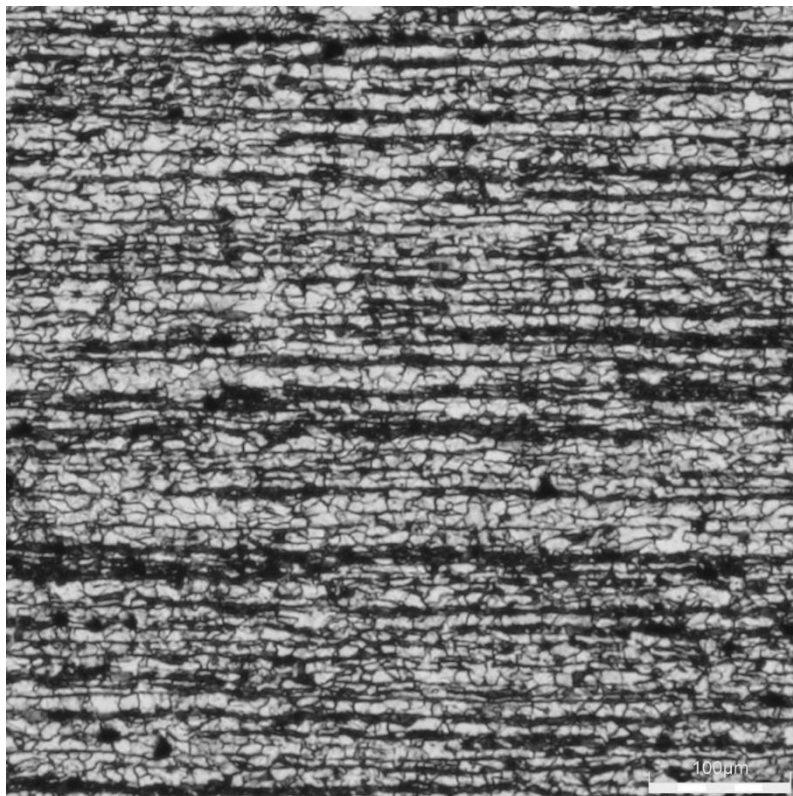
Obr. 3.13 Struktura ve středu vzorku při zvětšení 500x.



Obr. 3.14 Struktura vzorku v zóně 1 při zvětšení 500x.



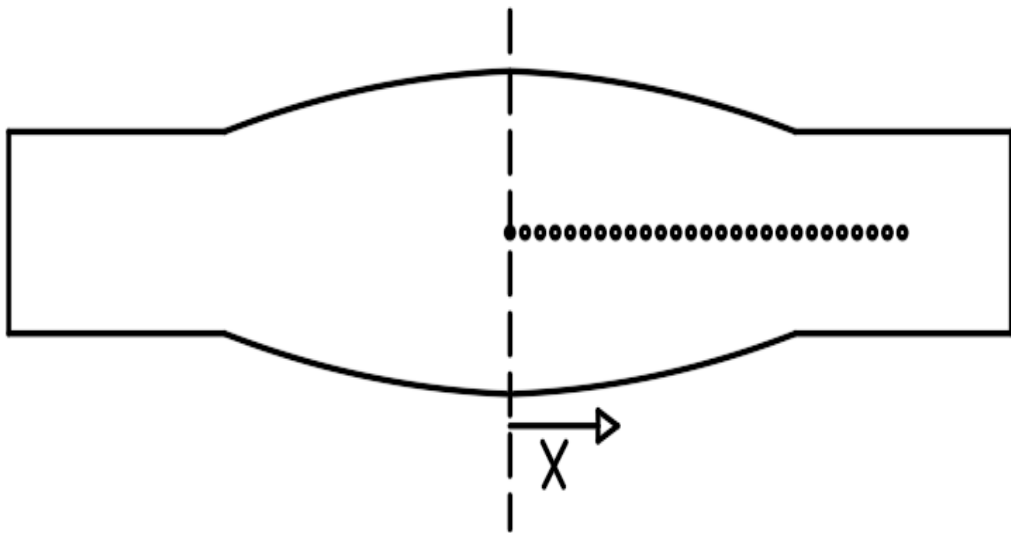
Obr. 3.15 Struktura vzorku v zóně 2 při zvětšení 500x.



Obr. 3.16 Struktura na okraji vzorku při zvětšení 500x.

3.5 Měření tvrdosti

Měření tvrdosti bylo provedeno metodou podle Vickerse. Jako zatěžující síla byla zvolena hodnota 50 N po dobu 5 sekund. Z uvedených hodnot vychází označení metody HV5. Měření probíhalo na tvrdoměru Qness Q30A (Obr. 3.18). Pro každý vzorek byla zvolena jedna řada uprostřed v podélném směru vzorku sestavující se z 27 bodů měření tvrdosti. Jednotlivé body měli mezi sebou rozestup 0,5 mm. Schéma pro názornou ukázkou měřených bodů je na Obr. 3.17.

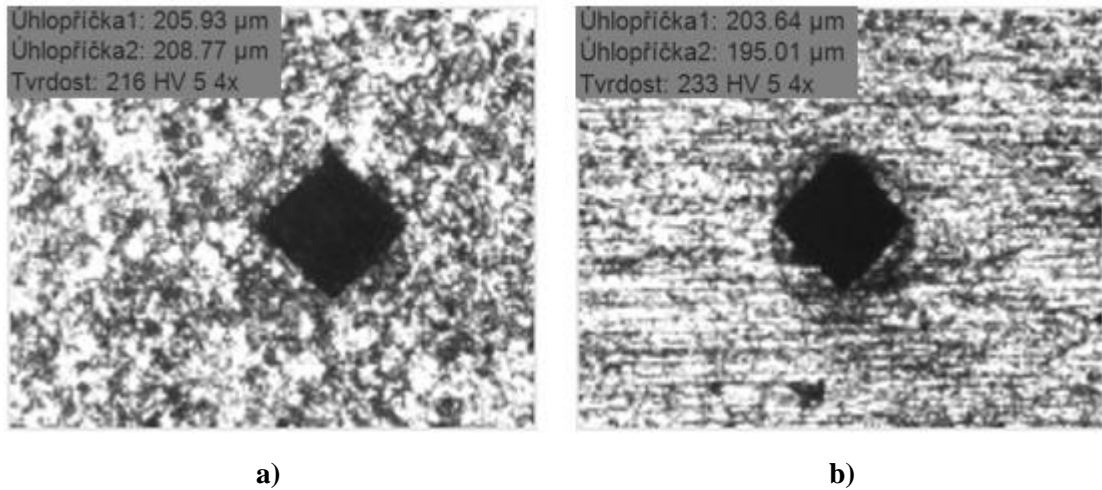


Obr. 3.17 Schéma bodu měření tvrdosti na vzorku.



Obr. 3.18 Tvrdoměr Qness Q30A.

Po provedení vpichů nastalo automatické měření úhlopříček. Téměř všechny úhlopříčky musely být přeměřeny ručně, neboť automatické rozeznání hranic vtisků nebylo možné kvůli špatnému kontrastu, který vznikl předešlým naleptáním vzorku. Z velikostí úhlopříček vtisků byly vypočteny výsledné tvrdosti HV5. Tento postup byl proveden u 16 deformovaných vzorků a 1 nedeformovaného výchozího vzorku. Příklady dvou vtisků jsou uvedeny na Obr. 3.19.



Obr. 3.19 Vtisky po měření tvrdosti (vzorek 16).

a) deformovaná oblast uprostřed vzorku b) nedeformovaná oblast na okraji vzorku

3.5.1 Výsledné hodnoty měření

Tab. 3.3 Přehled tvrdosti u nedeformovaného výchozího vzorku.

číslo měření	souřadnice x [mm]	tvrdost [HV5]	číslo měření	souřadnice x [mm]	tvrdost [HV5]
		výchozí vzorek			výchozí vzorek
1	0,5	220	11	5,5	214
2	1	218	12	6	218
3	1,5	214	13	6,5	220
4	2	218	14	7	217
5	2,5	217	15	7,5	221
6	3	215	16	8	220
7	3,5	223	17	8,5	222
8	4	216	18	9	222
9	4,5	219	19	9,5	219
10	5	223	20	10	224

Tab. 3.4 Přehled tvrdosti u vzorků 1 až 8.

číslo měření	souřadnice x [mm]	tvrdost [HV5]							
		vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	vzorek 6	vzorek 7	vzorek 8
1	0	169	184	165	188	176	186	172	189
2	0,5	165	180	169	186	173	189	172	187
3	1	171	183	163	190	172	186	171	190
4	1,5	168	192	170	184	176	187	176	184
5	2	169	188	168	185	172	182	177	188
6	2,5	170	189	164	180	175	183	174	183
7	3	170	186	166	183	172	184	172	183
8	3,5	168	186	166	178	172	182	177	180
9	4	167	182	168	186	170	187	173	187
10	4,5	173	180	170	187	179	187	170	183
11	5	170	185	167	190	176	179	174	191
12	5,5	168	178	169	183	174	177	175	198
13	6	167	181	170	184	178	183	182	203
14	6,5	171	176	169	183	183	182	188	208
15	7	166	172	167	180	183	191	186	209
16	7,5	172	178	167	186	185	194	195	211
17	8	176	187	175	181	193	194	205	213
18	8,5	191	204	182	187	200	200	215	216
19	9	190	202	191	191	208	204	214	223
20	9,5	194	204	195	207	214	204	217	224
21	10	198	214	209	212	213	212	221	224
22	10,5	203	219	214	219	216	213	226	221
23	11	211	223	219	218	223	217	222	226
24	11,5	207	229	226	222	227	222	235	227
25	12	207	231	228	224	231	227	221	228
26	12,5	211	231	235	222	231	224	231	230
27	13	211	236	232	222	228	222	235	226

Tab. 3.5 Přehled tvrdosti u vzorků 9 až 16.

číslo měření	souřadnice x [mm]	tvrdost [HV5]							
		vzorek 9	vzorek 10	vzorek 11	vzorek 12	vzorek 13	vzorek 14	vzorek 15	vzorek 16
1	0	201	221	198	211	193	227	199	216
2	0,5	205	222	200	214	187	227	191	208
3	1	200	233	198	230	190	232	187	221
4	1,5	204	228	193	222	192	234	191	228
5	2	196	236	195	229	191	226	199	223
6	2,5	197	231	193	230	195	223	195	227
7	3	206	223	189	214	195	223	193	221
8	3,5	198	229	193	223	185	225	203	218
9	4	205	228	179	222	187	223	180	218
10	4,5	197	225	179	218	186	223	176	221
11	5	197	216	176	219	187	224	185	211
12	5,5	184	219	174	217	187	218	180	202

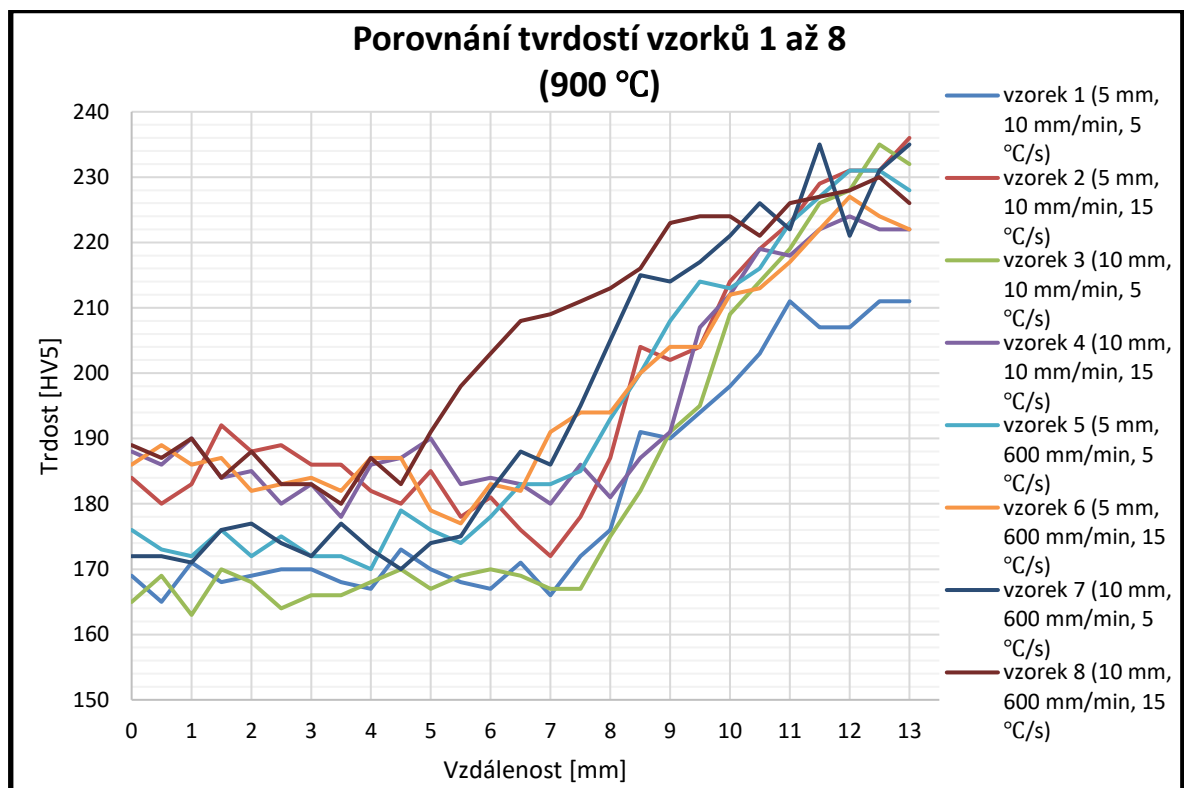
13	6	181	219	170	214	184	198	181	198
14	6,5	180	212	168	218	184	190	175	193
15	7	179	202	167	212	171	183	171	187
16	7,5	178	198	168	209	172	179	170	187
17	8	170	192	166	202	173	183	169	187
18	8,5	171	193	171	192	171	179	172	188
19	9	177	191	168	190	170	181	170	188
20	9,5	173	187	168	187	170	180	169	197
21	10	173	186	176	189	167	177	184	210
22	10,5	169	186	185	187	173	184	190	219
23	11	173	195	202	189	181	190	203	222
24	11,5	180	193	209	205	189	204	213	227
25	12	192	205	211	207	204	208	211	232
26	12,5	207	212	221	213	204	215	215	231
27	13	210	218	224	226	213	218	225	233

3.6 Vyhodnocení výsledků

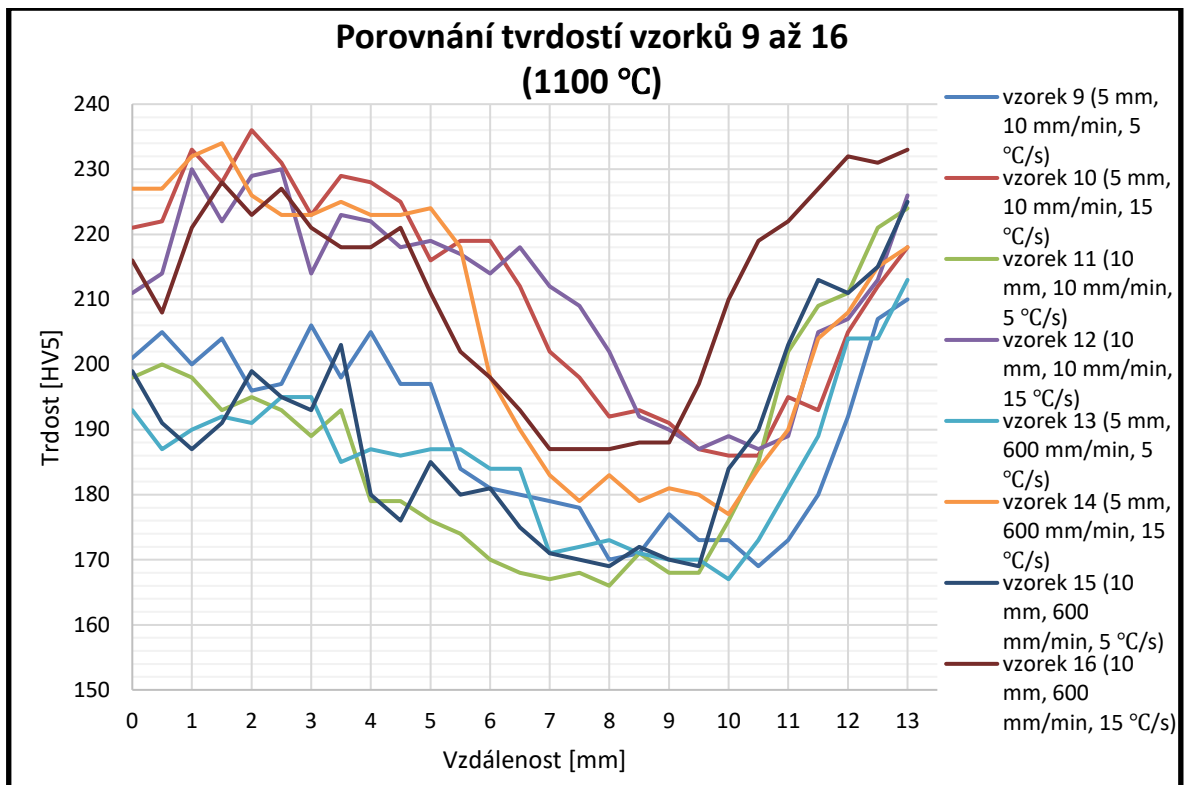
V následujících odstavcích bude obsaženo porovnání a vyhodnocení výsledků měření. Vyhodnocení bude rozděleno do dvou částí. V první části se bude jednat o naměřené hodnoty tvrdosti z tabulek 3.3, 3.4 a 3.5. Druhá část bude zaměřena na struktury deformovaných vzorků.

3.6.1 Tvrdost

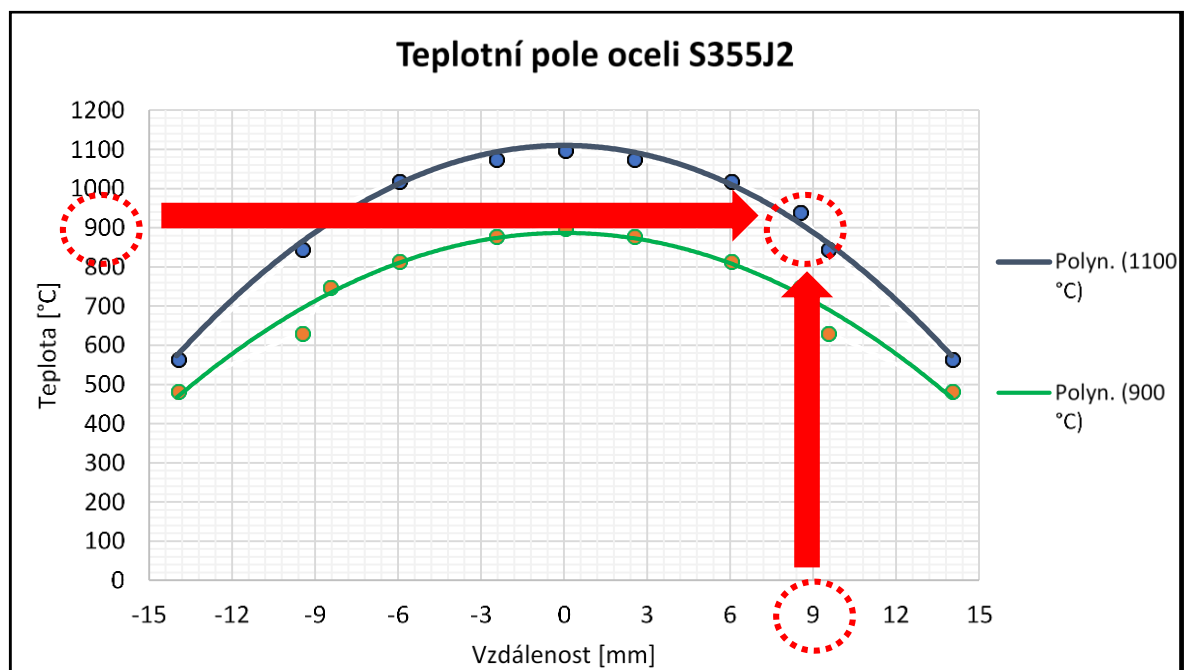
Z naměřených hodnot tvrdosti, které jsou vidět v tabulkách 3.4 a 3.5, byly sestaveny grafy, které jsou znázorněné na obrázcích 3.20 a 3.21. V grafech je zobrazena závislost naměřené tvrdosti na vzdálenosti od středu vzorku.



Obr. 3.20 Tvrdosti vzorků 1 až 8 (v závorce v popisku jednotlivých vzorků jsou napsány parametry v pořadí - deformace, rychlost deformace, rychlost ochlazování).

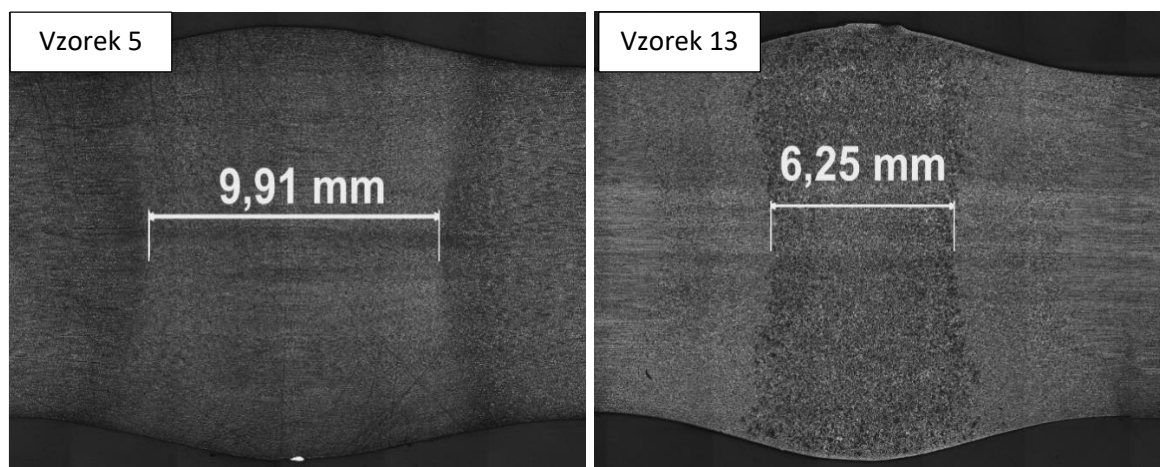


Obr. 3.21 Tvrdosti vzorků 9 až 16 (v závorce v popisku jednotlivých vzorků jsou napsány parametry v následujícím pořadí - deformace, rychlost deformace, rychlost ochlazování).



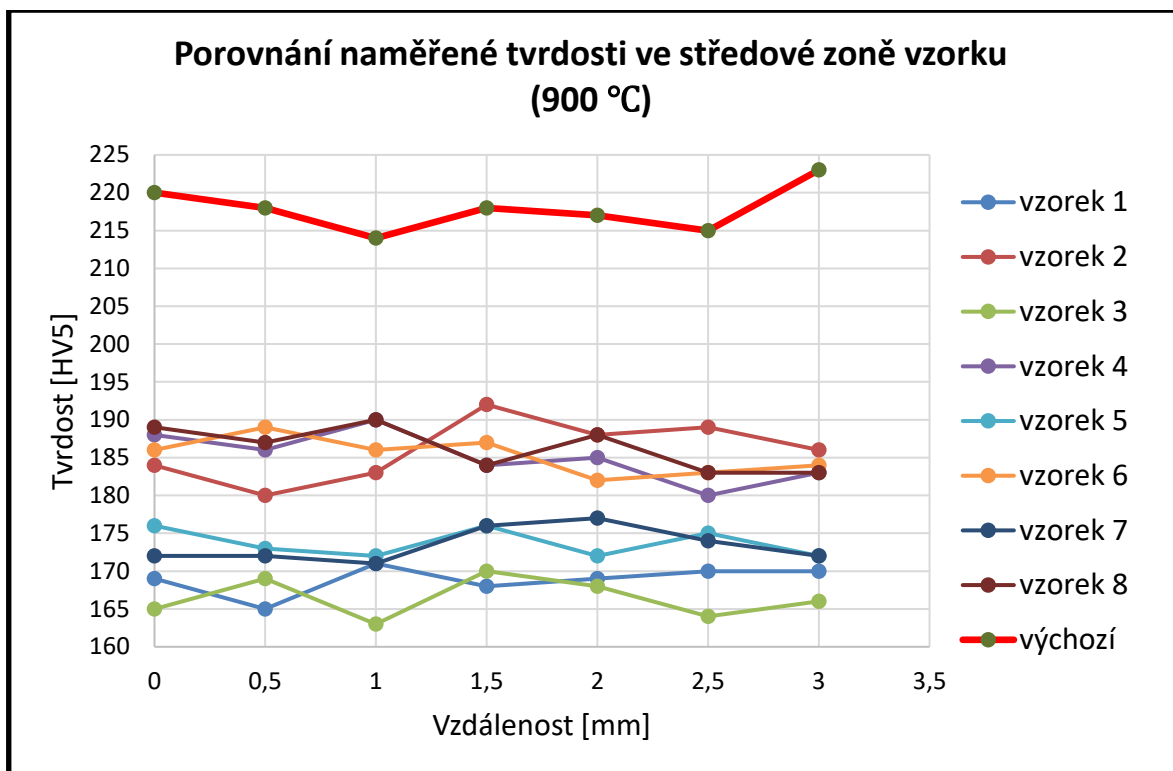
Obr. 3.22 Grafické znázornění rozložení teplot ve volné části vzorku z oceli S355J2 s použitím vysokolegovaných čelistí.

Z prvního grafu na obrázku 3.20 je zřejmé, že hodnoty tvrdostí u všech vzorků jsou zpočátku relativně nízké, nižší než počáteční tvrdosti u vzorků 9 až 16. Hodnoty se poté začnou více přibližovat tvrdosti výchozího vzorku, která činí v průměru zhruba 220 HV5. U druhého grafu (Obr. 3.21) je vidět, že tvrdosti uprostřed vzorků dosahují vyšších hodnot, průběh ve vzdálenosti cca 4 až 6 mm začíná mít klesající charakter a tvrdost padá zhruba na hodnoty, které odpovídají tvrdostem uprostřed vzorků 1 až 8. Stejně jako v prvním grafu, tvrdost se následně opět přibližuje hodnotám výchozího vzorku. Po pozorování obou grafů tedy lze tvrdit, že vždy u vzorku ve vzdálenosti 8 až 9 mm tvářeného při 1100 °C nastává téměř shoda v tvrdosti se vzorkem ve vzdálenosti 0 mm tvářeným při 900 °C (jsou srovnávány dvojici vzorků se stejnou velikostí deformace, rychlostí deformace a rychlostí ochlazování, např. vzorek č.1 a č.9). Je to způsobeno nehomogenním rozložením teploty ve vzorku. Pokud byl vzorek zahřátý na 1100 °C, ve vzdálenosti 8 až 9 mm tato teplota právě dosahuje 900 °C (viz. Obr. 3.22 Teplotní pole oceli S355J2) a vzorky se tedy shodují ve všech parametrech. Na základě těchto shodných tvrdostí se dá potvrdit správnost měření.

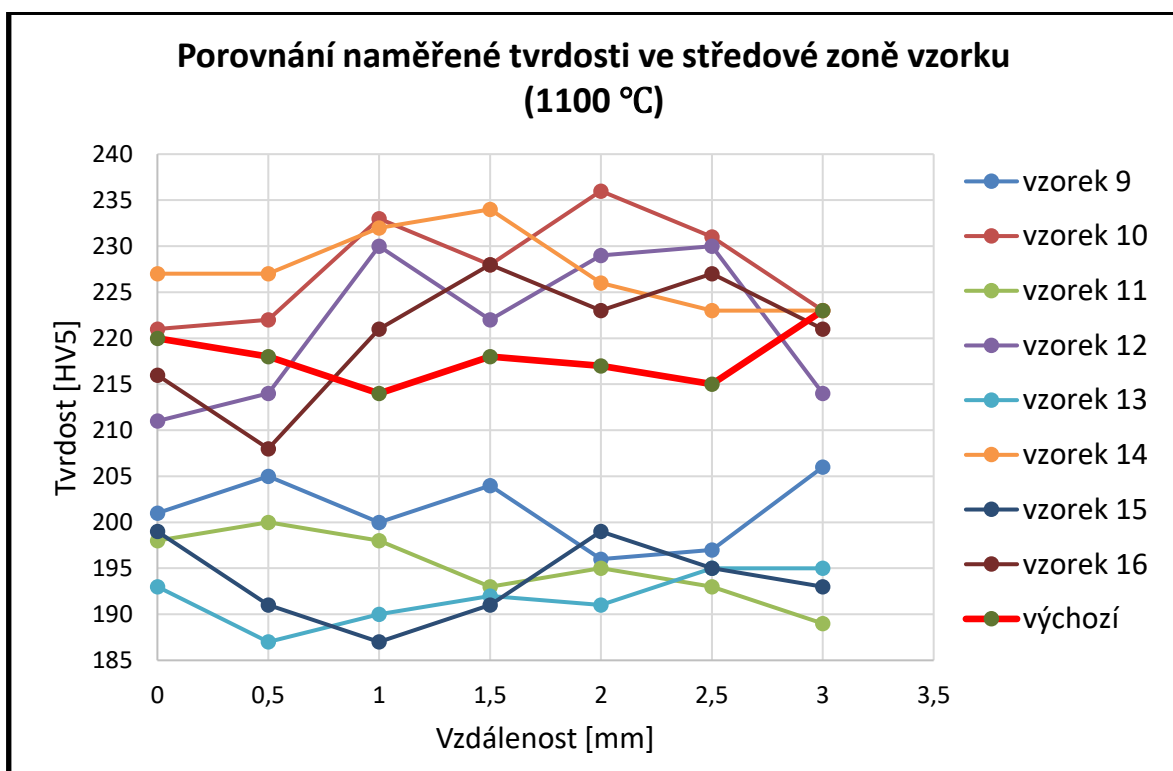


Obr. 3.23 Srovnání šířky středových zón dvou různých vzorků.

Původně měl být porovnáván celý průběh tvrdosti, avšak na základě obrázku 3.23 lze tvrdit, že středová zóna u každého vzorku je pokaždé různě velká, což je způsobeno různými kombinacemi parametrů tvářenání, tvrdosti tedy nemohou být hodnoceny vůči sobě po celé délce. Pro porovnávání byla zvolena jiná metodika, při které se budou tvrdosti srovnávat pouze ve středové zóně od 0 mm do 3 mm (Obr. 3.24, Obr. 3.25). Všechny ostatní fotografie vzorků s naměřenou středovou oblastí budou uvedeny v příloze.



Obr. 3.24 Grafické znázornění tvrdostí ve středu u vzorků 1 až 8 a výchozího vzorku.



Obr. 3.25 Grafické znázornění tvrdostí ve středu u vzorků 9 až 16 a výchozího vzorku.

Z grafického znázornění tvrdosti v obrázku 3.24 i 3.25 je patrný vliv rychlosti ochlazování. Jak bude uvedeno dále v textu, rychlost ochlazování významným způsobem

ovlivňuje průběh odpevnění a tvorbu nových zrn, což souvisí i se změnou průběhu tvrdosti. Další významný vliv na tvrdost měla tvářecí teplota. Při vizuálním porovnávání vzorků tvářených při 1100 °C a 900 °C je zřetelně vidět vyšší tvrdost při vyšší hodnotě tvářecí teploty, avšak předpoklad byl opačný. Očekávalo se, že vlivem vyšší kovací teploty (1100 °C) a tím i větším hrubnutím zrna bude tvrdost menší než při teplotě 900 °C. Tento jev bude dále diskutován na konci kapitoly vyhodnocení.

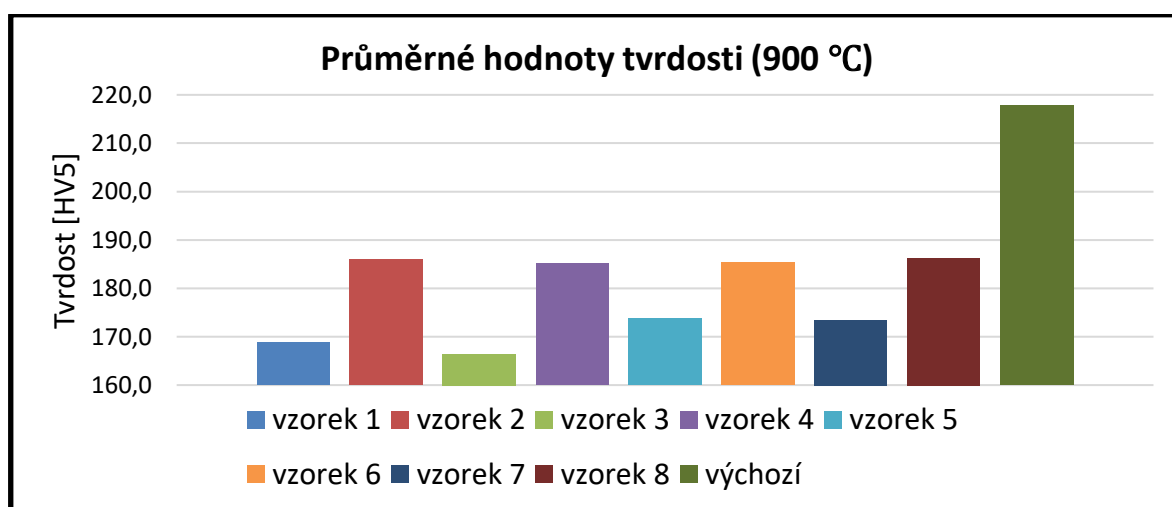
Vliv velikosti deformace a rychlosti deformace, které byly při testech měněny, není průkazný vzhledem k malým rozdílům tvrdostí, které navíc mohli vzniknout nepřesností při měření.

Dále byla vytvořena tabulka 3.6 pro porovnání naměřených hodnot, ve které jsou uvedeny průměrné hodnoty a odchylky tvrdostí ze středové části vzorku. Průměrné hodnoty z tabulky jsou dále vyneseny do grafů (viz. Obr. 3.26, Obr. 3.27)

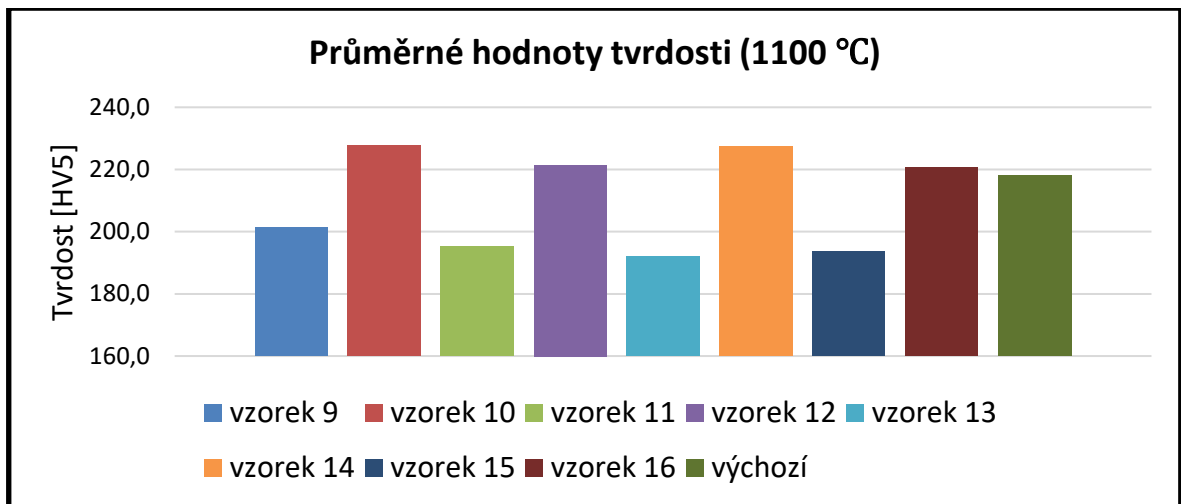
Tab. 3.6 Průměrné hodnoty tvrdostí

Vzorek	Tvrdost [HV5]	
	\bar{x}	σ
1	168,9	1,8
2	186,0	3,7
3	166,4	2,4
4	185,1	3,0
5	173,7	1,7
6	185,3	2,2
7	173,4	2,1
8	186,3	2,7
výchozí	217,9	2,8

Vzorek	Tvrdost [HV5]	
	\bar{x}	σ
9	201,3	3,6
10	227,7	5,4
11	195,1	3,5
12	221,4	7,8
13	191,9	2,6
14	227,4	3,9
15	193,6	4,1
16	220,6	6,3
výchozí	217,9	2,8



Obr. 3.26 Průměrné hodnoty tvrdostí ve středové oblasti u vzorků 1 až 8.

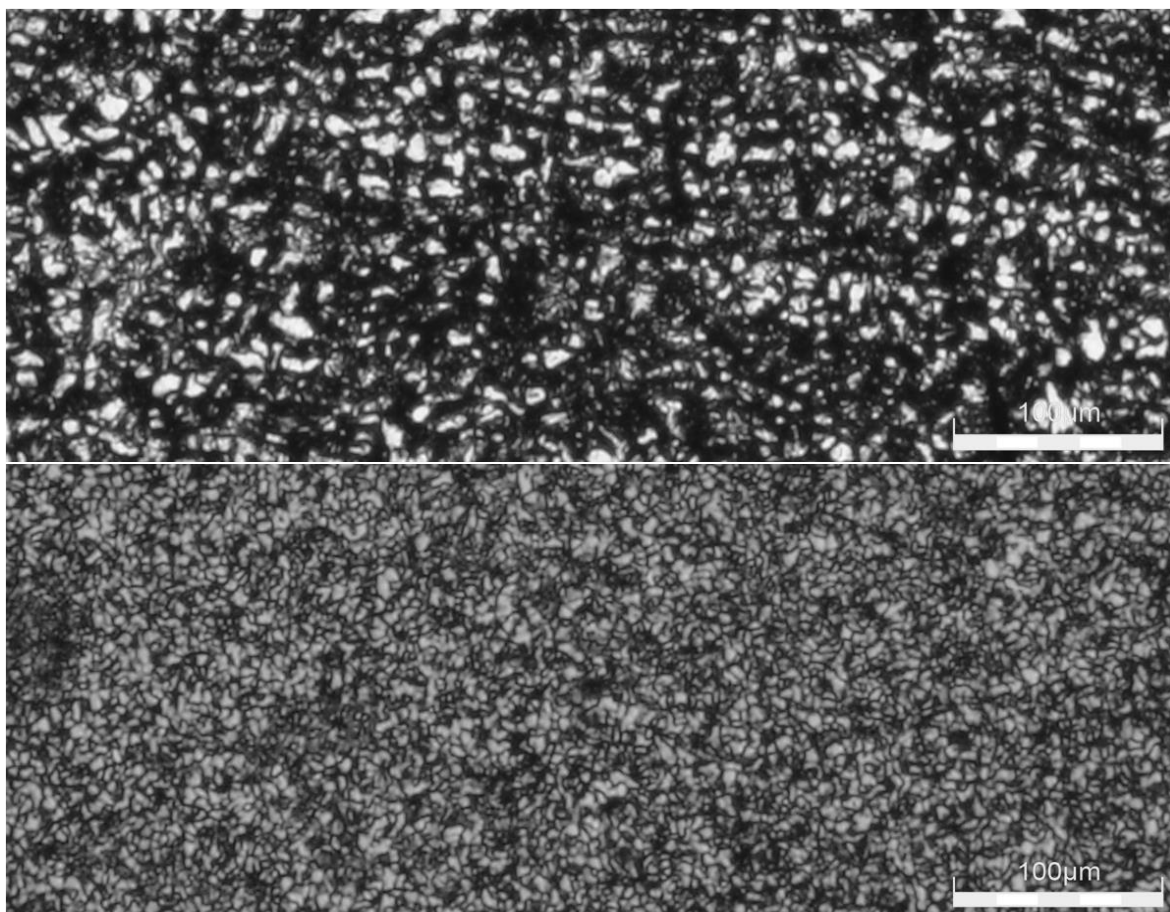


Obr. 3.27 Průměrné hodnoty tvrdostí ve středové oblasti u vzorků 9 až 16.

Z průměrných hodnot tvrdostí graficky znázorněných v obrázcích 3.25 a 3.26 je patrný vliv teploty (vzorek 1 a 9) a rychlosti chlazení (vzorek 1 a 2). Jak už bylo dříve zmíněno, nepatrný vliv má deformace (vzorek 2 a 4) a rychlost deformace (vzorek 2 a 6). V porovnání s výchozím vzorkem byl vzrůst tvrdosti zaznamenán pouze u čtyřech vzorků s teplotou tváření 1100°C a s rychlejším ochlazováním 15 °C/s, všechny ostatní vzorky mají tvrdost menší.

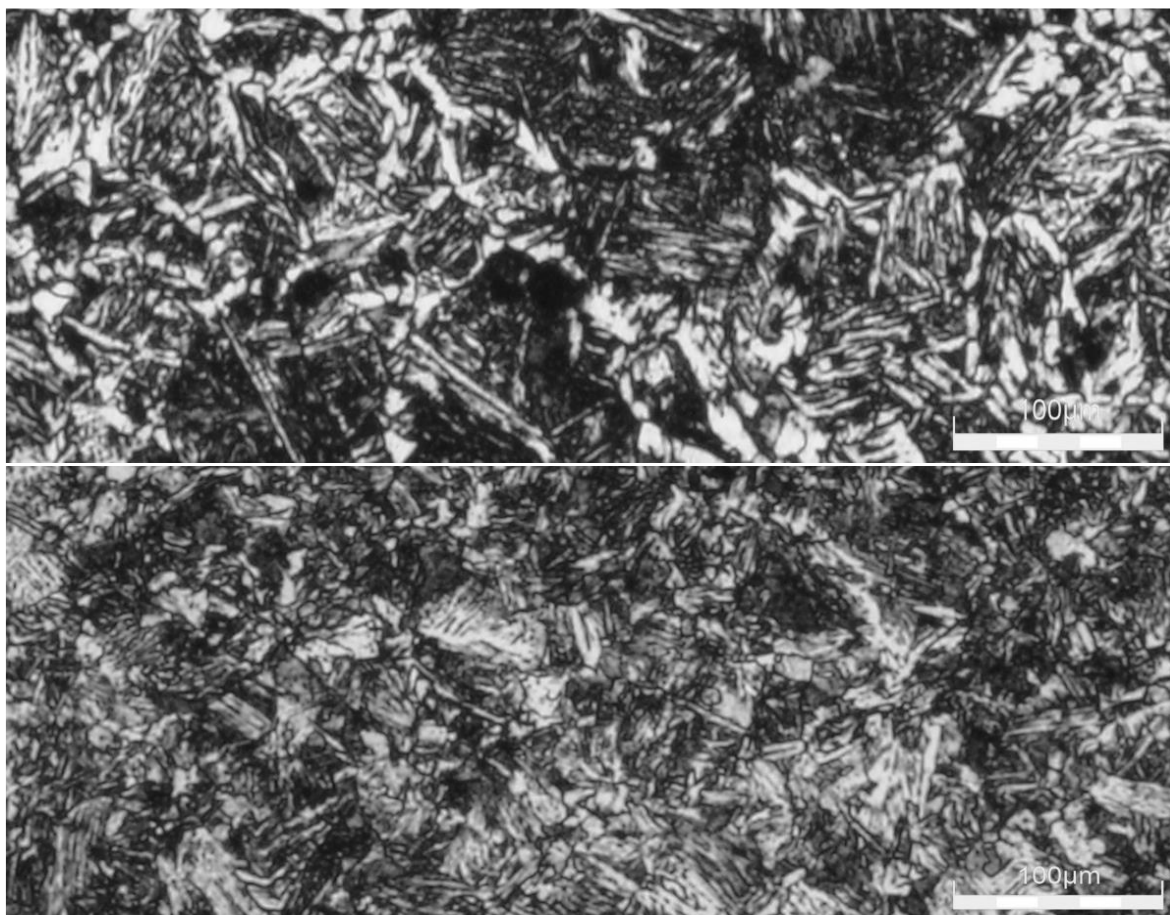
3.6.2 Struktura

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole ve věci vyhodnocování tvrdosti, porovnání struktury bude také probíhat pouze ve středové zóně vzorku. Fotografie struktur byly vytvořeny pro všechny zóny u všech vzorků, avšak z důvodu rozsahu a relevantnosti budou součástí vyhodnocení této bakalářské práce pouze struktury středových oblastí. Pro textovou část bakalářské práce byly vybrány vždy dvojice obrázků struktur, které reprezentují hranice zvolených technologických parametrů. Pro každou tvářecí teplotu (900 °C a 1100 °C) je zde tedy uvedena struktura s nejmenší deformací, nejmenší rychlostí deformace a nejmenší rychlostí ochlazování. Oproti této struktuře je znázorněna struktura s největší deformací, největší rychlostí deformace a největší rychlostí ochlazování. Jedná se o vzorky č.1 a č.8 pro teplotu 900 °C a vzorky č.9 a č.16 pro teplotu 1100 °C (viz také tabulka parametrů Tab. 3.2).



Obr. 3.28 Porovnání struktur středových zón vzorku 1 a 8 při zvětšení 500x.
Vzorek 1 (horní), vzorek 8 (dolní).

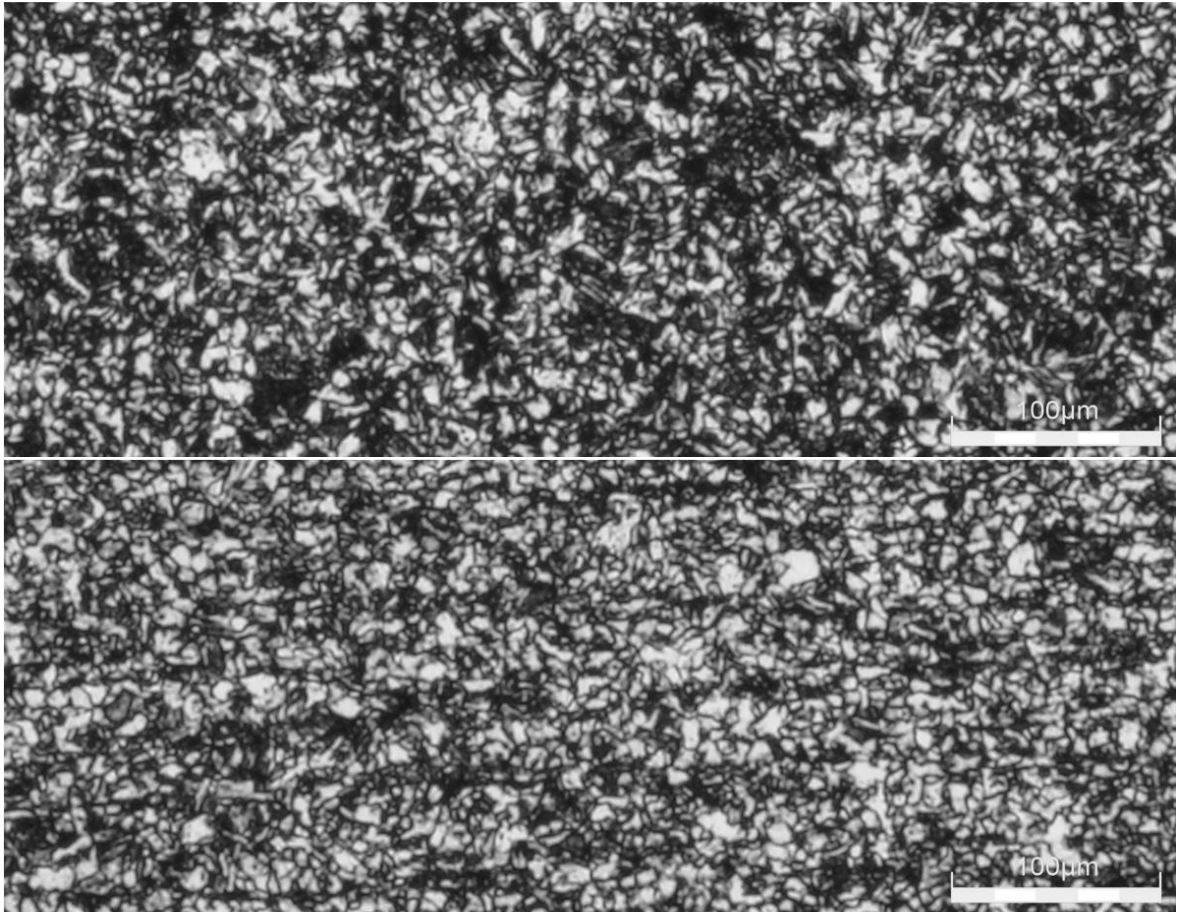
Z Obr.3.28. je vidět, že strukturu tvoří feriticko-perlitická zrna kulového charakteru s různou velikostí. Výrazný vliv na změnu velikosti zrna má rychlost ochlazování. Rychlost deformace a velikost deformace nemá zásadní vliv na strukturu materiálu. Tento fakt dokumentují kompletní fotografie struktur uvedené v příloze BP. Větší rozměr zrna u vzorku č.1 oproti vzorku č.8 je s největší pravděpodobností dán hrubnutím, způsobeným pomalejším ochlazováním. Naopak u vzorku 8 lze pozorovat zrna daleko jemnější, neboť při rychlém ochlazování nestačilo k takovému hrubnutí dojít.



Obr. 3.29 Porovnání struktur středových zón vzorku 9 a 16 při zvětšení 500x. Vzorek 9 (horní), vzorek 16 (dolní).

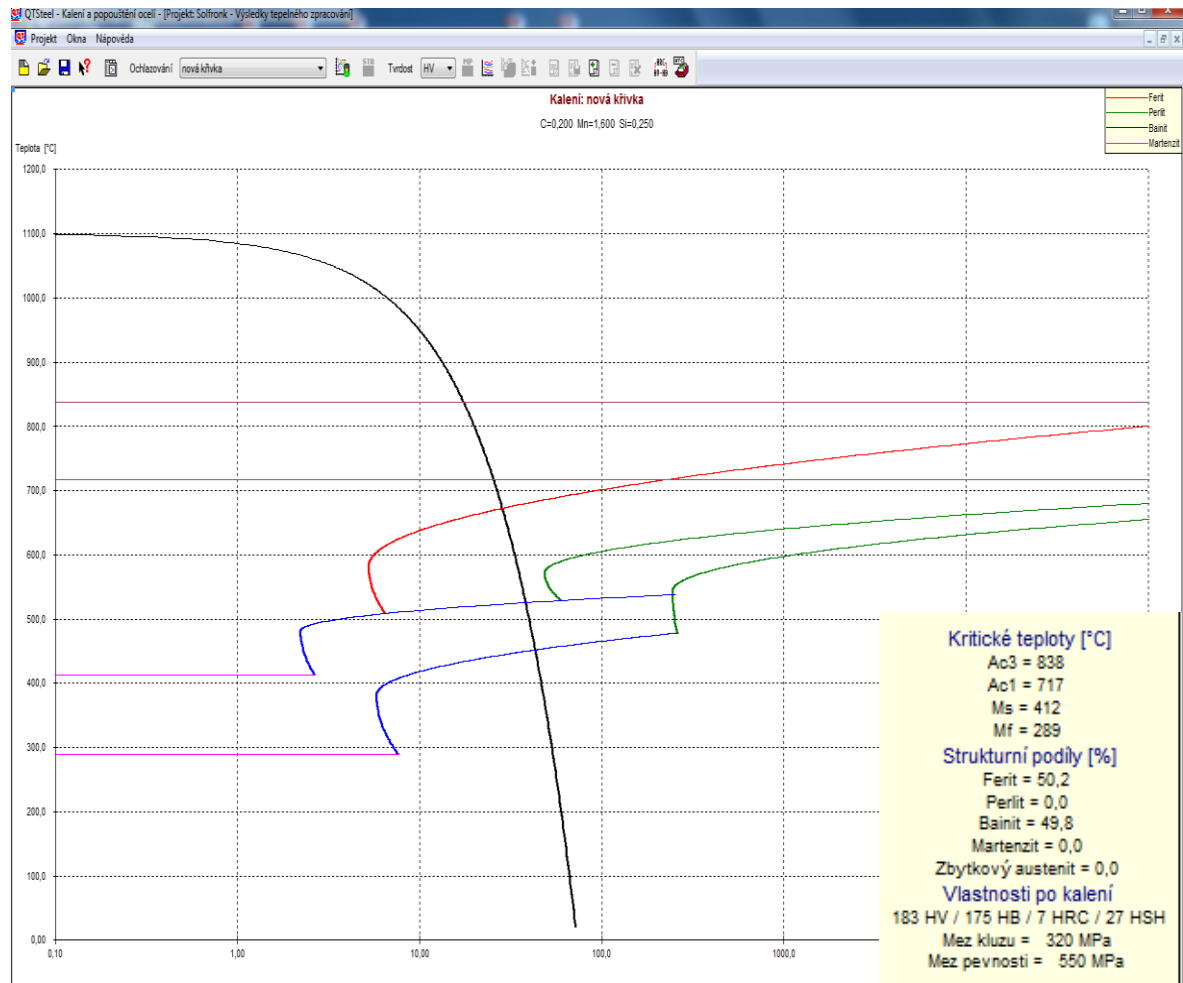
V případech, kdy byly testy prováděny při teplotě tváření 1100 °C, je z obrázku 3.29. vidět diametrálně odlišná struktura oproti strukturám získaných při teplotě tváření 900°C. Strukturu tvoří v tomto případě jehlicovité martenziticko-bainitické zrna, která se liší (podobně jako u teploty 900 °C) velikostí zrna. Zrna ve struktuře vzorku 9 jsou hrubší, než u 16, což je opět způsobeno rychlostí ochlazování. Rozdílná kinetika vzniku zrn má za následek i výraznou změnu tvrdosti obou struktur.

Pro ověření správnosti měření byl vytvořen obrázek 3.30, kde je porovnávána struktura středové zóny vzorku 4 a zóny 1 vzorku 12 vzdálené zhruba 8 až 9 mm od středu. Podle zjištěných informací by se obě struktury měly téměř shodovat, neboť vznikaly při stejných tvářecích parametrech.

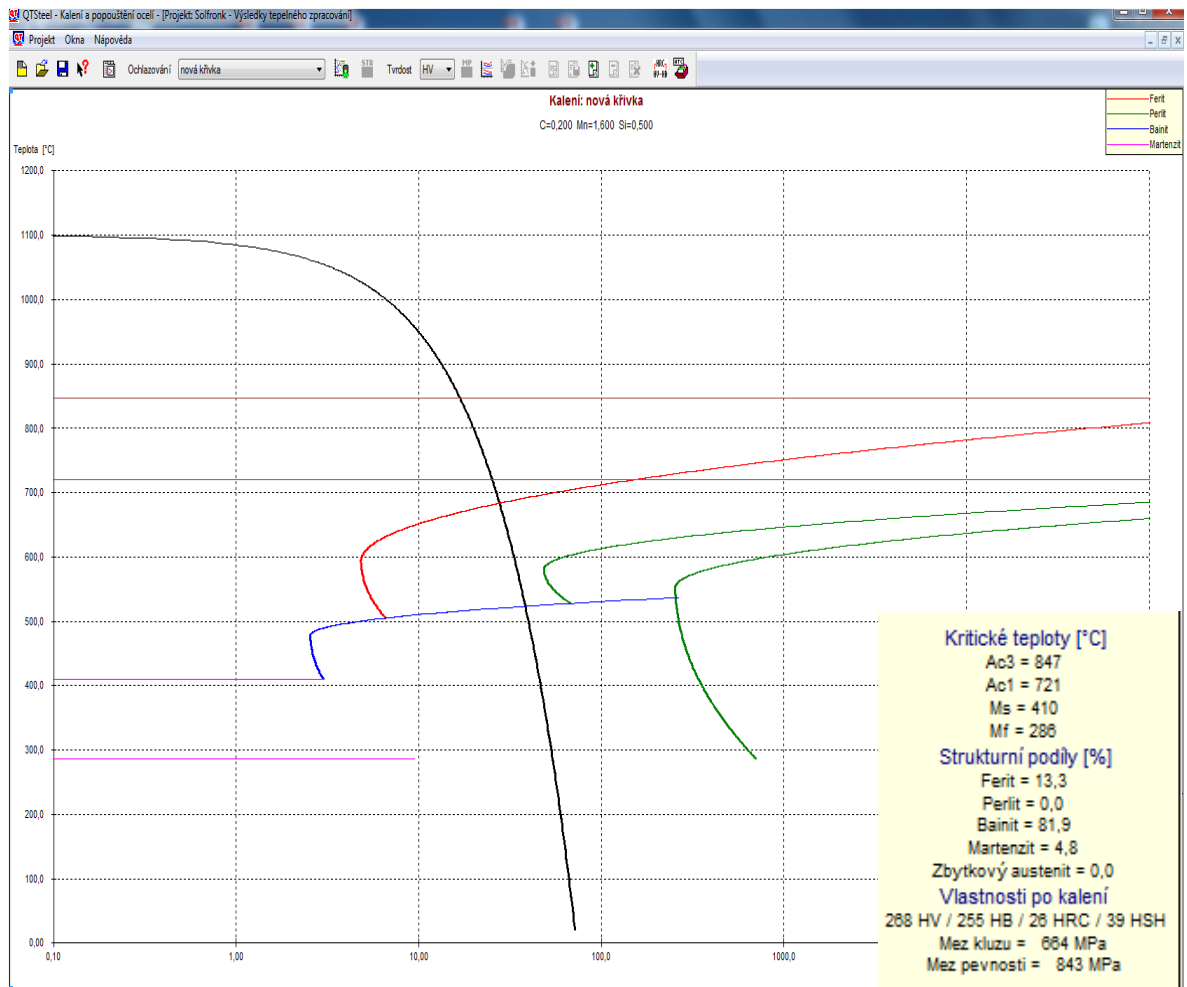


Obr. 3.30 Srovnání struktury středové zóny vzorku 4 (nahore) a zóny 1 vzorku 12 (dole) při zvětšení 500x. Obě struktury se dají považovat za téměř shodné.

Vzhledem k výsledným hodnotám tvrdosti, které vyšly větší při vyšší tvářecí teplotě než při nižší teplotě, byl pro ověření použit softwarový program QTSteel – kalení a popouštění ocelí. Při zadání parametrů, jako je teplota, rychlost chlazení a chemické složení oceli, program nasimuloval ARA diagram, který zobrazuje anizotermický rozpad austenitu, mechanické vlastnosti, kritické teploty a složení struktury. Na obrázcích 3.31 a 3.32 jsou znázorněny dva ARA diagramy, které budou vzájemně porovnány.



Obr. 3.31 Grafické znázornění průběhu ochlazování oceli v programu QTSteel. Vstupní parametry – rychlost ochlazování 15 °C/s, teplota 1100 °C. Chem. složení – Mn = 1,6; Si = 0,25; C = 0,2.



Obr. 3.32 Grafické znázornění průběhu ochlazování oceli v programu QTSteel. Vstupní parametry – rychlost ochlazování 15 °C/s, teplota 1100 °C. Chem. složení – Mn = 1,6; Si = 0,5; C = 0,2.

U obou grafů se jako vstupní parametr změnilo pouze chemické složení, konkrétně obsah křemíku. Po porovnání obou výsledných hodnot materiálů je zřejmé, že tento prvek má na konečné vlastnosti obrovský vliv. Pokud roste obsah Si, roste mez kluzu, mez pevnosti, tvrdost a v našem případě vzniká i více bainitické struktury. V grafu na obrázku 3.32 je dokonce vidět, že se tvoří martenzit, který se mimo jiné vyznačuje vysokou tvrdostí. Je tedy vysoce pravděpodobné, že větší tvrdost při vyšší tvářecí teplotě vznikla právě díky vysokému obsahu Si. Ekvivalentní průběh ARA diagramu k našemu reálnému případu nelze bohužel stanovit, protože u zkoumané oceli S355J2 obsah křemíku není přesně znám (hodnota je v rozmezí zhruba 0,1 až 0,7). Tato práce se dále těmito vztahy nebude zabývat, neboť proto není dostatečný prostor a čas, avšak tyto závislosti mohou být předmětem pro další budoucí technologické výzkumy.

4 Závěr

Cílem této práce bylo zjistit vliv stupně prokování a různých tvářecích parametrů na změnu mechanických vlastností, konkrétně na změnu tvrdosti a na strukturní přeměny u oceli s označením S355J2. Tento materiál je konstrukční uhlíková nelegovaná jakostní ocel s obsahem uhlíku 0,2 %, válcována za tepla, vhodná pro svařované konstrukce, výrobu tvářených součástí a výrobu ohýbaných profilů a trubek. Zvolenou metodou pro měření tvrdosti byla zkouška podle Vickerse, při které byla nastavena působící zátěž o hmotnosti 5 kg po dobu 10 sekund (značení HV5). Pro zkoumání změn ve struktuře byl použit mikroskop se zvětšením 500x, pomocí kterého byly pořízeny fotografie jednotlivých struktur. Pro řízenou deformaci vzorků bylo použito zařízení GLEEBLE 3500. Jako řídicí tvářecí parametry byly vybrány dvě velikosti deformace, dvě rychlosti deformace, dvě rychlosti ochlazování a dvě teploty tváření.

Ze získaných výsledků a z jejich následného vyhodnocení lze říci, že největší vliv na tvrdost měla tvářecí teplota a rychlost ochlazování. S rostoucí ochlazovací rychlostí se zvyšovala tvrdost způsobená vznikem jemnějších zrn ve struktuře. Stejná závislost vyšla i v případě, kdy u vyšší zvolené kovací teploty vyšla větší tvrdost. Předpokládané výsledky měření byly ale přesně opačné, očekávala se klesající tvrdost s rostoucí teplotou tváření, neboť při kování za vyšších teplot vzniká hrubší zrno. Pro ověření byla provedena dodatečná simulace tohoto experimentu ve softwaru QTSteel, díky které byl zřejmý značný vliv obsahu křemíku v oceli na mechanické vlastnosti a strukturní přeměny. Tato simulace prokázala, že materiál s vyšším obsahem křemíku může mít rostoucí tvrdost s rostoucí kovací teplotou. Díky konzultaci se specialistou ohledně tohoto měření se došlo k zjištění, že i některé další přísadové prvky v oceli mohou mít velký vliv na změnu tvaru křivek v ARA diagramu. Dalším takovým příkladem může být prvek bór, který prý velice razantně ovlivňuje chování materiálu už při jeho velice malé změně obsahu. Těmto zjištěním už se dále nevěnovala pozornost, neboť nesouvisí přímo se zadáním.

Z měření dále vyplývá, že rychlost a velikost deformace nemá na výsledek zásadní vliv, nebo je účinek těchto dvou parametrů vzhledem k malým rozdílům tvrdostí v tomto experimentu neprůkazný.

Největší změny ve struktuře materiálu byly zjištěny opět u vzorků s rozdílnou rychlostí ochlazování a rozdílnou teplotou tváření. V případě vysoké teploty (1100 °C) struktura byla tvořena martenziticko-bainitickými zrny jehlicovitého tvaru, za nízké teploty

vznikala struktura feriticko-perlitická tvořená kulovými zrn. S klesající rychlostí ochlazování docházelo viditelně k hrubnutí, tedy k růstu zrn a poklesu tvrdosti.

V rámci přesnějšího vyhodnocení výsledku ohledně změn struktury a mechanických vlastností v závislosti na velikosti a rychlosti deformace bych doporučil podrobit více stejných vzorků stejného či podobného materiálu těmto zkouškám. Přesnější výsledky bychom také dostali, pokud by se namísto čtyřech tvářecích parametrů zvolili parametry pouze dva, např. rychlost a velikost deformace. Z hlediska prokázaného významného vlivu křemíku na výsledné mechanické vlastnosti a strukturu by také mohlo být zajímavé provést další nová měření na téma, zkoumající vliv různých legujících prvků v oceli na výsledné vlastnosti po tepelném zpracování.

Seznam použité literatury

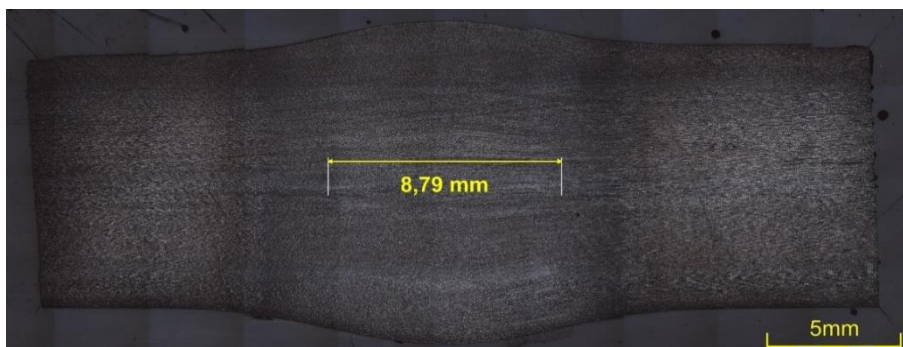
- [1] LENFELD, P. Technologie 2. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-466-5.
- [2] DVOŘÁK, M., A KOLEKTIV. Technologie II. Brno : Nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2004. ISBN 80-214-2032-4.
- [3] FOREJT, M. Teorie tváření. Brno : VUT, 1992. ISBN 80-214-0415-9.
- [4] TOBIŠKA, Z. Tváření. Tváření za studena. Tváření za tepla. [Online] 2016. [Citace: 12. Březen 2018.] Dostupné z:
<http://docplayer.cz/11502852-Tvareni-tvareni-za-studena-tvareni-za-tepla.html>.
- [5] Tváření za tepla. [Online] [Citace: 04. 04 2018.] Dostupné z:
<http://www.strojnylyceum.wz.cz/maturita/tep/tep12.pdf>.
- [6] Obrázek: Vlákničná struktura. [Online] [Citace: 09. 04 2018.] Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/03-kovani/01-vlaknita%20textura.JPG.
- [7] MICHNA, Š., NOVÁ, I. Technologie a zpracování kovových materiálů. Děčín : Nakladatelství Adin, s.r.o. Prešov, 2008. ISBN 978-80-89244-38-6.
- [8] SOLFRONK, P. Technologie II - Technologie kování. Liberec : 2017.
- [9] Kování. [Online] [Citace: 04. 04 2018.] Dostupné z:
<http://strojirenstvi-stredni-skola.blogspot.cz/2011/03/3841-kovani.html>.
- [10] TSCHAETSCH, H. Metal Forming Practise (Processes Machines Tools). Berlin : Springer-Verlag, 2006. ISBN-10: 3-540-33216-2.
- [11] JÍCHA, A. Volné ruční kování. Praha : SNTL, 1986.
- [12] RYBKA, H. Kování. [Online] 29. 03 2014. [Citace: 04. 04 2018.] Dostupné z:
<https://www.spszengrova.cz/texty/texty/PRA/Kovani-UT.pdf>.
- [13] Obrázek: Volné kování. [Online] 13. 05 2014. [Citace: 11. 05 2018.] Dostupné z:
<https://i.ytimg.com/vi/I88kVFCQfHI/maxresdefault.jpg>.
- [14] Základy tepelného zpracování kovů. [Online] [Citace: 04. 04 2018.] Dostupné z:
http://jhamernik.sweb.cz/tepelne_zpracovani.htm.
- [15] Metastabilní diagram, krystalizace a překrystalizace oceli, výsledná struktura. [Online] [Citace: 04. 04 2018.] Dostupné z:
<http://strojirenstvi-mechanika.blogspot.cz/2010/11/9-metastabilni-diagram-krystalizace.html>.

- [16] PACAL, B., DOLEŽAL, P. Struktura a vlastosti slitin metastabilní soustavy železo - karbid železa (Fe - Fe₃C). Brno : VUT .
- [17] VOJTĚCH, D. Kovové materiály. Praha : VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [18] Obrázek: Závislost modifikací železa na teplotě. [Online] [Citace: 09. 04 2018.]
Dostupné z:
<http://slideplayer.cz/slide/3221587/11/images/3/Teploty+polymorfie+kov%C5%AF.jpg>.
- [19] ŠEBESTOVÁ, H., SCHOVÁNEK, P. Fáze ve slitinách, Binární rovnovážné diagramy. [Online] [Citace: 04. 04 2018.] Dostupné z:
<https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm1-p-1.pdf>.
- [20] ŠEBESTOVÁ, H. Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii. [Online] [Citace: 04. 04 2018.] Dostupné z:
<http://docplayer.cz/8177076-Zaklady-pripravy-vzorku-pro-optickou-metalografii.html>.
- [21] Tvrdost. [Online] 18. 04 2011. [Citace: 04. 04 2018.] Dostupné z:
<http://www.merenitvrdosti.cz/tvrdost.html>.
- [22] Obrázek: Pásová pila na kov. [Online] [Citace: 11. 05 2018.] Dostupné z:
https://www.rucni-naradi.cz/img_product/img/proma-ppr-100-pasova-pila-na-kov.jpg.
- [23] Obrázek: Gleeble 3500. [Online] [Citace: 11. 05 2018.] Dostupné z:
https://www.bleeble.com/images/3500_.jpg.
- [24] Obrázek: Čelisti Gleeble System. [Online] [Citace: 11. 05 2018.] Dostupné z:
https://www.bleeble.com/images/GWS_Grips.jpg.
- [25] VRABEC, Z. Vliv druhu materiálu na tvaru čelistí na teplotní gradient při ohřevu. Diplomová práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014.

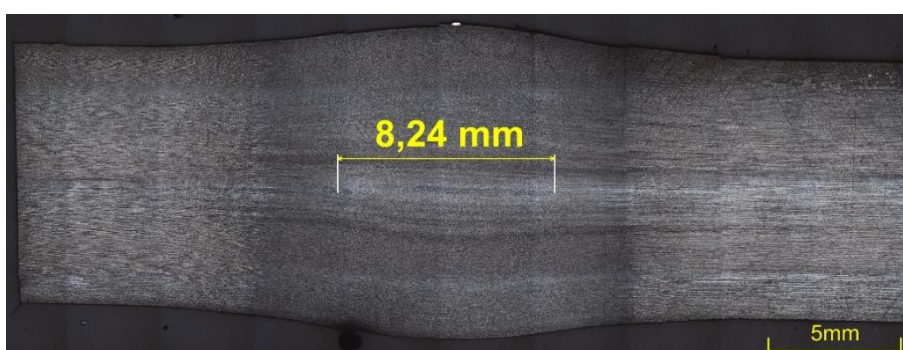
Seznam Příloh

- Příloha č. 1: Šířka středové zóny vzorku 1
- Příloha č. 2: Šířka středové zóny vzorku 2
- Příloha č. 3: Šířka středové zóny vzorku 3
- Příloha č. 4: Šířka středové zóny vzorku 4
- Příloha č. 5: Šířka středové zóny vzorku 5
- Příloha č. 6: Šířka středové zóny vzorku 6
- Příloha č. 7: Šířka středové zóny vzorku 7
- Příloha č. 8: Šířka středové zóny vzorku 8
- Příloha č. 9: Šířka středové zóny vzorku 9
- Příloha č. 10: Šířka středové zóny vzorku 10
- Příloha č. 11: Šířka středové zóny vzorku 11
- Příloha č. 12: Šířka středové zóny vzorku 12
- Příloha č. 13: Šířka středové zóny vzorku 13
- Příloha č. 14: Šířka středové zóny vzorku 14
- Příloha č. 15: Šířka středové zóny vzorku 15
- Příloha č. 16: Šířka středové zóny vzorku 16
- Příloha č. 17: Struktura středové zóny vzorku 1 při zvětšení 500x
- Příloha č. 18: Struktura středové zóny vzorku 2 při zvětšení 500x
- Příloha č. 19: Struktura středové zóny vzorku 3 při zvětšení 500x
- Příloha č. 20: Struktura středové zóny vzorku 4 při zvětšení 500x
- Příloha č. 21: Struktura středové zóny vzorku 5 při zvětšení 500x
- Příloha č. 22: Struktura středové zóny vzorku 6 při zvětšení 500x
- Příloha č. 23: Struktura středové zóny vzorku 7 při zvětšení 500x
- Příloha č. 24: Struktura středové zóny vzorku 8 při zvětšení 500x
- Příloha č. 25: Struktura středové zóny vzorku 9 při zvětšení 500x
- Příloha č. 26: Struktura středové zóny vzorku 10 při zvětšení 500x
- Příloha č. 27: Struktura středové zóny vzorku 11 při zvětšení 500x
- Příloha č. 28: Struktura středové zóny vzorku 12 při zvětšení 500x
- Příloha č. 29: Struktura středové zóny vzorku 13 při zvětšení 500x
- Příloha č. 30: Struktura středové zóny vzorku 14 při zvětšení 500x
- Příloha č. 31: Struktura středové zóny vzorku 15 při zvětšení 500x
- Příloha č. 32: Struktura středové zóny vzorku 16 při zvětšení 500x

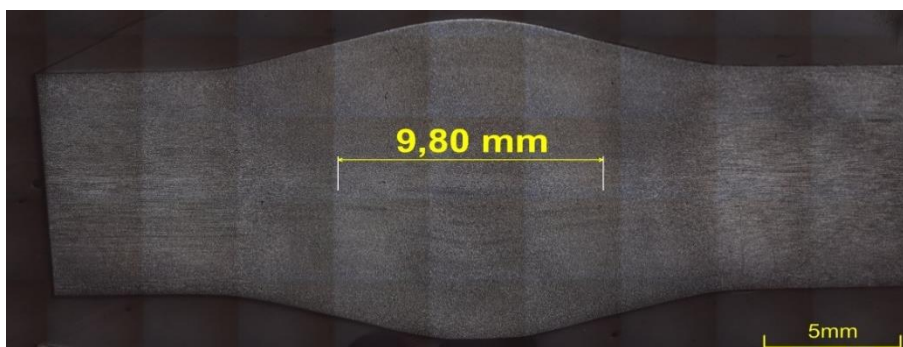
Příloha č. 1



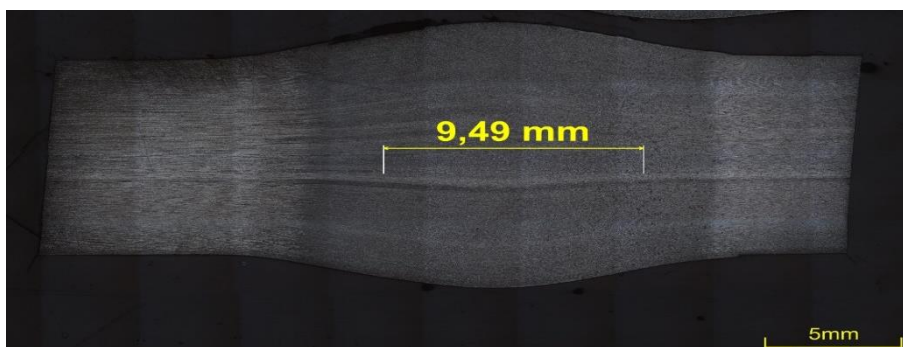
Příloha č. 2



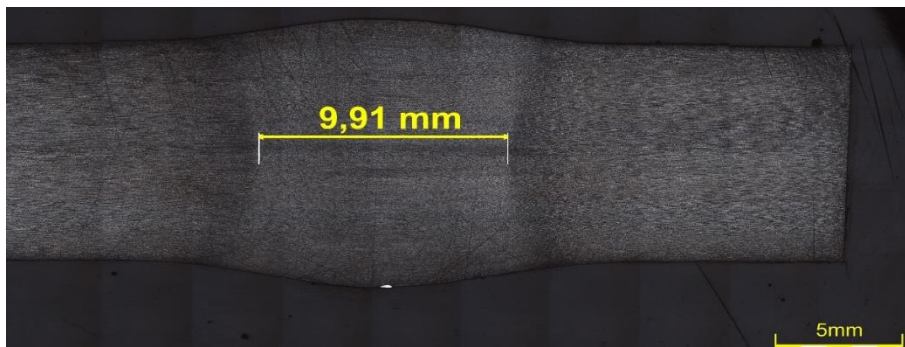
Příloha č. 3



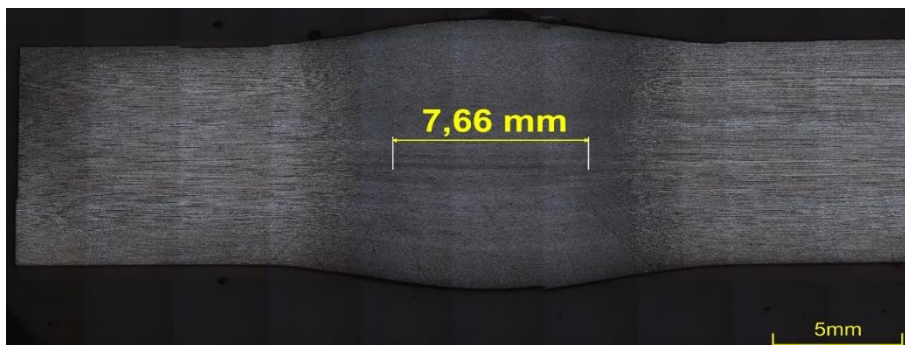
Příloha č. 4



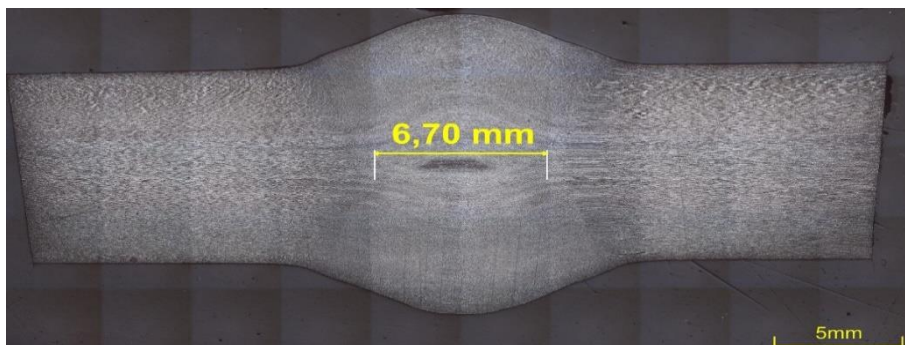
Příloha č. 5



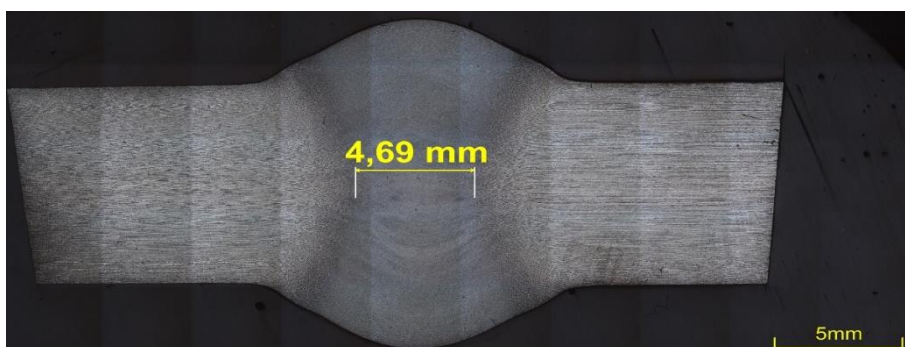
Příloha č. 6



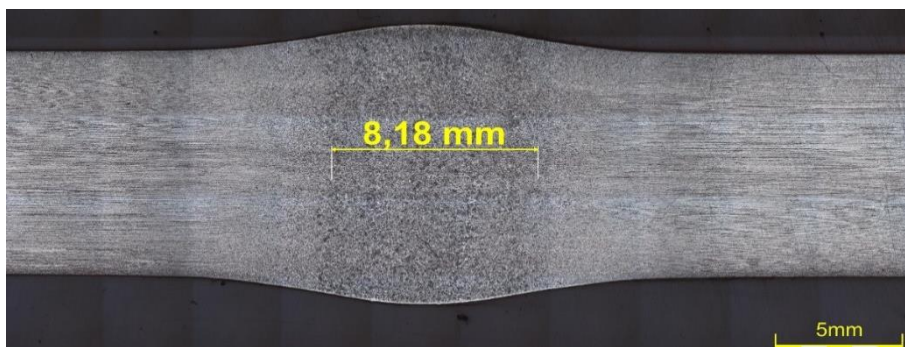
Příloha č. 7



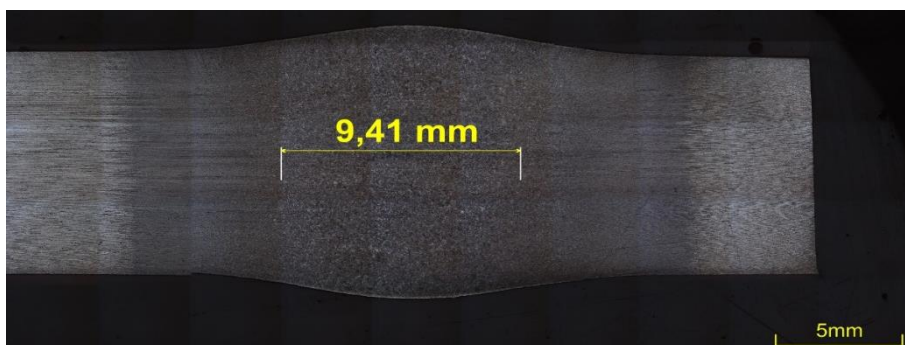
Příloha č. 8



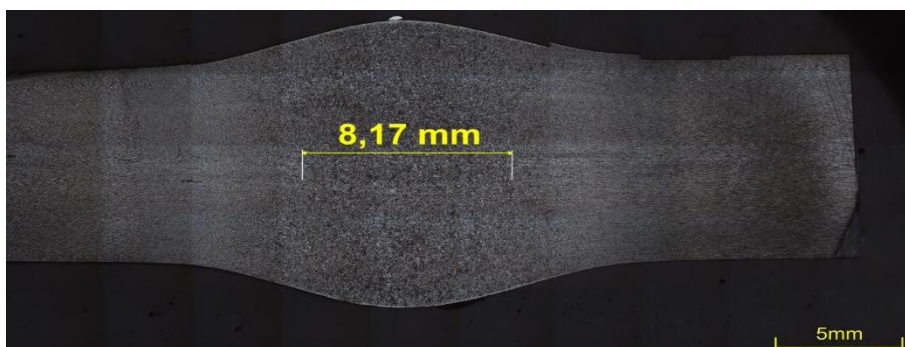
Příloha č. 9



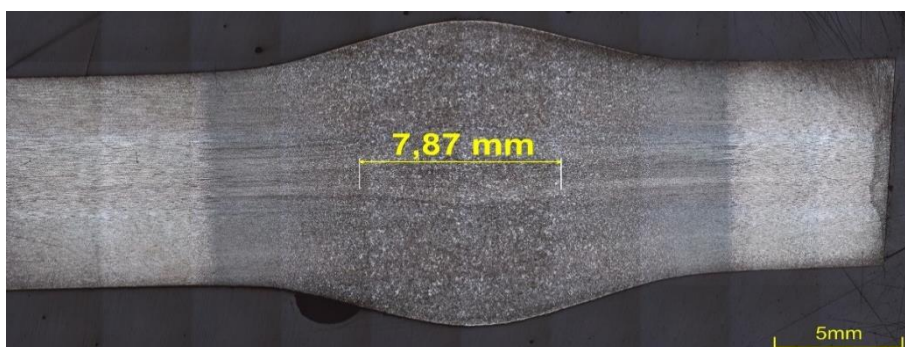
Příloha č. 10



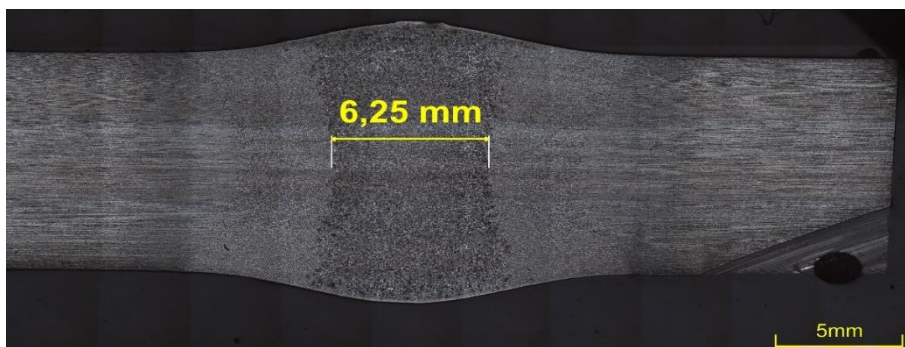
Příloha č. 11



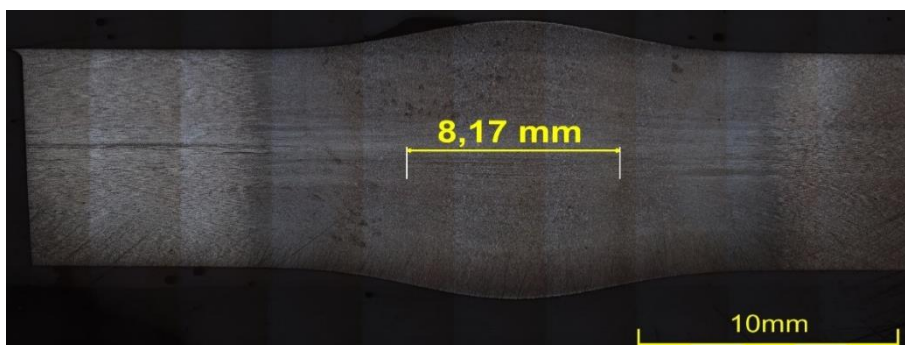
Příloha č. 12



Příloha č. 13



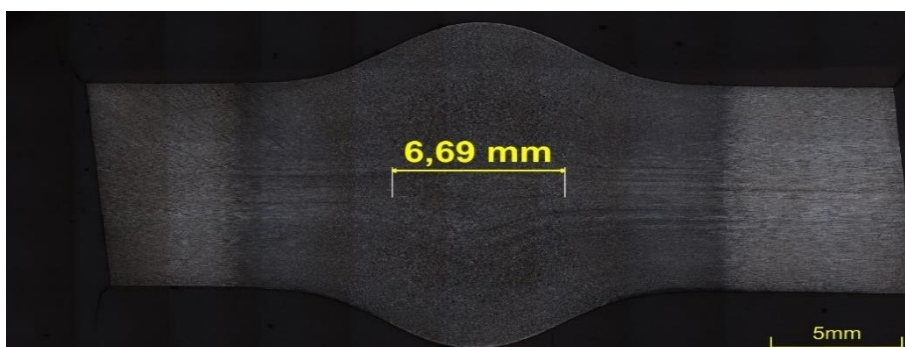
Příloha č. 14



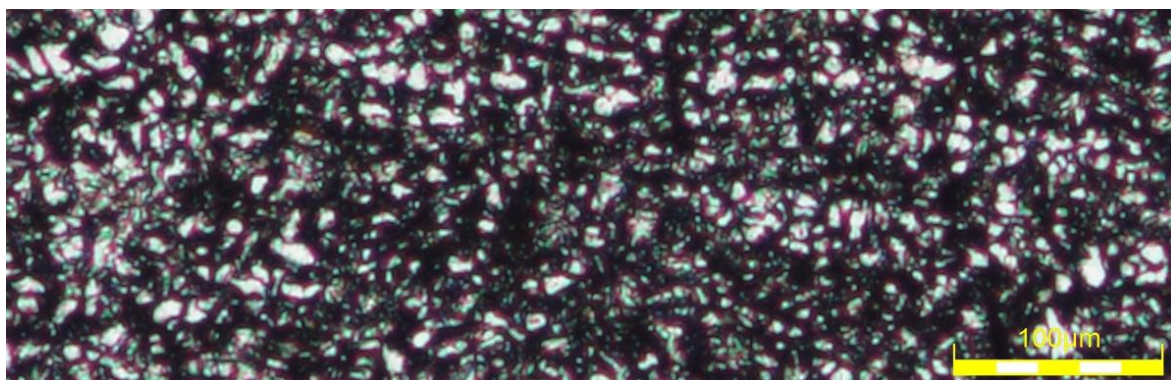
Příloha č. 15



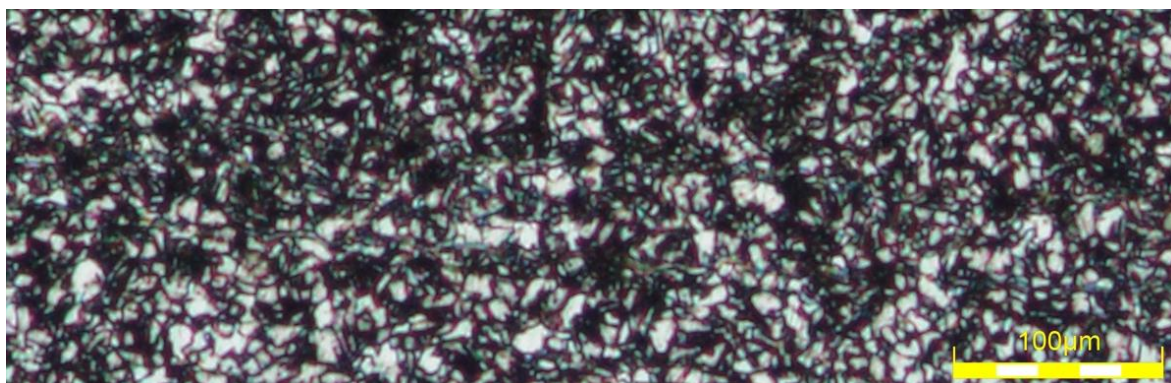
Příloha č. 16



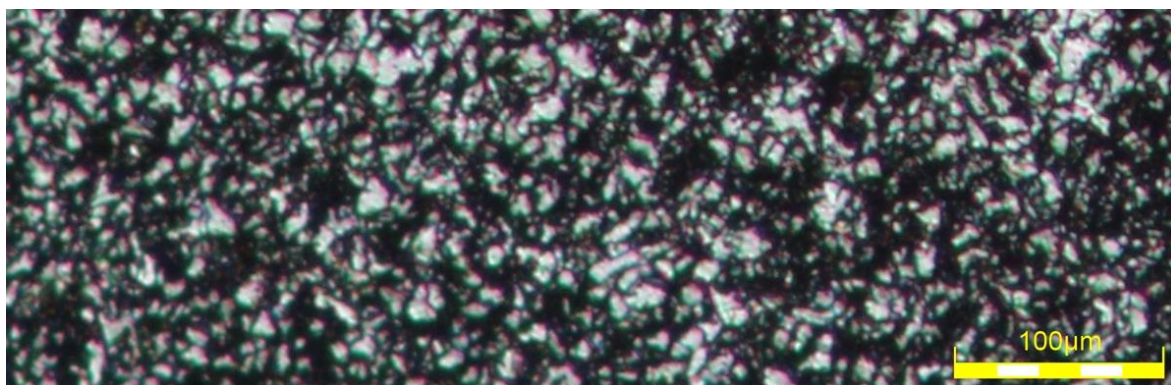
Příloha č. 17



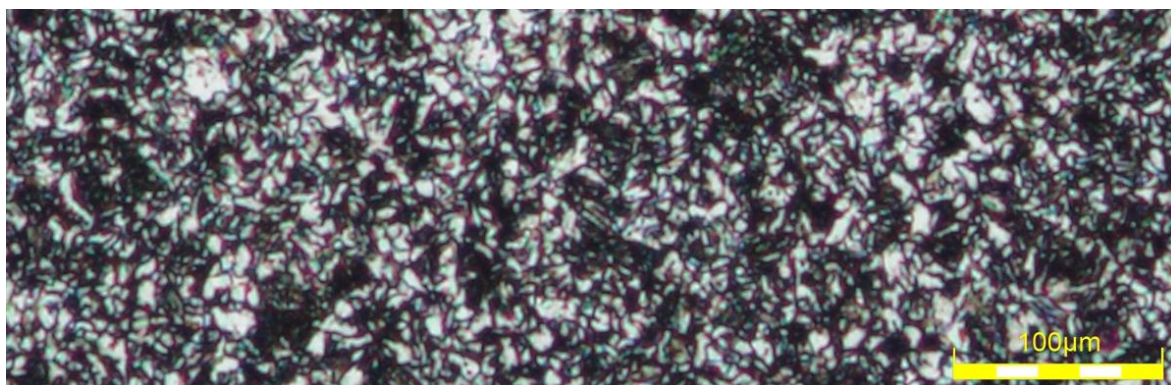
Příloha č. 18



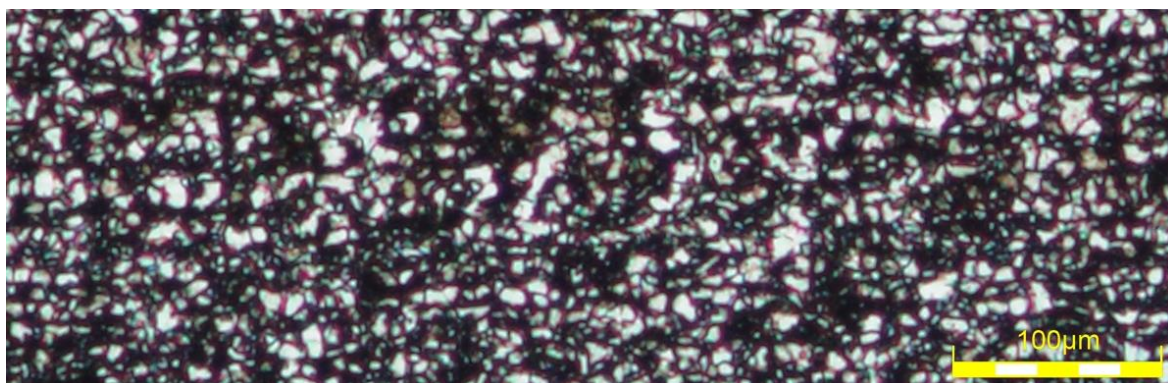
Příloha č. 19



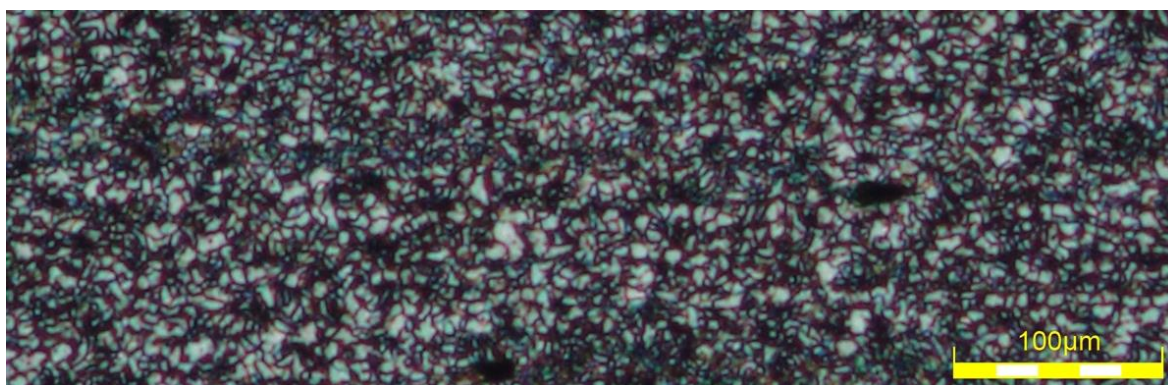
Příloha č. 20



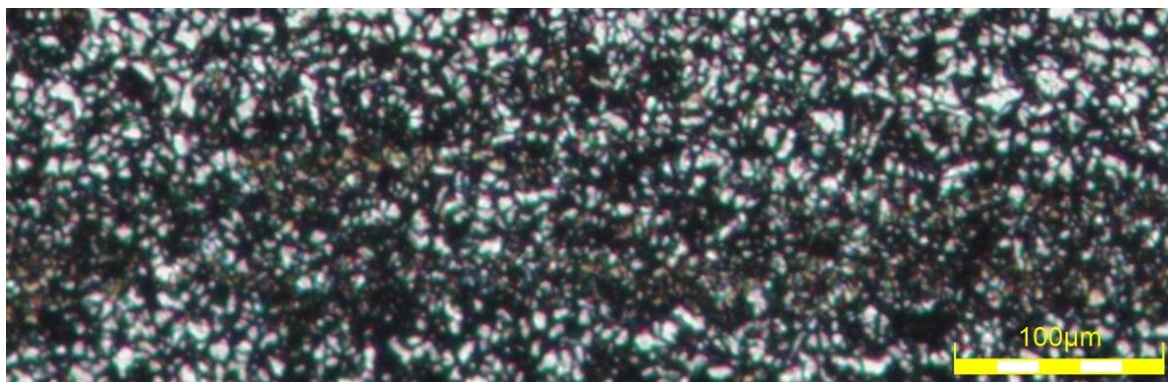
Příloha č. 21



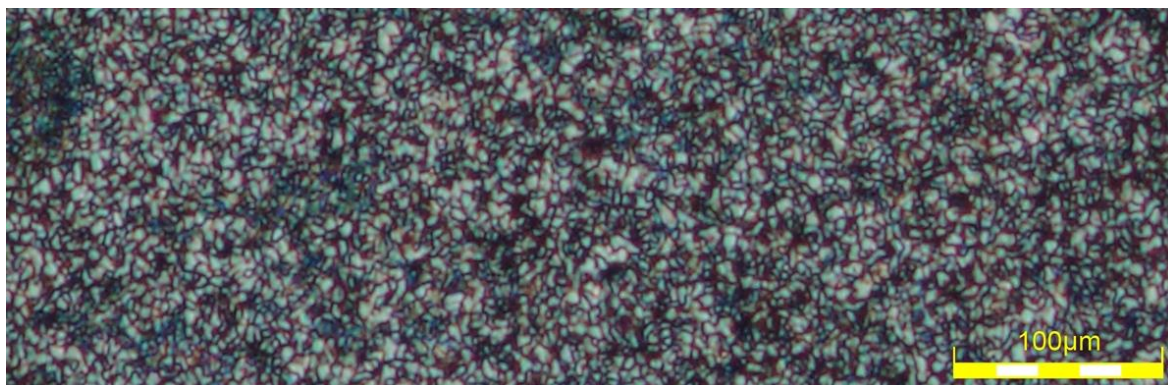
Příloha č. 22



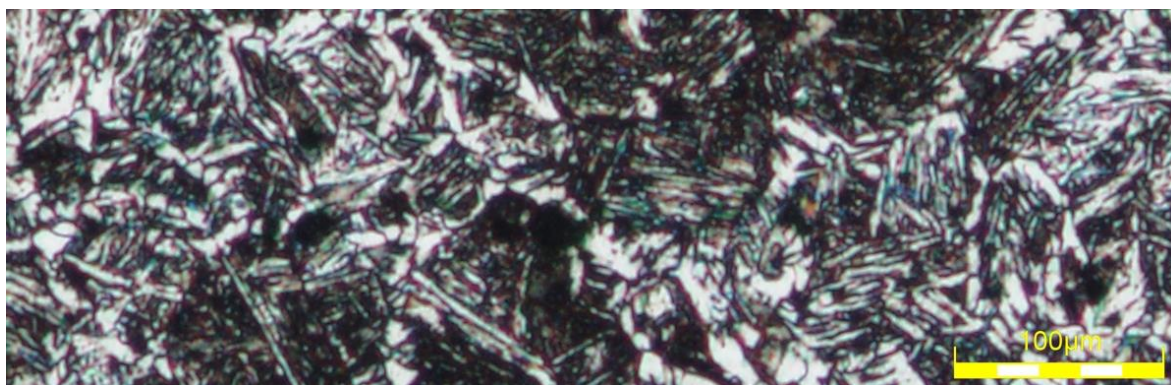
Příloha č. 23



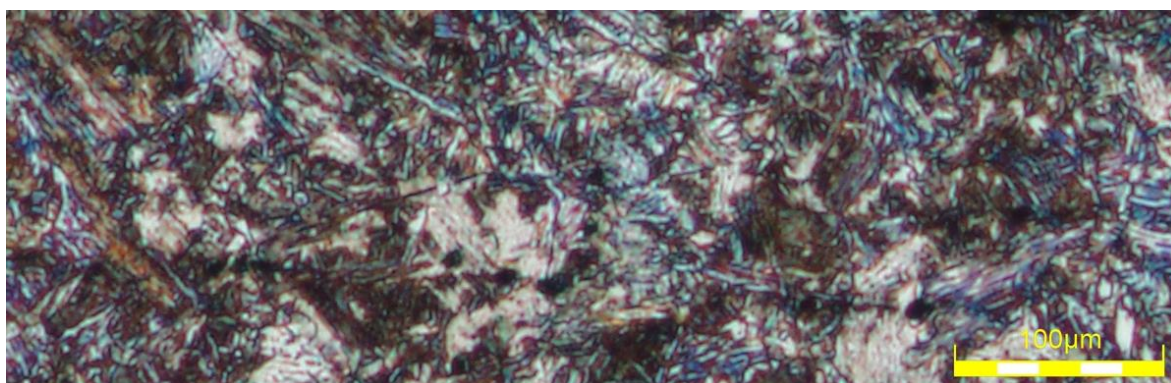
Příloha č. 24



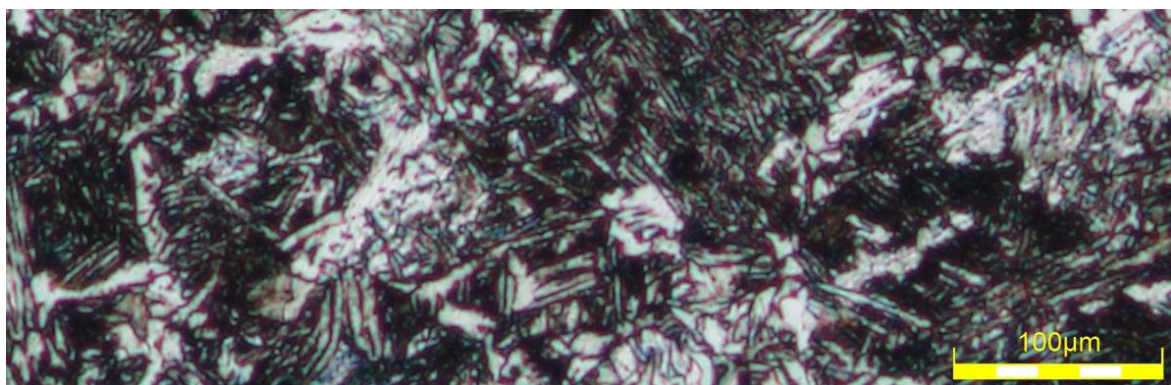
Příloha č. 25



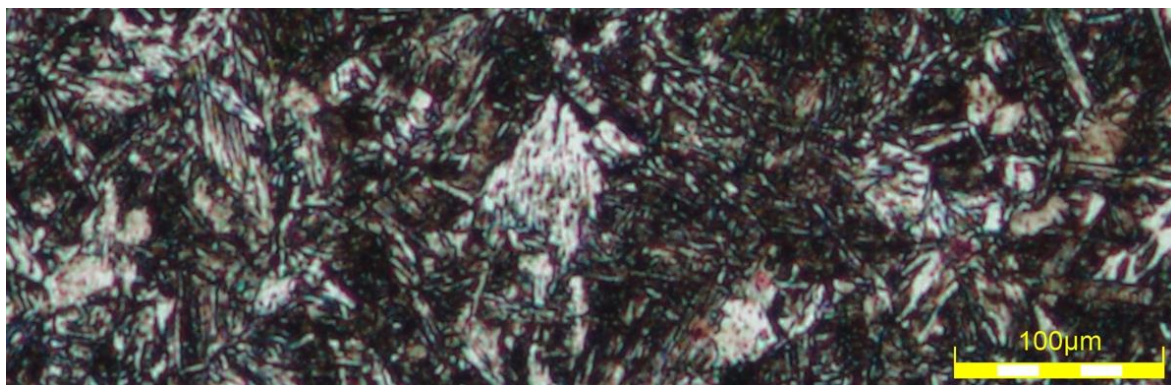
Příloha č. 26



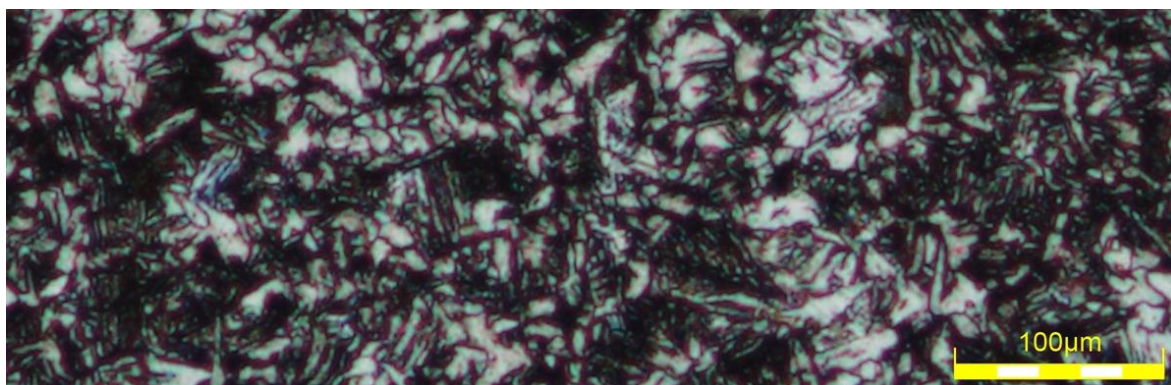
Příloha č. 27



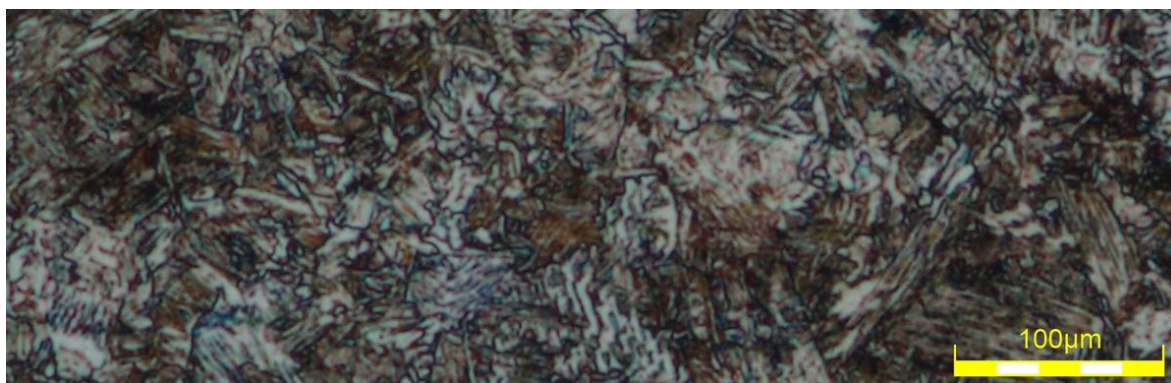
Příloha č. 28



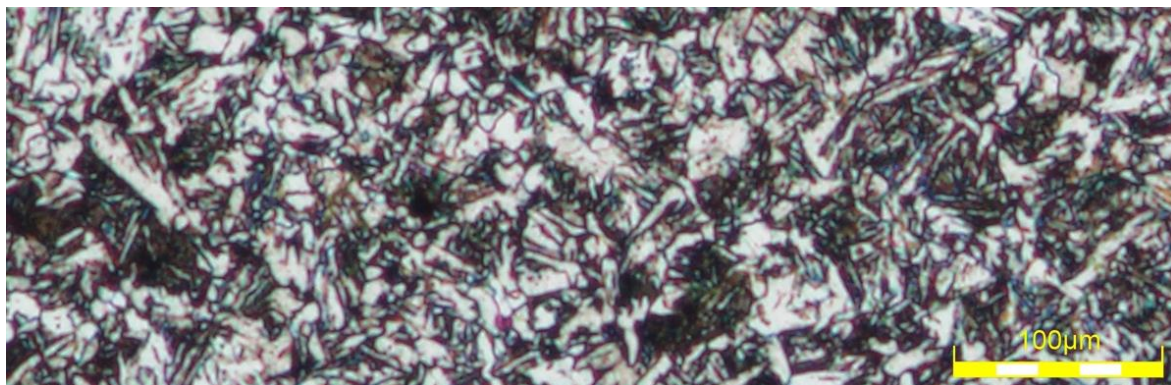
Příloha č. 29



Příloha č. 30



Příloha č. 31



Příloha č. 32

