

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Stanovení součinitele přestupu tepla s ohledem na rychlost proudění
kalicího média metodou numerické simulace

Autor: **Bc. Václav Auterský**
Vedoucí práce: **Ing. Soňa Benešová, Ph.D.**

Akademický rok 2014/2015

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Auterský	Jméno Václav	
STUDIJNÍ OBOR	3911T016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Benešová, Ph.D.	Jméno Soňa	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Stanovení součinitele přestupu tepla s ohledem na rychlost proudění kalicího média metodou numerické simulace		

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

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	67	TEXTOVÁ ČÁST	41	GRAFICKÁ ČÁST	26
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce se zabývá posuzováním vlivu ochlazovacího prostředí při kalení. Zejména vlivu rychlosti proudění a teploty kalicího oleje. Dále stanovením koeficientů přestupu tepla, které byly získány numerickou simulací v pomoci software Deform.
KLÍČOVÁ SLOVA	Deform, ocel C35, součinitel přestupu tepla, kalení, numerická simulace, ochlazovací prostředí

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Auterský	Name Václav	
FIELD OF STUDY	3911T016 “ Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Benešová, Ph.D.	Name Soňa	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Determination of the heat transfer coefficient with respect to the flow velocity of the quenching medium by numerical simulations		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Material Science and Technology	SUBMITTED IN	2015
----------------	------------------------	-------------------	---------------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	67	TEXT PART	41	GRAPHICAL PART	26
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The thesis deals with the evaluation of impact of cooling environment during quenching. Especially the influence of flow velocity and temperature of quenching oil. Further by determining the heat transfer coefficients which were determined by numerical simulations using software Deform.
KEY WORDS	Deform, Steel C35, convention koeficient, quenching, computer simulation, cooling environment

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucí práce Ing. Soně Benešové, Ph.D. za poskytnuté rady a čas při zpracování diplomové práce.

Také chci poděkovat rodině a přátelům za podporu.

Obsah

Obsah.....	1
Úvod.....	3
1 Proces kalení oceli s důrazem na kalení do oleje.....	4
1.1 Ochlazování kovů.....	4
1.1.1 Přenos tepla vedením při kalení.....	4
1.1.2 Přenos tepla prouděním.....	5
1.1.3 Přenos tepla sáláním.....	5
1.2 Prostředí pro ochlazování.....	5
1.2.1 Součinitel přestupu tepla α	5
1.2.2 Intenzita ochlazování.....	6
1.2.3 Průběh ochlazování.....	6
1.2.4 Rychlost ochlazování.....	6
1.2.5 Leidenfrostův jev.....	6
1.3 Kalící média.....	7
1.3.1 Vzduch.....	8
1.3.2 Soli.....	8
1.3.3 Kovy.....	8
1.3.4 Voda a vodní roztoky [4].....	9
1.3.5 Oleje.....	9
1.4 Kalící oleje.....	9
1.4.1 Druhy kalících olejů.....	10
1.5 Fyzikální, chemické a obecné vlastnosti olejů.....	10
1.5.1 Viskozita.....	10
1.5.2 Bod hoření.....	11
1.5.3 Bod vzplanutí.....	11
1.5.4 Neutralizační číslo.....	12
1.5.5 Stárnutí oleje.....	12
1.5.6 Voda v oleji.....	12
1.6 Ochlazování oceli v olejové lázni. Kalení oceli v oleji – fáze parního povlaku, fáze varu, konvekční fáze.....	13
1.6.1 Fáze parního povlaku.....	13
1.6.2 Fáze varu a vývinu bublin.....	14
1.6.3 Fáze konvence.....	14
1.7 Křivky chladnutí IRA a ARA.....	15
1.7.1 Austenitizace.....	15
1.7.2 Izotermický rozpad austenitu – IRA.....	15
1.7.3 Anizotermický rozpad austenitu - ARA.....	16
2 Numerické simulace pro tepelné zpracování.....	17
2.1 Současné trendy numerických simulací pro tepelné zpracování.....	17
2.2 Matematické modelování.....	17
2.3 Metoda konečných prvků - Finite Element Method - FEM.....	18
2.4 GM Quenchometer podle ASTM 3520.....	18
2.5 ISO 9950/ASTM D6200.....	19
2.6 Metoda teplotního gradientu TGQAS.....	20
3 Experimentální část.....	21
3.1 Cíle experimentu.....	21
4 Získávání vstupních dat.....	22

4.1	Vstupní parametry	22
4.1.1	Experimentální zařízení	22
4.1.2	Průběh rychlosti ochlazování v závislosti a čase	22
4.2	Ztotožnění podmínek simulace s podmínkami z experimentálního zařízení	27
4.3	Postup a podmínky simulace koeficientu přestupu tepla	28
4.3.1	Základní nastavení v software Deform	28
4.3.2	Rozdělení tělesa na konečný počet prvků	30
4.3.3	Postup simulace	31
4.4	Kalící olej DURIXOL W72 - ECOSOND s.r.o.	32
4.5	Výsledky – koeficienty přestupu tepla	32
5	Zhodnocení výsledků – porovnání vlivu rychlostí na součinitel přestupu tepla	34
5.1	Teplota lázně 40°C	34
5.2	Teplota lázně 60°C	34
6	Aplikace získaných dat – simulace vzniklé struktury, kalení reálných vzorků	35
6.1	Materiál a tvar zkušebních válečků	35
6.2	Kalení experimentálních vzorků	37
6.2.1	Postup kalení	37
6.2.2	Hodnoty tvrdosti vzorků [14]	37
6.2.3	Zadání fázových transformací	37
6.2.4	Dodatečné vyhodnocení podílu bainitu ve vzniklé struktuře	39
7	Hodnocení struktury, podíl fází	41
7.1	Hodnocení výsledků oceli C35	41
7.2	Struktura reálných vzorků z oceli C35	46
7.3	Diskuze výsledků	47
7.4	Simulace kalení vzorku z oceli SNC 815	48
7.4.1	Diskuze výsledků	51
8	Závěr	52
8.1.1	Simulace součinitelů přestupu tepla	52
8.1.2	Simulace struktury oceli C35 a C45 pro různé rychlosti proudění	52
8.1.3	Simulace struktury oceli SNC 815	52
8.1.4	Možnost využití získaných poznatků v praxi	52
	Seznam použité literatury	53
	Seznam příloh	55

Úvod

Kalení je jedním z nejrozšířenějších druhů tepelného zpracování. K dosažení požadovaných vlastností zakalených výrobků často vede zdlouhavá a náročná cesta. V té je nutné správně volit kombinace procesů ohřevu na konkrétní teplotu, výdrži na teplotě a ochlazování v prostředí určitou rychlostí. Často nezbyvá nic jiného, než postupovat metodou pokus-omyl, což je časově náročné a nákladné.

Neustálý rozvoj technologií otevírá nové cesty, které usnadňují přístup k finálním požadovaným vlastnostem výrobku. Vybrat tu nejvhodnější variantu od způsobu ohřevu až po velké množství ochlazovacích prostředí je během na dlouhou trať. Při hledání optimálního kompromisu je vítán každý prostředek, který zjednoduší rozhodování. Jedním z nich je právě numerická simulace. Tou je možné rychle a jednoduše ověřit procesy nanečisto.

Díky rozvoji výpočetní techniky ke konci 20. století bylo umožněno vytvoření nástrojů pro řešení složitých matematických rovnic, popisující jednotlivé fyzikální děje. Pomocí softwarů pro numerické simulace lze nahlédnout do průběhu jednotlivých procesů nebo předpovídat výsledné vlastnosti výrobků. Díky tomu může být snížen počet potřebných reálných experimentů, se změnami vstupních parametrů lze řešené úlohy snadno upravovat a vybrat tak nejvhodnější variantu. Numerické simulace výrazně zkracují dobu vývoje, zkvalitňují výrobu a pomáhají odhalit slabé články v řetězci výroby.

Tato diplomová práce byla tvořena souběžně s diplomovou prací Ing. Jindřicha Kaizra: Vliv parametru chemicko-tepelného zpracování na deformace ozubených kol. V diplomové práci se zaměřuje zejména na vliv kalícího média – rychlost proudění a teplotu. Tento vliv byl dán do souvislosti s deformacemi ozubených kol. Smyslem bylo tedy na tuto problematiku navázat a zmapovat průběhy ochlazování kalící lázně. Získání koeficientů přestupu tepla pomůže odhalit, jak se projeví nastavení parametrů na budoucí strukturu materiálu ozubených kol. Znalost těchto koeficientů je v praxi velkým přínosem, například právě u rozměrných ozubených kol. Numerická simulace může podhalit, co se bude skrývat pod povrchem, zda struktura uvnitř materiálu bainitická nebo feriticko perlitická. Zjišťování vnitřní struktury na finálním výrobku by vedlo k jeho destrukci. Ale i u kalení malých výrobků lze znalostí součinitele přestupu tepla uspořit nemalé množství práce, času, energií a finančních prostředků, pokud je možnost ověřit proces kalení na virtuálních vzorcích.

1 Proces kalení oceli s důrazem na kalení do oleje

Definice kalení:

Kalení je proces tepelného zpracování, jehož požadavkem je zvýšení tvrdosti a odolnosti materiálu vlivem vzniku částečné nebo zcela nerovnovážné struktury. Při kalení se materiál ohřívá nad austenitizační teplotu, následuje výdrž na teplotě a poté je materiál ochlazován rychlostí větší než kritickou. Podmínkou zakalení je vznik martenzitické nebo bainitické struktury. [4]

1.1 Ochlazování kovů

Teplo je přenášeno třemi způsoby: [2]

vedením – energie přechází z oblasti vyšší teploty do oblasti nižší teploty. Pevné, elektricky nevodivé látky předávají svojí energii rozkmitáním částic, kterou svým pohybem přenesou na sousední částice v oblastech s nižší teplotou. U kovových vodičů je přenos energie značně usnadněn pomocí elektronového plynu.

Prouděním – při ohřevu kapaliny nebo plynu zdola v tíhovém poli dojde ke změně hustoty látky. Teplejší kapalina s menší specifickou hmotností bude stoupat vzhůru oproti chladnější kapalině, která bude klesat dolů. Proudící tekutina přitom tímto způsobem přenáší energii z teplejších míst do chladnějších. Pokud není proudění vyvolané např. mícháním, má kvůli gravitaci poloha zdroje tepla velký význam - kapaliny jsou špatným tepelným vodičem. Při horním ohřevu vody např. ve zkuševce lze přivést vodu k varu, přičemž u dna zůstane voda studná.

Sáláním – tepelná výměna mezi dvěma tělesy je zprostředkovaná vyzařováním a pohlcováním elektromagnetického vlnění. Při vysílání elektromagnetického záření klesne hodnota vnitřní energie o vyzářenou. Záření se šíří přímočaře. Při dopadu na jiné těleso se část odrazí, část projde a pohlcené záření zvýší vnitřní energii tělesa.

1.1.1 Přenos tepla vedením při kalení

Při ochlazování kovu v lázni dochází k vedení v tělese mezi povrchem a jádrem. Vedení tepla se dále uplatňuje ve velmi malé vrstvě kapaliny lpící na povrchu tělesa, kde je vlivem vazkosti na povrchu nulová rychlost proudění. Vedení tepla rozlišujeme na stacionární a nestacionární. Tepelný tok j_v je dán Fourierovým zákonem: [4]

$$j_v = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

S – plocha, Q – teplo, t – čas, λ – tepelná vodivost, T - teplota

Pro nestacionární případ je přenos tepla vedením popsán rovnicí teplotní vodivosti

$$j_v = \frac{1}{c\rho} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{Q'v}{c\rho}$$

c - měrná tepelná kapacita, ρ - hustota, r – radiální souřadnice, $Q'v$ rychlost vzniku nebo spotřeby vnitřního tepla ve výrobku.

1.1.2 Přenos tepla prouděním

K přenosu tepla prouděním je potřeba teplotnosného média – kapaliny nebo plynu. Rozlišuje se konvekce přirozená, kdy je pohyb kapaliny nebo plynu vyvolán změnou hustoty a konvekce nucená, která je vyvolána rozdílem tlaků (například mícháním). Tepelný tok při přenosu tepla prouděním je určen Newtonovým zákonem: [4]

$$j_{pv} = \alpha_p (T_p - T_{vp})$$

α_p - součinitel přenosu tepla prouděním /W.m⁻².K⁻¹/

T_p – teplota prostředí

T_{vp} – teplota povrchu výrobku

1.1.3 Přenos tepla sáláním

Povrchy těles s teplotou $T > 0$ °K sdílí část tepelné energie sáláním. Tyto povrchy vysílají elektromagnetické vlnění do okolí vzniklé návraty excitovaných částic do nižších energetických poloh. Vlnové délky pro tepelné záření se pohybují přibližně od $\lambda = 0,2$ až 100 μm . Působením elektromagnetického vlnění z jednoho povrchu na druhý se část vlnění odrazí, část povrchem projde a zbytek je pohlcen. Díky tomu, že se elektromagnetické vlnění dokáže šířit i vakuem, není pro přenos tepla potřeba žádného média (plynu nebo kapaliny). [4]

Při přenosu tepla sáláním je tepelný tok záření definován Stefanovým-Boltzmannovým vztahem: [4]

$$j_{zv} = C \left[\left(\frac{T_z}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_v}{100} \right)^4 \right]$$

C - součinitel sálání

T_z – teplota zdroje záření

T_v – teplota výrobku

Pro absolutně černé povrchy je $C_0 = 5,7 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$ pro šedé povrchy $C = \epsilon C_0$, přičemž odrazivost ϵ nabývá hodnot $0 < \epsilon < 1$. Součinitel C závisí na tvaru, rozměrech, vzájemné poloze povrchů a jejich šedosti i na vlastnostech přenosového prostředí.

[4]

Teoretický popis kombinace přenosu tepla vedením, prouděním a sáláním, aplikovaný na řešení konkrétního problému v praxi, je velmi složitý. Popisuje se pomocí kritériálních rovnic a potřebné hodnoty se často určují empiricky nebo experimentálně. Proto je přestup tepla v rámci této diplomové práce popsán okrajově.

1.2 Prostředí pro ochlazování

1.2.1 Součinitel přestupu tepla α

Součinitel přestupu tepla je α /W.m⁻².K⁻¹/ je základní charakteristikou prostředí pro ochlazování. Jeho hodnota není konstantní a závisí v širokém rozsahu na druhu, skupenství, teplotě a rychlosti proudění ochlazovací látky.

Při kalení jsou tepelné pochody velmi nestacionární a gradienty teplot vedou k velkým tepelným tokům. Proto součinitele přestupu tepla nelze spolehlivě spočítat a určují se experimentálně.

Na koeficient přestupu tepla, a tedy na kalicí křivky má v neposlední řadě vliv také teplota lázně, velikost kaleného výrobku, oxidy na povrchu a drsnost povrchu. [4]

1.2.2 Intenzita ochlazování

Intenzita ochlazování určuje, s jakou rychlostí povrch předmětu dosáhne teploty okolí. Intenzitou ochlazování H se zabýval Grossmann při hodnocení prokalitelnosti oceli na válcových vzorcích. [4]

„Intenzita H je veličina poměrná, vztažená k intenzitě ochlazování ve stojaté vodě, která má teplotu 25°C Tab. 1/; hodnoty H byly vyčísleny za předpokladu, že ochlazování lze popsat Newtonovým zákonem za použití středního součinitele α , který nezávisí na teplotě, tvaru a rozměrech výrobku. Relativní pohyb prostředí vzhledem k výrobku je podle tab. Tab. 1 respektován polokvantitativně. Za ideální kalicí prostředí ($H = \infty$), kterému odpovídá ideální prokalitelný průměr výrobku, se považuje takové, v němž povrch výrobku dosáhne teploty prostředí v okamžiku, kdy je do něho ponořen.“ [4]

Pohyb		Ochlazovací prostředí			
prostředí	výrobku	vzduch	Olej	voda	vodní roztok
ne	ne	0,02	0,3	1,0	2,2
ne	pomalý	-	0,4 až 0,6	1,5 až 3,0	-
ne	rychlý	-	0,6 až 0,8	3,0 až 6,0	7,5
rychlý	ne	0,08	1,0 až 1,7	6,0 až 12,0	-

Tab. 1 Intenzita ochlazování H v různých prostředích [4]

1.2.3 Průběh ochlazování

Průběh ochlazování je vyjádřen vztahem $T = T(t)$

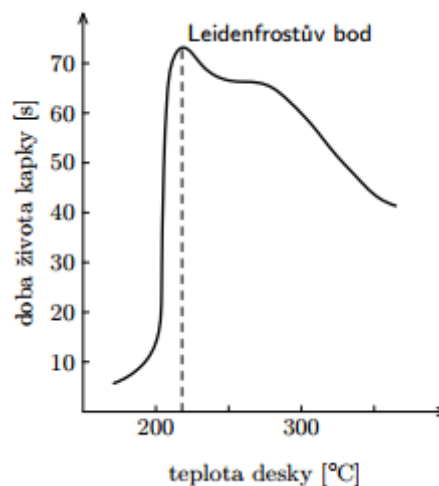
„Průběh ochlazování závisí na způsobu přenosu tepla při různých teplotách výrobků, tedy také na času. U prostředí se změnou skupenství není plynulý. Výsledkem je různá teplotní závislost rychlosti ochlazování pro jednotlivá ochlazovací prostředí. /Obr. 2 /“ [4]

1.2.4 Rychlost ochlazování

Třetí možnost charakterizace prostředí je pomocí rychlosti ochlazování T' och [K.s-1]. Je potřeba, aby do vztahu nebyly zahrnuty vnitřní zdroje tepla (fázové přeměny a vedení tepla z jádra k povrchu). [4]

1.2.5 Leidenfrostův jev

Fyzikální jev, popsáný roku 1732 J. G. Leidenfrostem, který vysvětluje vznik parního polštáře neboli blánového varu. Podmínkou vzniku je výrazně vyšší teplota povrchu tělesa než teplota varu kapaliny, respektive nad Leidenfrostovým bodem – teplota při níž je životnost kapky nejdelší. Z Obr. 1 je patrná závislost doby životnosti kapky vody na teplotě povrchu tělesa. [12]



Obr. 1 Doba života kapek vody na rozpálené desce [2]

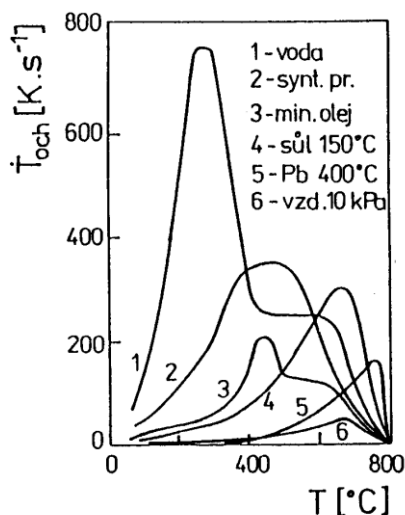
Při styku kapaliny s horkým povrchem (u vody nad 200°C) se kapalina okamžitě vypaří a pára svým tlakem oddělí kapalinu od povrchu. Tím dojde k izolaci kapky vody vrstvou páry od ohřátého povrchu. Vrstva páry je neustále doplňována ze spodního povrchu kapky. Součinitel přestupu tepla páry je přibližně o jeden řád nižší než u vody a teplo je od povrchu do kapaliny přenášeno zářením a pozvolným vedením. Tímto se výrazně zpomalí rychlost odvodu tepla z povrchu a tekutině se prodlouží doba životnosti. Díky tomuto jevu je možná chůze po rozžhaveném uhlí nebo ponoření ruky do roztaveného olova bez vzniku popálenin. [12]

1.3 Kalicí média

Požadavky na kalicí prostředí:

Účelem kalicího média je odvod tepla takovým způsobem, aby bylo zajištěno nadkritické ochlazování. Ideální chladicí médium by mělo v počáteční fázi ochlazovat vysokou rychlostí, aby nedocházelo k vylučování feritu a perlitu z austenitu. Při překročení hranice BS (bainit start), respektive MS (martenzit start), která začíná u nízkolegovaných a uhlíkových ocelí kolem 300°C již rychlostí nižší, aby se snížilo nebezpečí vzniku trhlin a distorze.

Ochlazovací média lze rozdělit do dvou základních skupin. První skupinu tvoří prostředí, která neprodělávají změnu skupenství (vzduch, vodík, roztavené kovy a soli) a mají plynulou změnu součinitele přestupu tepla α . Druhou skupinou jsou prostředí se změnou skupenství (voda a její roztoky, oleje). Při ponoření předmětu ohřátého na kalicí teplotu do ochlazovacího média dochází ke změně skupenství z kapalného na plynné a tím ke skokové změně intenzity ochlazování vlivem rozdílného koeficientu přestupu tepla α jednotlivých skupenství. [4]



Obr. 2 Teplotní závislost rychlosti ochlazování pro různá prostředí [4]

Ochlazovací prostředí a jeho cirkulace	Koeficient přestupu tepla (W/(K.m ²))
Proud dusíku o tlaku 1000 hPa	100-150
Silná cirkulace dusíku o tlaku 5000hPa	300-400
Solná lázeň (GS-430) o teplotě 550°C	350-450
Fluidní lože	400-500
Solná lázeň (GS-140) o teplotě 180°C	600-800
Olej bez cirkulace (20°C - 80°C)	1000-1500
Olej s dobrou s cirkulací (20°C - 80°C)	1800-2200
Voda (15°C - 25°C)	3000-3500

Tab. 2 Tabulka intervalů koeficientů přestupu tepla pro jednotlivá ochlazovací média [5]

1.3.1 Vzduch

Velmi pomalé ochlazování, jeho maximum leží ve vysokoteplotní oblasti. Účinnost ochlazování lze výrazně zvýšit prouděním vzduchu nebo vytvořením vodní mlhy. [4]

1.3.2 Soli

Taveniny jsou na bázi dusičnanů, dusitanů a chloridů sodíku a draslíku. Po ochlazení v roztavených solích je nutno výrobek pečlivě umýt, aby nevznikaly při popouštění na povrchu fleky. [4]

1.3.3 Kovy

Kovové lázně bývají nejčastěji olovené popř. jeho slitiny s cínem. Lázeň je potřeba chránit před oxidací. Výpary z olova jsou jedovaté, výparná teplota je však vysoká 1754°C [4]

Maximum ochlazování roztavených kovů a solí leží v oblasti vysokých teplot. Rychlost ochlazování v oblasti nízkých teplot je značně ovlivněna teplotou lázně. [4]

1.3.4 Voda a vodní roztoky [4]

Dostupné, levné a ekologické ochlazovací médium. Vyznačuje se vysokou intenzitou ochlazování, velkou tepelnou vodivostí, měrnou tepelnou kapacitou a entalpií vypařování. Avšak kontaminací vody mýdlem, olejem nebo masnotou se výrazně mění charakteristika ochlazování.

Vliv teploty vody při dochlazování – s rostoucí teplotou se maximum závislosti $\alpha = \alpha(T)$ posouvá k nižším teplotám, ale jeho úroveň se příliš nemění. Hloubka prokalení se snižuje, parní polštář je stabilnější, ale nedochází ke snížení vnitřního pnutí, vzniku deformací a trhlin.

Ohřevem vody se nelze přiblížit k průběhu ochlazování oleje a průběh ochlazování ve vodě je málo závislý na kalící teplotě.

Zvýšením intenzity ochlazování závisí na snížení stability parního polštáře. Toho se docílí cirkulací lázně nebo přidáním přísad snižujících stabilitu parního polštáře a zvyšují teplotu varu vody.

Roztok vody a louhu NaOH

5-15% roztok jeho výhodou je vysoká rychlost ochlazování v oblasti perlitu, snížení rychlosti ochlazování pod teplotou 200°C, menší ohřátí lázně oproti vodě. Výpary je nutné odsávat, ochladit a degradovat je pomocí atmosférického CO₂.

NaCl+KNO₃

10-15% roztoky ve vodě. Opět dochází ke zvýšení intenzity ochlazování v oblasti vysokých teplot a snížení intenzity při nižších teplotách.

Vodní roztok s glycerínem

Vodní sklo, mýdlo a emulze oleje snižují intenzitu ochlazování.

Vodné roztoky polymerů

Jejich vlastnosti je řadí jako mezistupněm mezi vodou a olejem. Výhoda – velmi příznivý (plochý) průběh ochlazování v oblasti středních teplot, nehořlavé, neznečišťují výrobky.

Nevýhody – vyšší cena než u olejů, nutná častější kontrola kvality. Aditiva – polyvinylalkohol, polyalkylenglykol polyethyloxazlin, které zvyšují viskozitu na povrchu součástí a vytváří stabilní vrstvu omezující přenos tepla a tím brání vzniku parního polštáře.

1.3.5 Oleje

Oleje patří v současné době mezi nejrozšířenější prostředí pro kalení. Výhody – řádově nižší ochlazovací rychlost v oblasti martenzitické přeměny. Dosahuje se vysokých tvrdostí při malých deformacích. Nevýhody - vyšší cena, hořlavost, malá stálost, nižší ochlazovací účinnost.

1.4 Kalící oleje

Ochlazovací účinek oleje závisí na jeho odpařování. Je důležité zajistit relativní pohyb oleje a součástí např. nucenou cirkulací, aby nedocházelo k místnímu přehřátí oleje, jeho degradaci nebo dokonce vzplanutí lázně.

Zvýšení teploty oleje prodlužuje stabilitu parního polštáře, zároveň snižuje jeho viskozitu a tím podporuje jeho cirkulaci a odvod plynů z lázně. [4], [11]

1.4.1 Druhy kalících olejů

Kalící oleje se skládají ze základu (minerální olej, PEG, syntetický ester, hydrokrakovaný olej) a aditiv, které mají především vliv na kalící charakteristiku a životnost oleje.

Oleje s malou viskozitou a nízkou teplotou vzplanutí

100 mm².s⁻¹ při 50°C, teplota vzplanutí do 150°C. Skládají z naftových a parafinových frakcí. [4]

Oleje s nízkou viskozitou a střední teplotou vzplanutí

Teplota vzplanutí kolem 200°C. Obsahují aditiva pro zlepšení snášivosti. [4]

Oleje s velkou viskozitou a vysokou teplotou vzplanutí

Nejkvalitnější oleje, vysoce výkonné, teplota vzplanutí nad 240°C se používají zejména pro termální nebo lomené kalení velkých výrobků. [4]

Oleje minerální

Jsou chemicky stálejší, dochází k jejich degradaci vlivem oxidace a vlhnutím. Vyžadují častější filtraci a převařování. [4]

Oleje rostlinné

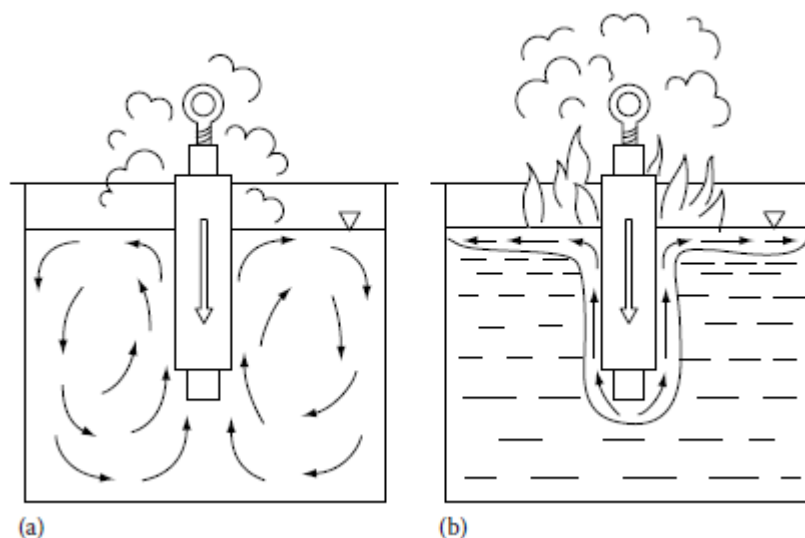
Méně chemicky stálé, mají příznivější průběh ochlazování, ale tento účinek ztrácí rychleji. Degradují zejména při styku s alkalickým prostředím. Oxidaci významně urychlují prvky působící jako katalyzátory (např. Cu). [4]

1.5 Fyzikální, chemické a obecné vlastnosti olejů

1.5.1 Viskozita

Viskosita má vliv na rychlost ochlazování. (viz kapitola 1.6) Z obecného hlediska je známé, že viskóznější oleje ochlazují pomaleji. Jedním z požadavků na oleje je, aby byly po kalení snadno odstranitelné z povrchu. Nedokonale odstraněný olej zanechává při popouštění na povrchu skvrny. Oleje s nižší viskozitou se odstraňují snáze, snižují náklady na provoz čerpadel při chlazení a filtrování. [11]

Podle změny viskozity lze určit stárnutí oleje. Zvýšení viskozity a bodu vzplanutí indikuje větší podíl sazí a oxidaci, naopak nižší viskozita znamená chemický rozklad a degradaci oleje. Viskozita ovlivňuje i přirozenou cirkulaci oleje a tím na riziko vzplanutí. U méně viskózních olejů probíhá přirozená konvence ve větším objemu okolo tělesa a teplo se předá do širšího okolí. U řidších olejů ohřátá kapalina rychle vystoupá vzhůru a drží se u hladiny. Proudění probíhá v menším objemu a hrozí nebezpečí přehřátí oleje viz Obr. 3. [4], [5], [11]



Obr. 3 Vliv viskozity na riziko vzplanutí případ a) nízká viskozita a nízký bod vzplanutí případ b) vysoká viskozita, vysoký bod vzplanutí oleje [5]

1.5.2 Bod hoření

Bod hoření je definován jako teplota, při které vzniká takové množství plynů, že se při styku s ohněm vznítí. Tyto body slouží k určení maximální provozní teploty lázně, kdy je ještě zaručena bezpečnost. Přípustná provozní teplota se uvádí asi 30 °C pod bodem hoření a 60 - 80 °C pod bodem vzplanutí. [11]

Nebezpečí vznícení hrozí zejména u velkých součástí s velkým povrchem, riziko se zvyšuje pokud je nedostatečný poměr hmotnosti oleje v lázni ku hmotnosti výrobku a nedostatečným ponořením do lázně. Pokud však dojde k požáru, hasí se zamezením přístupu vzduchu (zakrytí nádrže) zvýšením cirkulace lázně nebo CO₂ hasícími přístroji. [11]

1.5.3 Bod vzplanutí

Bod vzplanutí bývá určován častěji. Je definován jako bod, při kterém výpary na povrchu oleje při styku s ohněm hoří déle než 5 sekund. [11]

Charakteristika	Jednotka	Rozsah hodnot
Bod vzplanutí	°C	160-310
Bod hoření	°C	172-320
Hustota při 15°C	kg/L	0.849-0.933
Kinematická viskozita při 50°C	Mm ² /s (cSt)	9.44-284.5
Index viskozity	-	0-152
Podíl vody	%	0-0.1
Neutralizační číslo	Mg KOH/g	0.02-3.60
Číslo zmydelnatění	Mg KOH/g	0.1-54
Stanovení karbon. zbytku	%	0-3.10
Popel	%	0-3.30

Tab. 3 Rozsahy fyzikálně chemických vlastností kalících olejů [5]

1.5.4 Neutralizační číslo

Určuje množstvím hydroxidu draselného potřebného k neutralizaci organických kyselin obsažených v jednom gramu oleje. Nejčastěji se tato hodnota pohybuje kolem 1 mg KOH/g, ale může nabíhat hodnot viz Tab. 3. Zvyšování neutralizačního čísla indikuje stárnutí oleje. [11]

1.5.5 Stárnutí oleje

Stárnutí oleje se projevuje především změnou ochlazovacích schopností, zvýšením viskozity oleje, změnou maxima ochlazování a tvorbou částic a nerozpustných produktů. To může způsobit nedokonalé prokalení, vznik fleků na povrchu výrobku, zhoršení omyvatelnosti či do konce zvýšení rizika vzplanutí lázně.

Ke stárnutí oleje dochází působením vysoké teploty, kdy je olej náchylnější k oxidaci, dochází k polymerizaci nebo rozkladu těžkých uhlovodíků na těkavé a plynné látky a vytváření kalu (dehet, asfalt). Prvky jako měď a olovo, případně vlhkost nebo vzduch obsažený v oleji působí jako katalyzátory a stárnutí urychlují.

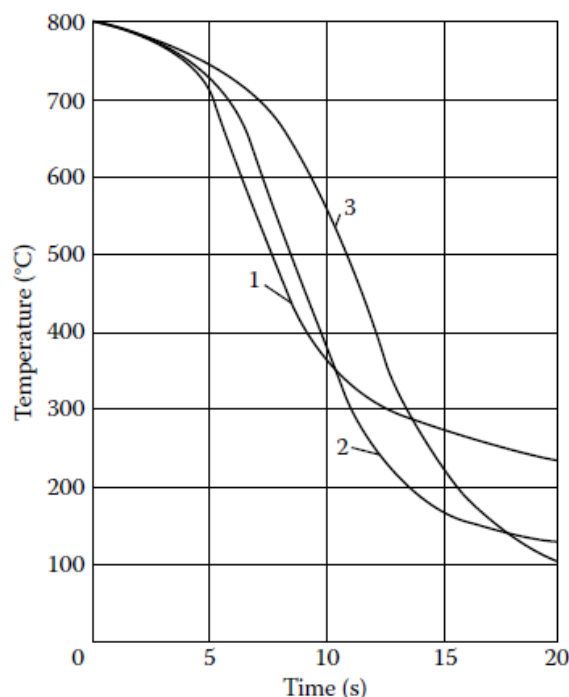
U běžných (parafinových) olejů vede stárnutí oleje k zvýšení ochlazovacího účinku vlivem snížení povrchového napětí a tím zvýšení smáčivosti díky oxidačním produktům.

Proti stárnutí oleje se přidávají aditiva (inhibitory stárnutí)
[5], [6]

1.5.6 Voda v oleji

Voda se dostává do lázně z netěsného systému tepelných výměníků, při chlazení lázně nebo ze vzdušné atmosféry. Její nežádoucí účinek je způsoben rizikem vzniku tzv. měkkých míst na kaleném objektu, kdy vlivem přítomnosti parního povlaku na povrchu součásti je povrch lokálně ochlazován výrazně pomaleji a v těchto místech nemusí dojít vytvoření zákalné struktury. Zároveň rozdílnost tepla vyvolává tepelná i strukturní pnutí, které mohou vést ke vzniku deformací a trhlin. [4], [5], [11]

Přítomnost vody v oleji by neměla být vyšší než 0,1%. Na Obr. 4 je vidět jak významně mění podíl vody ochlazovací charakteristiku oleje.



Obr. 4 Vliv podílu vody v oleji pro koncentrace 1-bez vody, 2- 0,2% vody, 3- 0,5% vody [5]

Nebezpečí požáru nebo výbuchu:

Z 1 litru vody vznikne 600 litrů páry, voda v oleji je nejčastější příčinou požáru v kalárnách, při větších koncentracích (např. u dna nádrže nebo v místech s malou cirkulací) může dojít při prudkém ohřevu k velkému nárůstu tlaku a explozi oleje.

Metody zjišťování –obsah vody v oleji je nutný monitorovat při podezření na výskyt (pěna na hladině, větší množství vzniklých par, charakteristické zvuky praskání (podobně jako u smažení). Kvantitativní zkouškou pro obsah vody v oleji podle Karl-Fischer. [5]

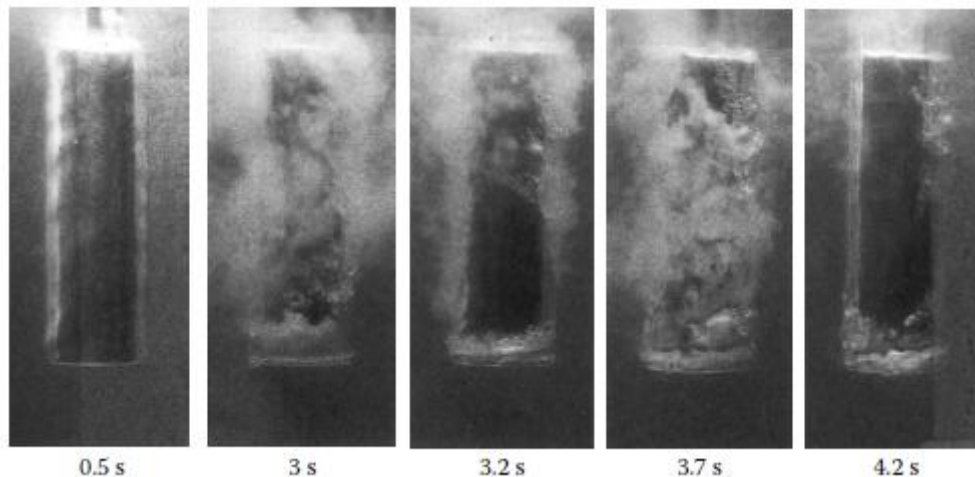
1.6 Ochlazování oceli v olejové lázni. Kalení oceli v oleji –fáze parního povlaku, fáze varu, konvekční fáze

Při ochlazování oceli v olejové lázni nemá součinitel přestupu tepla konstantní hodnotu, ale výrazně se mění. Nelze tedy stanovit průměrný součinitel přestupu tepla pro celou dobu ochlazování.

Vlivem vysoké teploty ochlazovaného výrobku, která je výrazně vyšší než teplota varu oleje, dochází při ochlazování ke změně skupenství. Proto je nutné rozdělit proces ochlazování do tří základních částí.

1.6.1 Fáze parního povlaku

Po ponoření tělesa do lázně dochází k velmi rychlému odvodu tepla, které kapalina spotřebuje při přeměně na páru. Tato rychlost závisí na vlastnostech kapaliny a ponořeného tělesa (tepelné kapacity, měrný povrch, výparné teplo). Vytvořená pára má snahu kondenzovat ochlazením od okolní kapaliny, ale jejím ohřevem schopnost kondenzace klesá a tím se stabilizuje parní polštář. Těleso je celé obklopené párou díky Leidenfrostovu jevu (jako příklad Obr. 5), která má nižší ochlazovací účinek než kapalina. Stabilitu polštáře udržuje přenos tepla z jádra součásti k povrchu, který je větší než výparné teplo kapaliny. [4], [11]



Obr. 5 Vznik parního polštáře na vzorku Cr-Ni oceli 15x45 mm do vodního roztoku s 10% koncentrací polymeru. [5]

1.6.2 Fáze varu a vývinu bublin

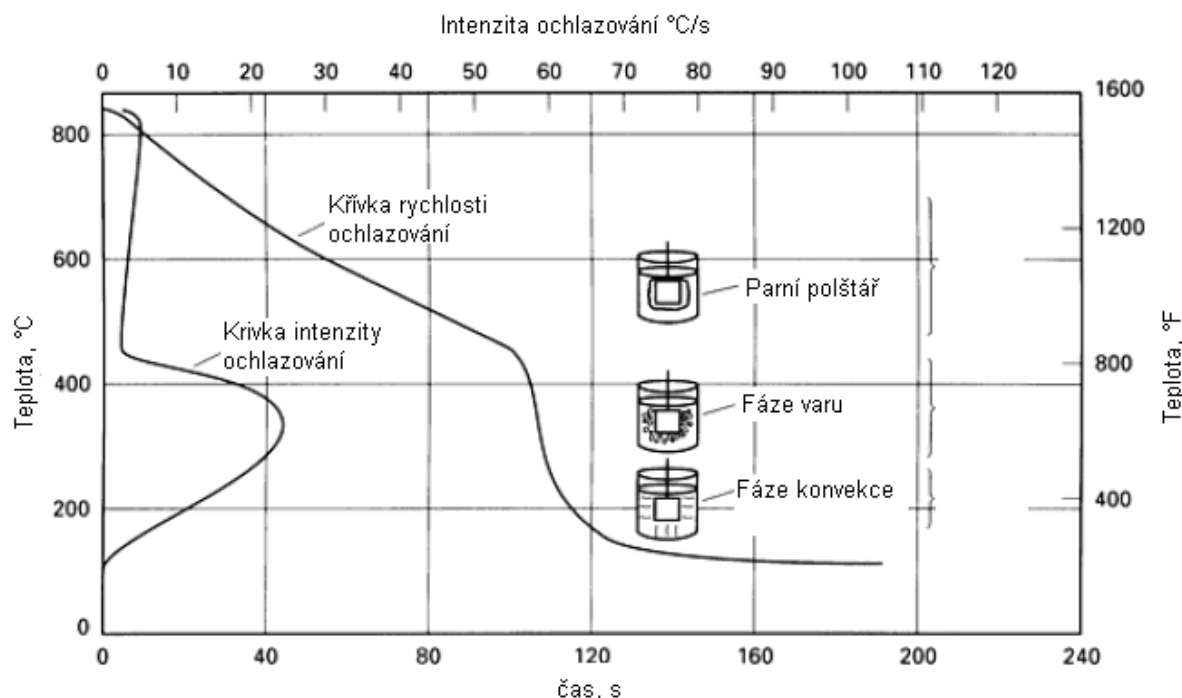
S poklesem teploty se kapalina dostane do kritického intervalu teplot, kdy parní polštář ztrácí stabilitu. Porušením povlaku se kapalina dostane do styku tělesem, změní se na páru, čímž odvede značné množství tepla, ale pára se zde už neudrží a odtrhne se od povrchu a následně je povrch opět smáčen kapalinou. Rychlost odvodu tepla je závislá na rychlosti vypařování a rychlosti odtrhnutí bublin páry (tento průběh ovlivňují vlastnosti kapaliny – povrchové napětí, hustota kapaliny a páry, vnější tlak). Rychlost ochlazování je v tomto intervalu nejvyšší. Na grafickém záznamu intenzity ochlazování (Obr. 6) je tato oblast mezi 450° až 250°C. [4], [11]

Vliv teploty lázně na stabilitu parního polštáře:

Narušováním parního povlaku ať už nucenou cirkulací kapaliny, nebo pohybem ochlazovaného předmětu, se mechanicky narušuje parní vrstva a urychluje se přechod z první fáze do druhé. Naopak vyšší teplota lázně pomáhá stabilizovat parní polštář, zároveň se ale snižuje viskozita kapaliny, což pomáhá lepšímu rozrušování polštáře a tím k lepšímu smáčení povrchu. Proto je chladicí výkon poměrně nezávislý na malém kolísání teploty lázně. [4], [11]

1.6.3 Fáze konvence

Třetí fáze nastává, když teplota povrchu tělesa klesne pod teplotu varu kapaliny. Pára se přestane vyvíjet a těleso je plně obklopené kapalinou. Rychlost ochlazování klesá, vlivem teplotního rozdílu mezi povrchem a kapalinou dochází ke proudění kapaliny. Velký vliv má na ochlazování cirkulace lázně, ta je dána viskozitou kapaliny. U kapaliny s nízkou viskozitou dochází k turbulentnímu proudění kapaliny proudící směrem od povrchu. S rostoucí viskozitou přechází do laminárního obtékání tělesa. [4], [11]



Obr. 6 Grafické znázornění závislosti teploty na čase s průběhem intenzity ochlazování, rychlosti ochlazování a jejich hodnoty, intervaly jednotlivých fází ochlazování [11]

1.7 Křivky chladnutí IRA a ARA

1.7.1 Austenitizace

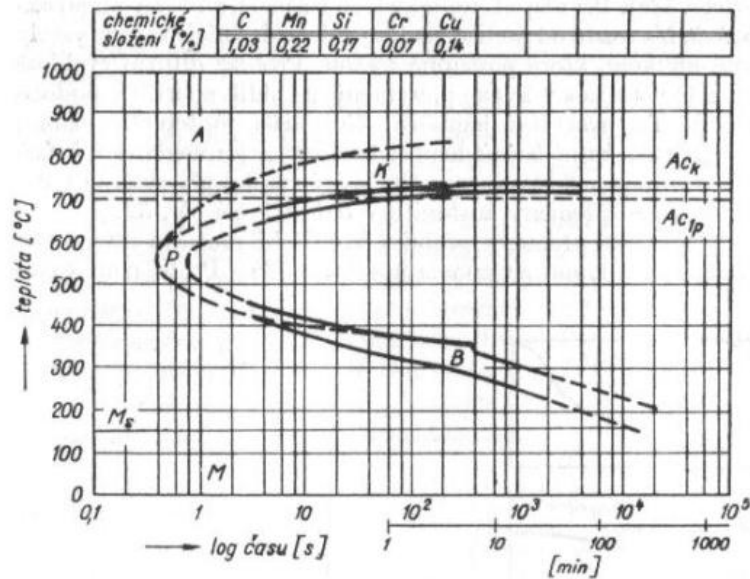
Základem každého překrystalizačního tepelného zpracování oceli je austenitizace. Diagramy rozpadu austenitu nám poskytují informace o vztahu teploty a rychlosti ochlazování. Pro konkrétní rychlosti ochlazování lze vyčíst, jaké transformace austenitu budou probíhat – perlitická, bainitická nebo martenzitická. [4] [13]

1.7.2 Izotermický rozpad austenitu – IRA

Probíhá při pomalé rychlosti ochlazování rozpad austenitu probíhá při konstantní teplotě.

IRA diagramy (nebo také TTT Time-Temperature-Transformation) mají praktický význam při izotermickém tepelném zpracování, např. izotermické žhání, izotermické zušlechťování a u předmětů velmi malých tloušťek nebo průřezů stěny. Pro ilustraci je uveden Obr. 7 IRA diagram nadeutektoidní oceli.

Poloha a tvar křivek závisí především na chemickém složení oceli, velikosti zrna a austenitizační teplotě. [13]



Obr. 7 Diagram IRA nadeutektoidní oceli [13]

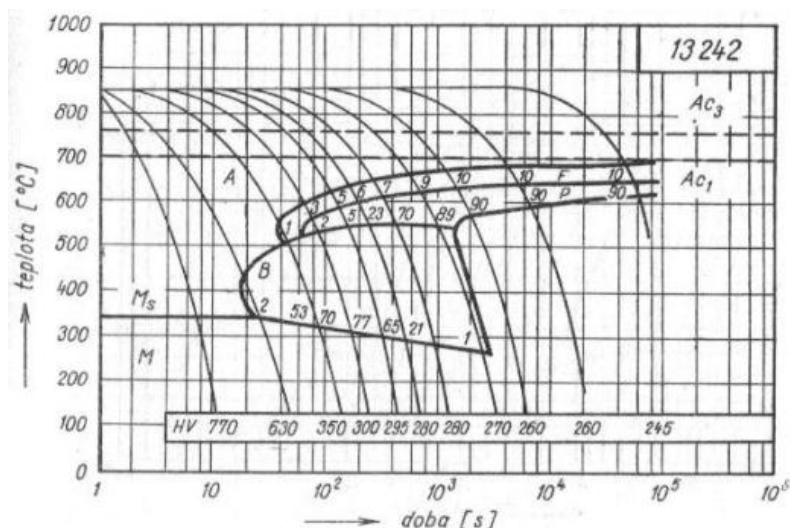
1.7.3 Anizotermický rozpad austenitu - ARA

V praxi mají diagramy ARA (nebo také CCT – Continuous-Cooling-Transformation) větší význam. Proces tepelného zpracování probíhá při plynulém ochlazení.

Tyto diagramy jsou oproti IRA složitější. Poskytují informace o začátcích a koncích intervalů přeměn u plynulého ochlazení austenitu při různých rychlostech ochlazení.

Pro lepší představu výsledné struktury jsou v praxi používány ARA diagramy, se zakreslenými křivkami chladnutí. Na Obr. 8 jsou na průnicích ochlazovacích křivek s hranicemi jednotlivých struktur jsou uvedeny vzniklé fáze v procentech, v dolní části je uvedena výsledná tvrdost struktury při dané rychlosti ochlazení.

[13]



Obr. 8 Příklad ARA diagramu oceli ČS 41 3242, C- 0,42; Mn- 1,82; Si-0,27 Austenit. Tepl. 860°C, vel. zrna 7-6 [13]

2 Numerické simulace pro tepelné zpracování

Cílem simulací je snížení počtu reálných experimentů, jejichž náklady jsou výrazně dražší. Simulace výrazně zkracují dobu vývoje, zkvalitňují výrobu, jsou prevencí proti tvorbě zmetků a tím celkově snižují náklady na výrobu.

Jejich velkou předností je možnost snadné změny vstupních parametrů a tím rozmanitě měnit podmínky simulovaného procesu a nalézt tak optimální variantu pro budoucí výrobu strojních součástí.

V současné době se numerická simulace používá pro simulaci procesů ve všech oblastech strojírenství, nejvíce však v těžkém průmyslu a energetice, automobilovém, lodním a leteckém průmyslu (jako příklad tepelné zpracování rotorů, vřeten, kalení klikových hřídelí, ozubených kol nebo ložisek). Příkladem využití simulací v oblasti tepelného zpracování je kalení v širokém spektru médií, popouštění, žihání, povrchové kalení, ale také cementace nebo nitridace. Pomocí změny parametrů lze zvolit nejvhodnější kalicí prostředí, délku kalení nebo umístění předmětu v peci. Lze stanovit plastickou deformaci, změny materiálové struktury, hodnotit průběh tvrdosti nebo odhalit kritická místa pro vznik vady.

[7]

Software pro simulaci tepelného zpracování: Deform, Sysweld, Visual HT.

2.1 Současné trendy numerických simulací pro tepelné zpracování

Problematika tepelného zpracování, konkrétně kalení, vychází ze získávání zdrojových dat. Data jsou získávána pro jednotlivá ochlazovací prostředí, a to nejčastěji metodou GM Quenchometer podle ASTM 3520, ISO 9950/ASTM D6200.

Problém nastává při aplikaci získaných dat ze zkoušky probíhající v laboratorních podmínkách na reálné podmínky kalení tvarově složitých výrobků. Získaný koeficient přestupu tepla z válcové sondy bude rozdílný než jaký je u reálného tvarově složitého výrobku. U rozdílných průřezů bude parní polštář ulpět na povrchu různě dlouhou dobu, což povede ke zkreslení výsledků. Jako řešení se nabízí sondy s tvarovou a hmotnostní podobností s reálným výrobkem nebo sondy pro výpočet koeficientu přestupu tepla tepelně vodivého modelu s komplexní geometrií a možností v různých místech povrchu sledovat tepelný tok.

V současné době je snaha propojit již známé databáze kalících prostředí z Evropské, Americké a Japonské s databázemi zemí s rychle rostoucí ekonomikou (Brazílie, Rusko Čína, Indie) a vytvoření globální databáze. Na 19. Kongresu Mezinárodní federace tepelného zpracování a povrchového inženýrství, konaného ve dnech 17-20. října 2011 v Glasgow ve Velké Británii, byla pro tyto účely ustanovena supina "LiquidQuenchants Database Project".

Při dokonalé znalosti chování jednotlivých olejů na výrobcích různých tvarů, obsažených v jednotné (jedné) databázi, je možné zvýšit přesnost koeficientů přestupu tepla, a tím simulovat rozložení tvrdosti, stav struktury a vznik pnutí a deformaci v kterémkoliv místě výrobku. Dále je možné navrhnout ideální kalicí médium a zvolit podmínky kalení podle konkrétních požadavků na výrobek.

[3]

2.2 Matematické modelování

Při aplikaci matematických modelů na určitý fyzikální děj nebo proces se pro zjednodušení zanedbávají méně významné veličiny. Velmi složité modely jsou obtížně řešitelné, velký počet parametrů a proměnných prodlužuje doby výpočtů. Příliš jednoduché modely naopak nemusí odpovídat reálnému průběhu. Záleží tedy na určitém „inženýrské citu“. Při použití numerických simulací je důležité získat kvalitní vstupní data, výsledky

simulace ověřit na reálném ději a určit, zda se zjednodušený model příliš neliší od skutečnosti. Teprve poté tento model použit po generování dalších procesů a dějů.

Historie matematických modelů se datuje o 18. a 19. století. Jednalo se o teoretické postupy vytvářející vztahy mezi přírodními zákony a měřitelnými veličinami. Řešení matematických modelů bylo umožněno až ve 20. století díky rozvoji výpočetní techniky. [8]

2.3 Metoda konečných prvků - Finite Element Method - FEM

Numerické simulace jsou založené na řešení diferenciálních rovnic velkého počtu neznámých proměnných s určitými okrajovými podmínkami a jejich soustav. Pro řešení se používá již vytvořených obecných modelů a aplikuje se na konkrétní úlohu volbou fyzikálních veličin. [8], [1]

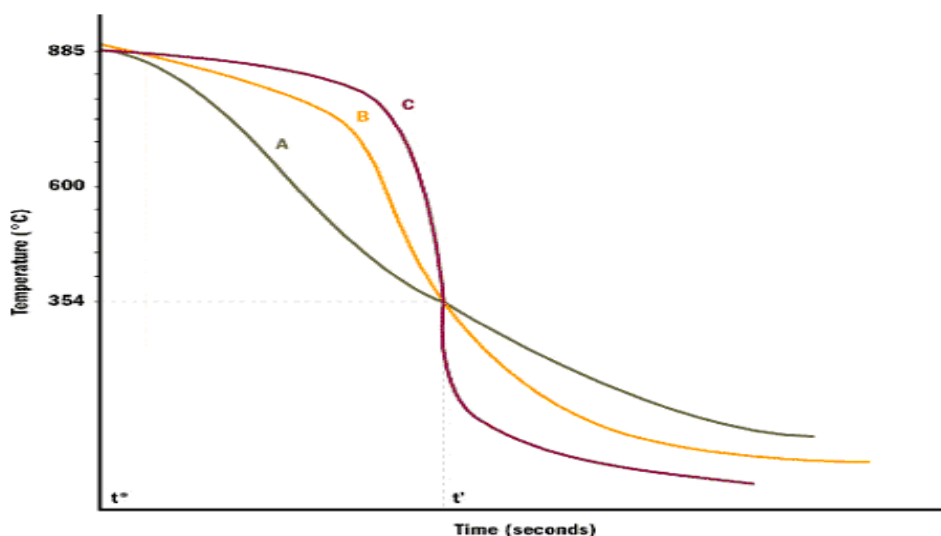
Rozdělením tělesa na konečný počet prvků vhodného tvaru, nejčastěji trojúhelníky, čtyřúhelníky ve 2D, ve 3D pak nejčastěji čtyřstěny, resp. jehly nebo krychle. Prvky jsou spojeny v uzlových bodech konečného počtu a mezi jednotlivými uzly musí platit spojitost funkcí. Dostatečné množství prvků vede k řešení matematického modelu s přijatelnou chybou. [1]

J.-B. Fourier byl jedním z prvních autorů matematických modelů, konkrétně modelem popisující vedení tepla. [8]

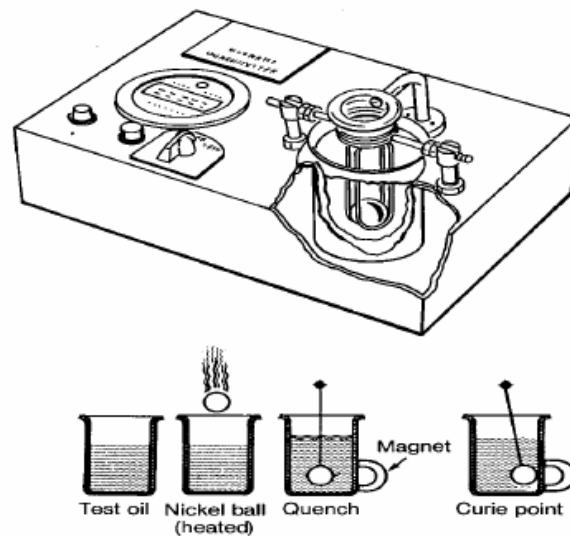
2.4 GM Quenchoometer podle ASTM 3520

Test měření intenzity ochlazování je používán už přes 40 let. Podstatou testu je změna magnetických vlastností kovu při překročení Curieho teploty. Niklová kulička o průměru 22 mm se ohřeje na teplotu 885°C. Následně je ponořena do oleje o objemu 200 ml. U nádrže je magnetická podkova. Ochlazením na teplotu Curieho bodu (pro nikl 354°C) je kulička přitažena magnetem. Výstupem testu je tedy čas ochlazení z teploty 885°C na 354°C. Na Obr. 9 je uveden případ, kdy tři různá ochlazovací prostředí (autor zde neuvádí jaká) ochladí niklovou kuličku z teploty 885°C na teplotu 354°C za stejnou dobu, ale s odlišnými průběhy ochlazování. Pro dnešní použití poskytuje tato metoda příliš málo informací a hlavně dokonale nepopisuje průběh ochlazování. [9]

Pro tyto nedostatky byly vyvinuty následující metody ISO 9950 nebo ASTM D6200 INCONEL 600 [9]



Obr. 9 Záznam křivky chladnutí z Quenchoometeru [9]

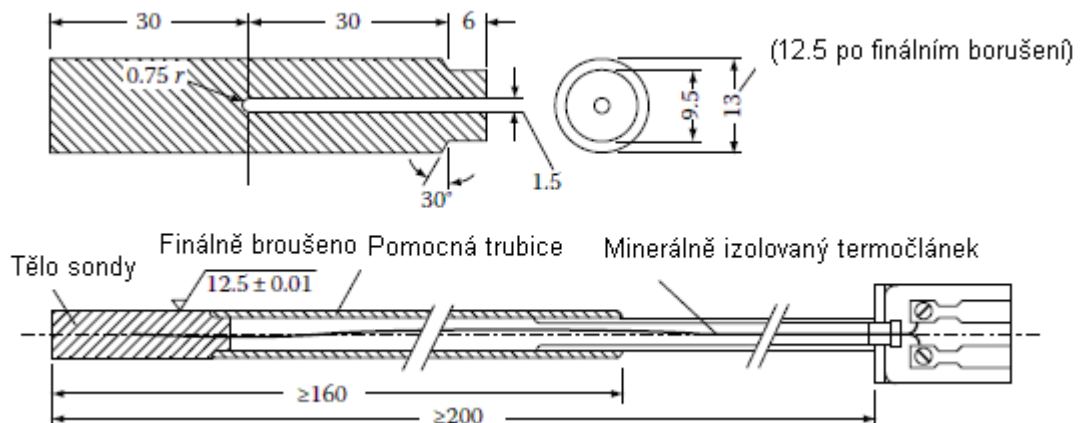


Obr. 10 Schéma přístroje Quenchometer a princip metody ASTM 3520 [9]

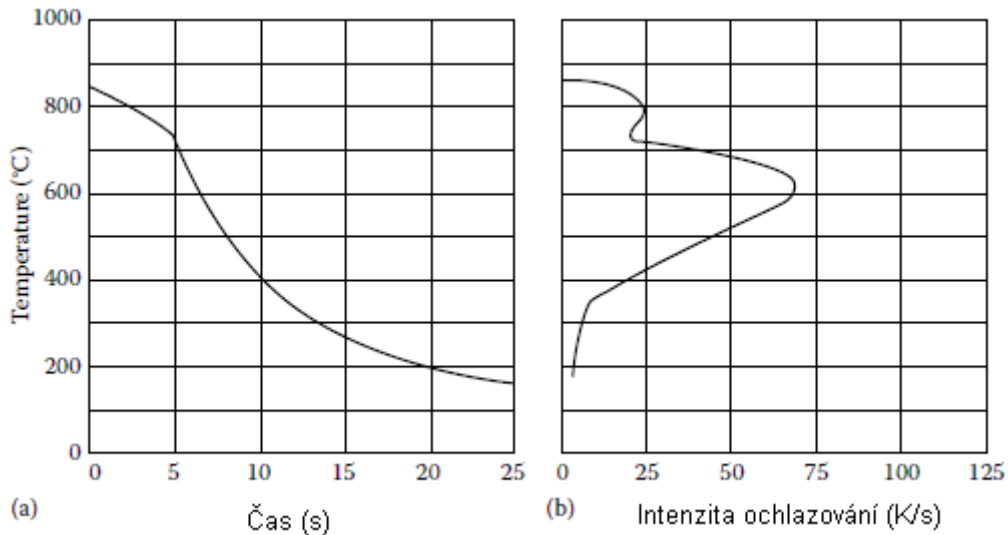
2.5 ISO 9950/ASTM D6200

Dnes nerozšířenější metoda pro určení ochlazovacích schopností kalících médií v laboratorních i reálných podmínkách. Ve středu válečkové sondy o průměru 12,5 mm a délce 200 mm z niklové slitiny Inconel 600 je termočlánkem zaznamenáván průběh změny teploty. Při laboratorním testu dle normy je sonda ohřána na teplotu 850°C a poté je ponořena do lázně o objemu 2 litry. V lázni probíhá pouze přirozená konvekce kapaliny. Test je opakován nejméně 6x. Výstupem z tohoto testu jsou závislosti teploty na čase – rychlost ochlazování a intenzita ochlazování viz Obr. 12.

Vzhledem k relativně malé velikosti sondy jsou výsledky obtížně aplikovatelné na rozmanité tvary a rozměry kalených výrobků v průmyslu. [5], [11]



Obr. 11 Rozměry tepelné sondy, všechny rozměry v mm [5]

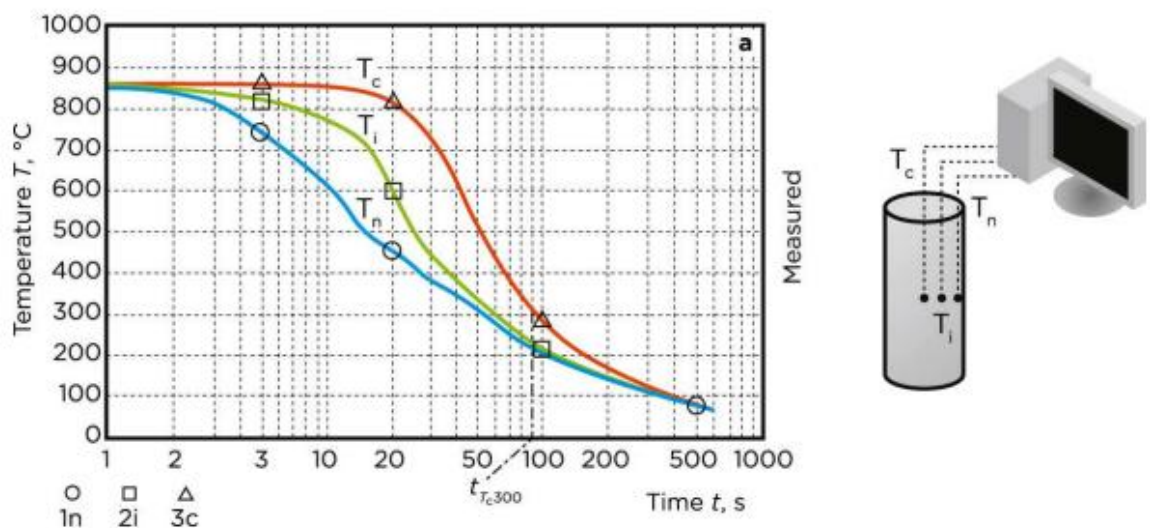


Obr. 12 Záznam z laboratorní zkoušky při ponoření zkušební sondy do oleje a) závislost teplota-čas, b) teplota-intenzita ochlazování [5]

2.6 Metoda teplotního gradientu TGQAS

Metoda využívá podobného principu zjišťování ochlazovacích charakteristik jako metoda ISO 9950, ale její součástí jsou tři softwarové moduly pro rozšíření vyhodnocování testů.

Válcová sonda z nerezové oceli AISI Typ 304 o rozměrech 50 x 200 mm obsahuje tři termočlánky - v ose symetrie, 0,5 mm a 1,5 mm pod povrchem. Díky záznamům při ochlazování ze tří senzorů lze přesně vypočítat tepelný tok uvnitř sondy pomocí softwarového modulu I „Temperature gradient“ a díky tomu určit teplotu v libovolném bodě sondy a v kterémkoli čase ochlazování. Softwarové modul II „Heat transfer“ ze získaných dat stanoví součinitele přestupu tepla α jako funkci času nebo funkci závislou na teplotě povrchu a modul III „CCT-Diagrams“ aplikuje ochlazovací křivky na CCT diagram a určí tak strukturu a tvrdost v libovolném bodě tělesa. Předností této metody je, že lze získat nejen ochlazovací charakteristiky lázně, ale rovnou i určit budoucí strukturu pro rotačně symetrická tělesa a to i s proměnnými průměry. [10]



Obr. 13 Záznam ochlazovacích křivek ve třech různých bodech sondy [18]

3 Experimentální část

Experimentální část navazuje na teoretickou část diplomové práce, která byla zaměřena problematiku tepelného zpracování a to zejména kalení do oleje. Byly popsány různé fyzikální jevy či technologické postupy, které významně ovlivňují proces kalení do oleje a tyto poznatky byly uplatněny při řešení problému v experimentální části diplomové práce.

3.1 Cíle experimentu

Cílem experimentální části je stanovení koeficientů přestupu tepla pro různé teploty a rychlosti proudění ochlazovacího média. Koeficienty jsou určeny pomocí numerických simulací provedených v softwaru Deform.

Získané hodnoty jsou použity pro zjištění vlivu teploty a rychlosti proudění olejové lázně kalícího oleje Durixol W72 na kalení válečku z oceli ČSN 412040 pomocí numerické simulace.

Simulace i reálná měření byly provedeny pro dvě různé teploty lázni: 40 a 60°C a při různých rychlostech lázně: 0 m/s; 0,1 m/s; 0,4 m/s; 0,8 m/s; 1,2 m/s a 1,5 m/s.

Práce je rozdělena do dílčích kroků od zpracování vstupních dat teplotních charakteristik oleje, přes stanovení koeficientu přestupu tepla olejové lázně a jeho následná aplikace pro simulaci vzniklé struktury na ocelovém válečku.

Dále simulace vzniklé struktury oceli ČSN 412040 (DIN C35) a ČSN 412050 (DIN C45) a jejich rozšíření o bainitickou fázi, kterou software Deform pro tyto materiály standardně neobsahuje.

Výsledky simulací jsou porovnány s reálnými experimentálními zkouškami pro teploty provedené pro teploty lázně 40 a 60°C a stejnými rychlostmi proudění uvedené výše a to na vzorcích z oceli C35. Vzorky byly kalené ve stejném oleji i experimentálním zařízením, ve kterém byly zjišťovány teplotní charakteristiky oleje.

4 Získávání vstupních dat

4.1 Vstupní parametry

Základním vstupním parametrem pro určení součinitele přestupu tepla je závislost změny teploty ochlazované sondy na čase, tedy rychlosti ochlazování. Rychlost ochlazování byla stanovena pomocí Quench testu v experimentálním zařízení.

4.1.1 Experimentální zařízení

Měření bylo realizováno na Zařízení pro měření ochlazovací schopnosti kalící lázně, Užitný vzor č. 27372, sestaveného na Katedře materiálu a strojírenské metalurgie ZČU v Plzni. Objem chladícího média v nádrži o rozměrech 350 x 350 x 400mm je 10 litrů. Cirkulace oleje je zajištěna pomocí čerpadla. Rychlost průtoku je regulována pomocí frekvenčního měřiče a snímá se pomocí sondy SEAMETRICS 81. Tato sonda pracuje na principu lopatkového kola a nachází se v kalibrovaném T-kusu pro měření objemového průtoku, z něhož lze snadno dopočítat průtokovou rychlost. Teplota lázně je regulována pomocí ponorného ohříváče Rommelsbacher TS 1001 s výkonem 1000W. [14]



Obr. 14 Tvar a konstrukce čidla SEAMETRICS 81 [15]

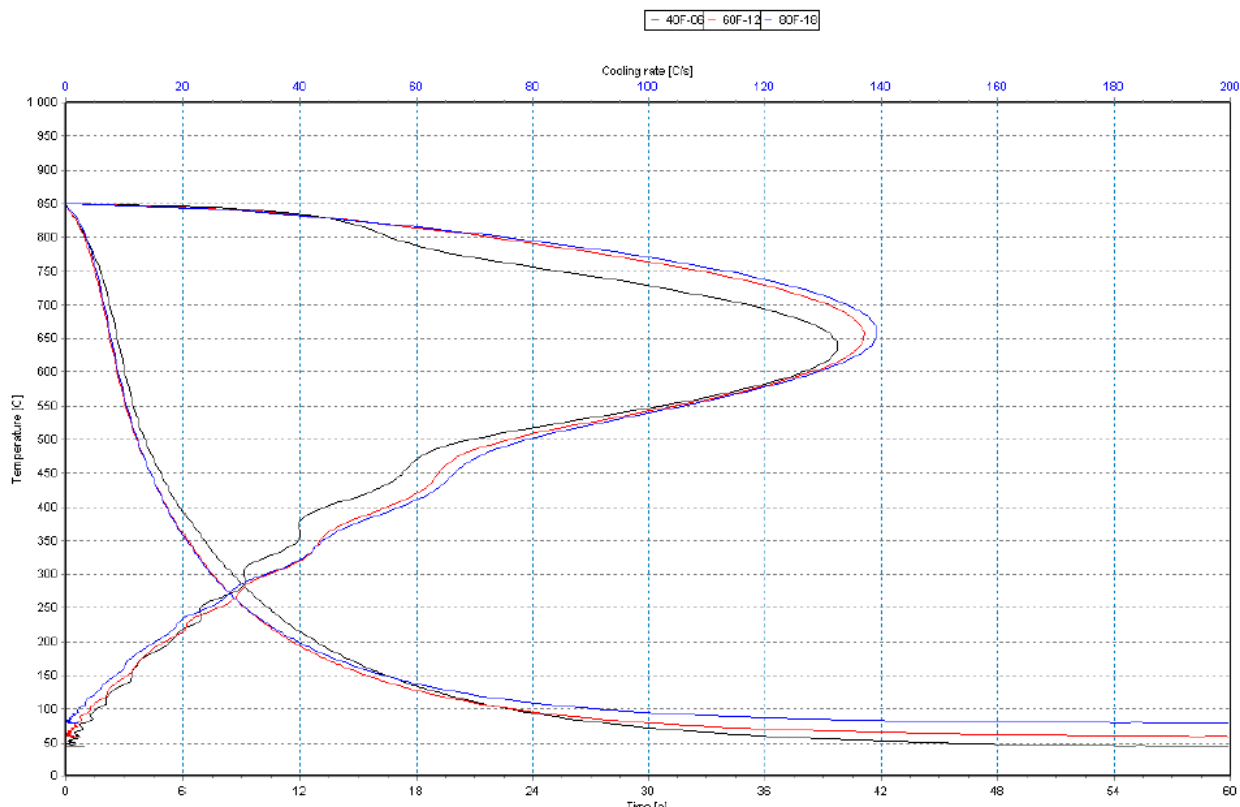
Zkompletování experimentálního zařízení proběhlo v dílnách KMM, ZČU v Plzni. Finální sestavení a připojení veškerého příslušenství se uskutečnilo ve společnosti Ecosond s.r.o. v Čerčanech. Finální sestava je uvedena na Obr. 16.

4.1.2 Průběh rychlosti ochlazování v závislosti a čase

Výsledkem měření v reálné lázni jsou křivky ochlazování proudícího oleje viz Obr. 17 a Obr. 18. Pro snazší porovnání jednotlivých rychlostí jsou záznamy umístěny do společného diagramu. Vznikly tak diagramy pro porovnání různých rychlostí proudění při konstantní teplotě lázně (Obr. 17 a Obr. 18) nebo diagramy při konstantní rychlosti proudění a různých teplotách lázně pro lepší představu vlivu teploty (jako příklad Obr. 15). Porovnáním obou záznamů potvrdilo, že se výrazněji projevuje vliv rychlosti proudění než teploty lázně.

Z grafů byly odečteny teploty po časovém intervalu 2 sekundy do teploty 250°C. Označení rychlostí proudění je uvedeno v Tab. 7 a Tab. 8.

Pozn.: Rychlost proudění byla měřena v prázdné nádrži o objemu 10 litrů, uprostřed. Sonda byla ohřána v peci na teplotu 855°C kvůli kompenzaci tepelných ztrát při přesunu sondy z pece do lázně. Měření započalo při dosažení teploty 850°C. [14]



Obr. 15 Ochlazovací křivky pro konstantní rychlost proudění 1,5 m/s a teploty 40°C – černá, 60°C – červená, 80°C – modrá [14]

Olej 40°C	0 m/s 40A-01	0,1 m/s 40B-04	0,4 m/s 40C-03	0,8 m/s 40D-02	1,2 m/s 40E-05	1,5 m/s 40F-06
čas (s)	t (°C)	t (°C)	t (°C)	t (°C)	t (°C)	t (°C)
0	850	850	850	850	850	850
2	792	795	775	760	730	720
4	748	745	712	550	500	500
6	650	678	528	430	400	392
8	484	506	425	355	328	315
10	400	410	360	300	258	253
12	365	375	325	255	X	X
14	350	350	290	X	X	X
16	328	325	255	X	X	X
18	312	300	X	X	X	X
20	300	280	X	X	X	X
22	292	273	X	X	X	X
24	278	250	X	X	X	X
26	270	X	X	X	X	X
28	264	X	X	X	X	X
30	250	X	X	X	X	X

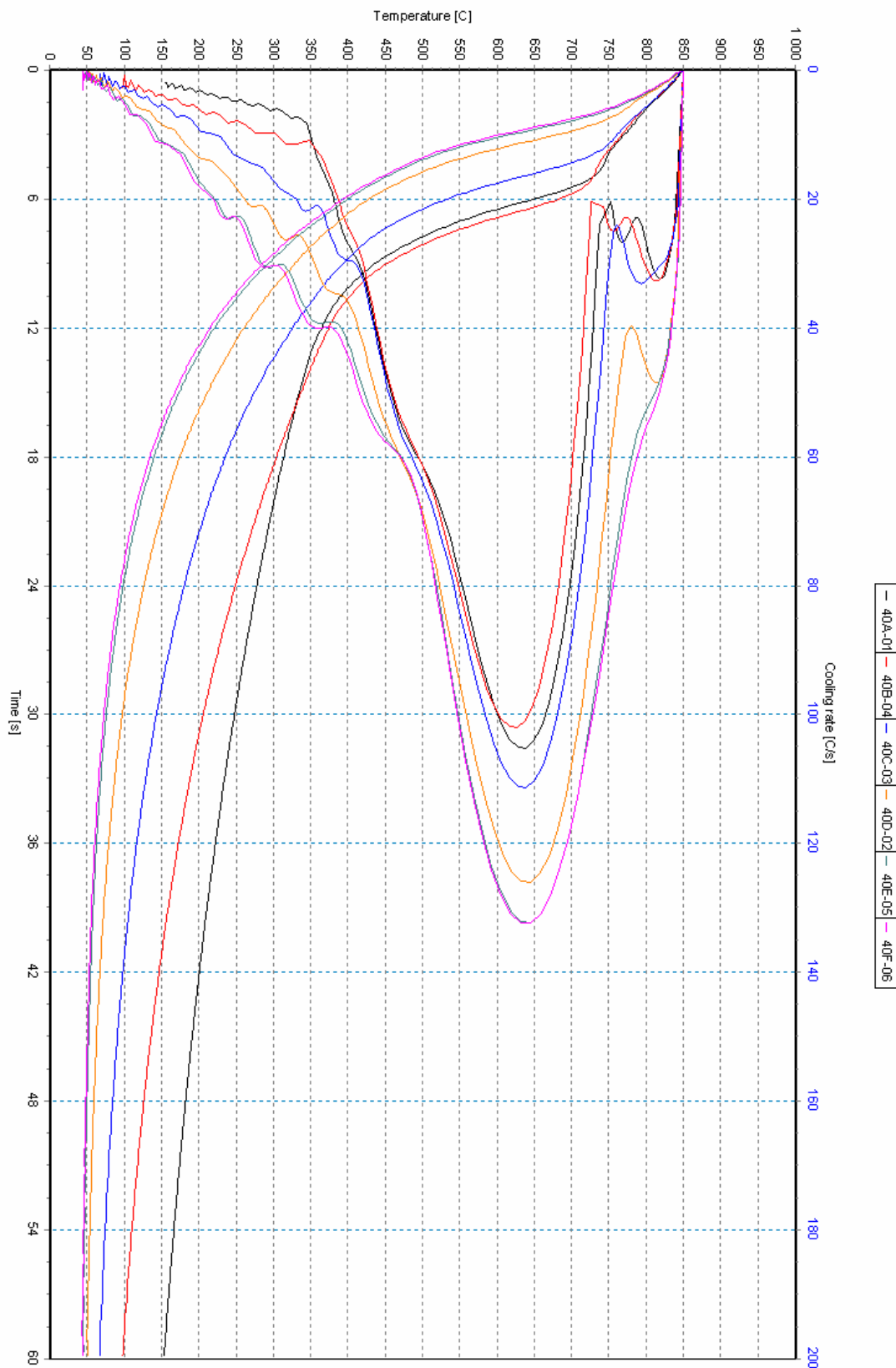
Tab. 4 Odečtené hodnoty teplotních křivek z grafického záznamu pro olejovou lázeň o teplotě 40°C a různé rychlosti proudění

Olej 60°C	0 m/s 60A-07	0,1 m/s 60B-10	0,4 m/s 60C-08	0,8 m/s 60D-09	1,2 m/s 60E-11	1,5 m/s 60F-12
čas (s)	t (°C)	t (°C)	t (°C)	t (°C)	t (°C)	t (°C)
0	850	850	850	850	850	850
2	795	795	795	765	730	700
4	750	745	725	565	500	480
6	608	568	545	430	400	362
8	460	450	435	365	328	275
10	410	395	377	310	258	230
12	375	358	340	265	X	X
14	362	330	310	230	X	X
16	342	280	278	X	X	X
18	331	255	256	X	X	X
20	315	X	X	X	X	X
22	305	X	X	X	X	X
24	295	X	X	X	X	X
26	286	X	X	X	X	X
28	270	X	X	X	X	X
30	258	X	X	X	X	X

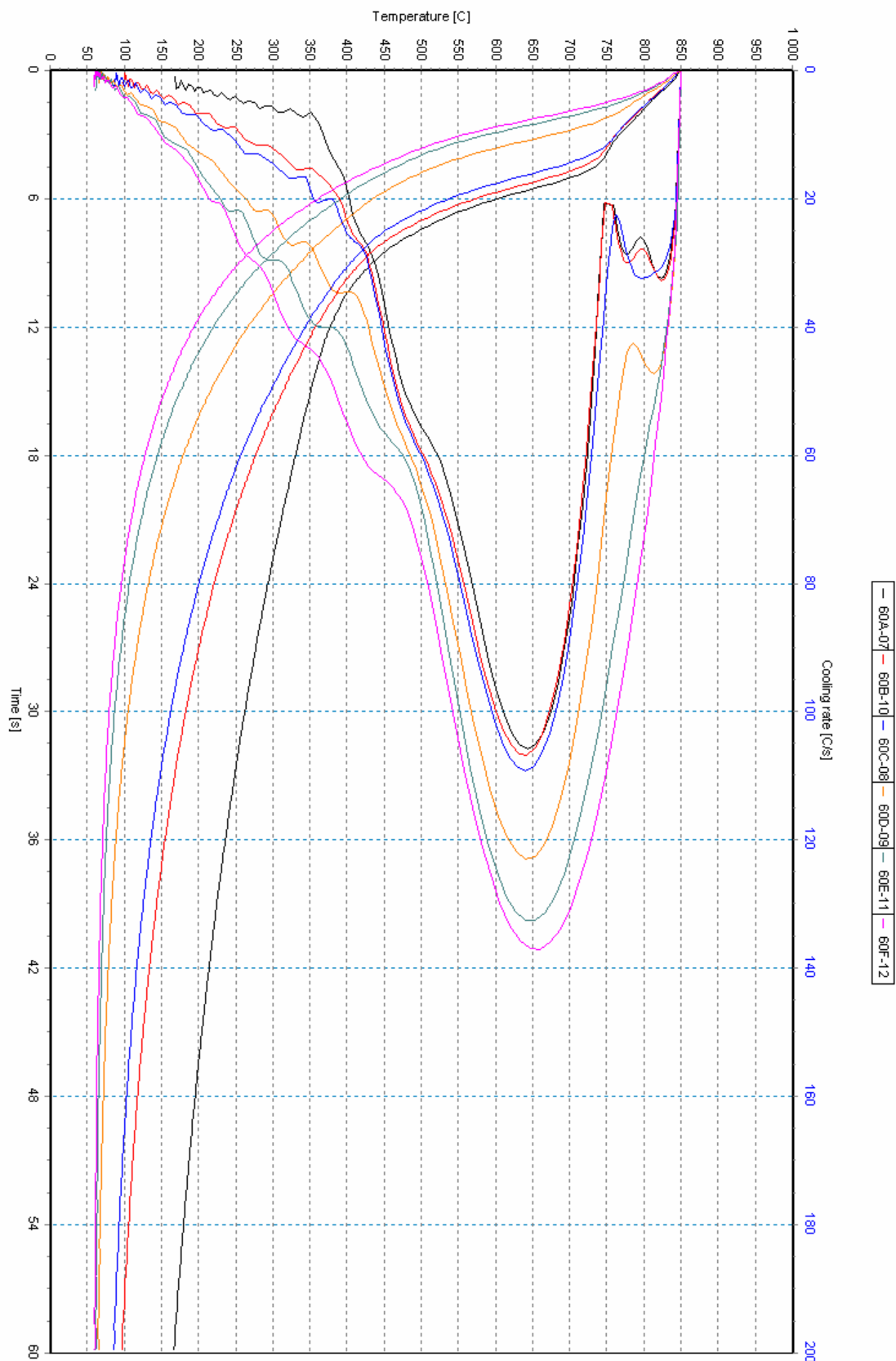
Tab. 5 Odečtené hodnoty teplotních křivek z grafického záznamu pro olejovou lázeň o teplotě 60°C a různé rychlosti proudění



Obr. 16 Kompletní sestava experimentálního zařízení se zapojenými měřicími a regulačními přístroji (regulace teploty, měřič průtoku, frekvenční měnič) [14]



Obr. 17 Grafický záznam závislosti teplota-čas a intenzita (rychlost) ochlazování [°C/s] pro teplotu oleje 40°C [14]



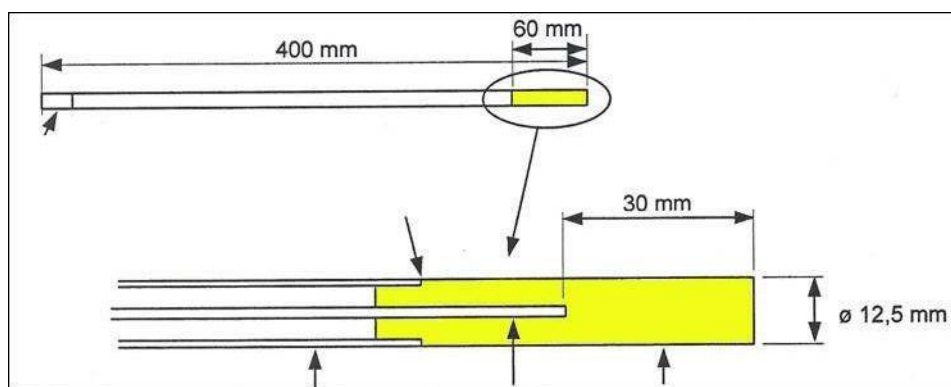
Obr. 18 Grafický záznam závislosti teplota-čas a intenzita (rychlost) ochlazování [°C/s] pro teplotu oleje 60°C [14]

4.2 Ztotožnění podmínek simulace s podmínkami z experimentálního zařízení

Ve snaze co nejvíce se přiblížit při simulacích reálnému experimentu byly počáteční podmínky ztotožněny s reálným průběhem experimentu. Objekt simulace je zvolen tvarově i rozměrově stejný jako sonda z Inconelu, tedy průměru 12,5 mm délky 60 mm. Sondě byl přiřazen materiál INCONEL 600.

Pro správné nastavení je nutné vytvořit funkci závislosti vnitřní tepelné vodivosti na teplotě v materiálové kartě Inconelu. Součinitel pro vnitřní vedení tepla v materiálu není konstantní, jeho hodnota se mění pro různé teploty viz Tab. 6

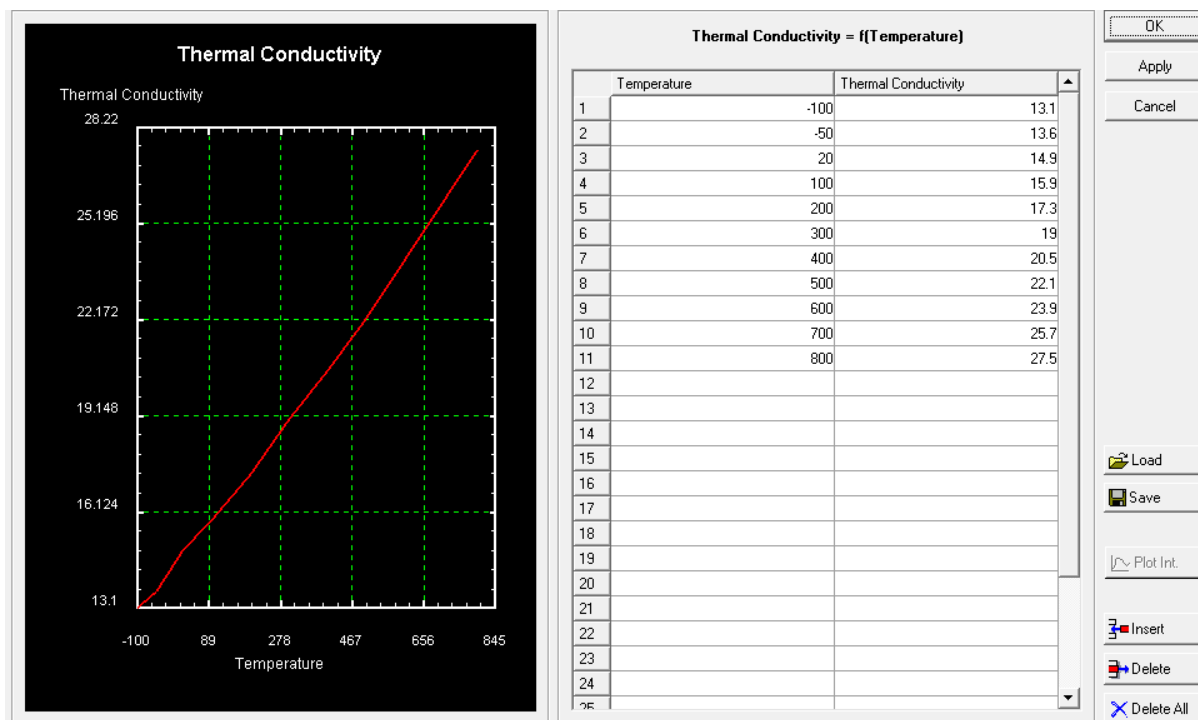
Výchozí teplota 3D tělesa byla nastavena na teplotu 850°C, teplota okolního prostředí byla nastavena na konstantní hodnotu 40°C, respektive 60°C.



Obr. 19 Detail sondy. Žlutě zvýrazněná měřicí část sondy, zdroj: Ecosond s.r.o.

Teplota °C	Tepelná vodivost N/s °C
-150	12,5
-100	13,1
-50	13,6
20	14,9
100	15,9
200	17,3
300	19
400	20,5
500	22,1
600	23,9
700	25,7
800	27,5

Tab. 6 Tepelná vodivost - Inconel600

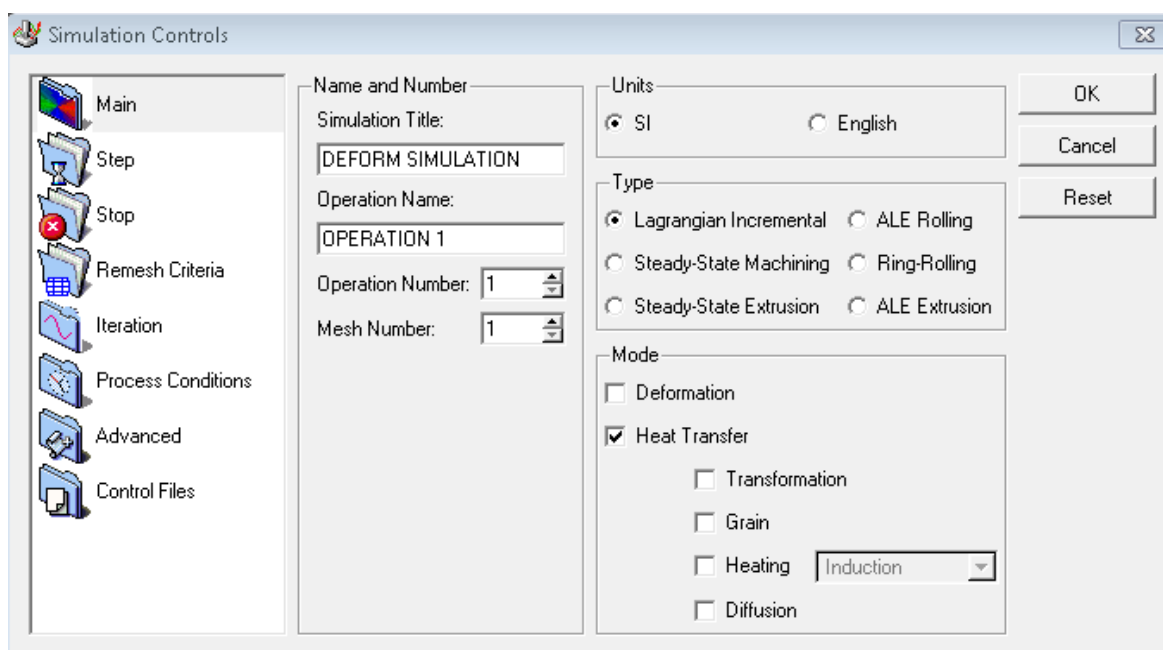


Obr. 20 Nastavení tepelné vodivosti pro Inconel 600, zdroj: Deform

4.3 Postup a podmínky simulace koeficientu přestupu tepla

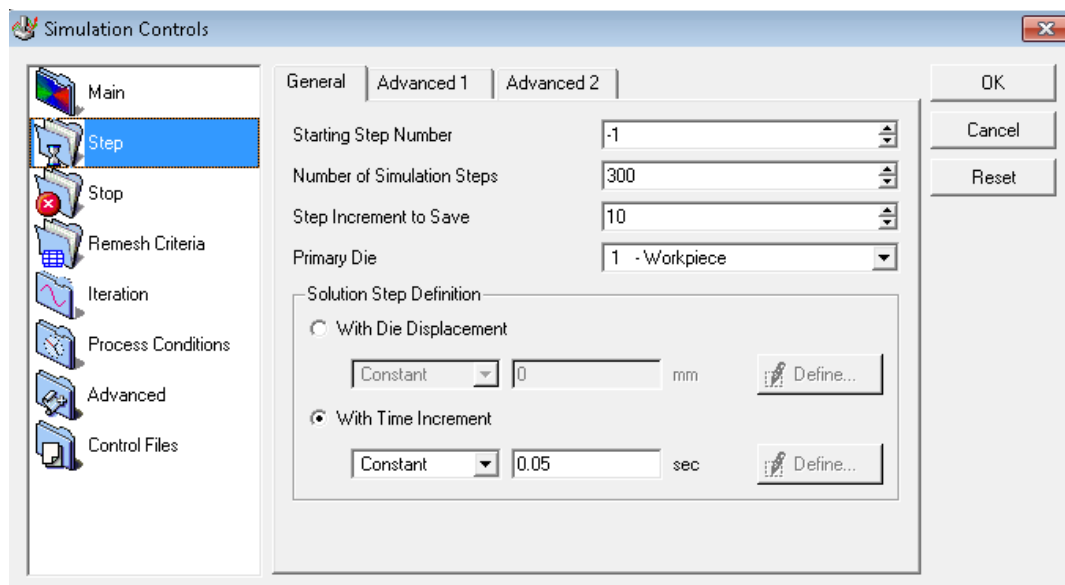
4.3.1 Základní nastavení v software Deform

Nejprve byl v PreProcessoru Deformu 3D založen nový problém, z kterého se dále generuje databáze. V záložce Simulation Controls bylo provedeno základní nastavení – byly zvoleny jednotky soustavy SI a mód programu pro přenos tepla.



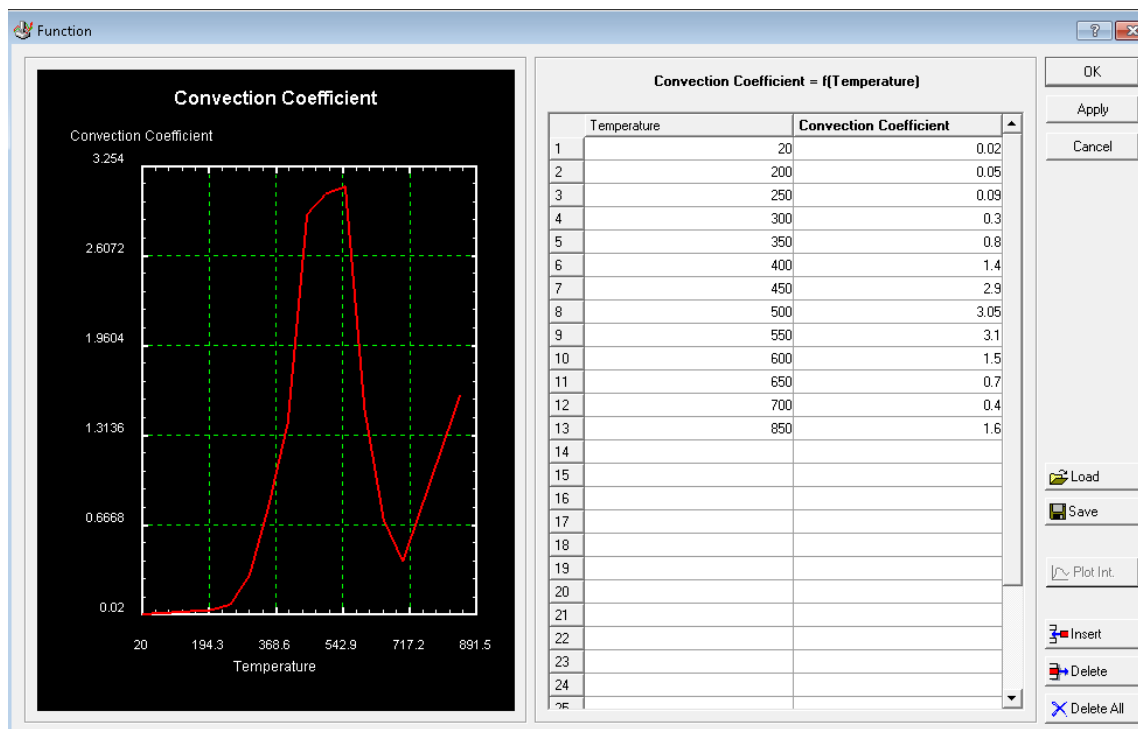
Obr. 21 Základní nastavení simulace, zdroj: Deform

V záložce Step byl definován počet jednotlivých kroků simulace. Ten se odvíjí od potřebného času dosažení teploty 250°C v jádru sondy. Jeden časový krok pro výpočet byl zvolen 0.05s. Pro křivku 40A-01 a 60A-07 je nutné minimálně 600 kroků, pro křivky 40E-05 a 60E-11 minimálně 200 kroků. Zároveň se touto podmínkou výpočet zastaví v požadovaném kroku. Ukládán byl každý 10. krok tedy po 0,5 sekundy.



Obr. 22 Nastavení počtu kroků, zdroj: Deform

V záložce Proces Conditions byl konvekční koeficient definován jako funkce teploty ochlazovaného tělesa (sondy). Jednotlivé hodnoty byly stanoveny od počáteční teploty 850°C, dále v intervalu teplot 700-200°C je parametr korigován pro teploty, které byly vždy o 50°C nižší než teplota předchozí (tj. 700, 650, 600. 550 ...až 200°C, poslední hodnota 20°C)

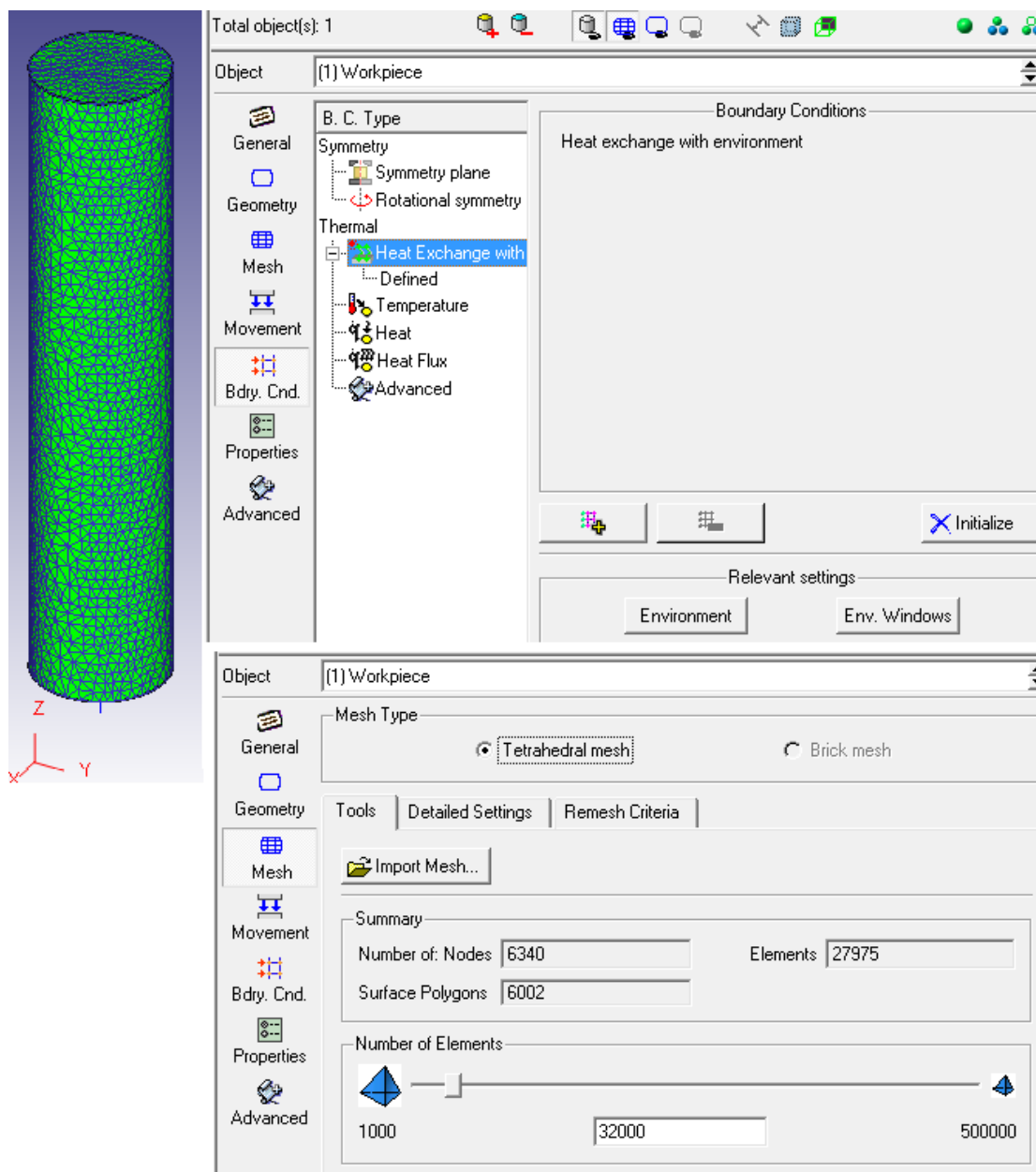


Obr. 23 Nastavení konv. koeficientu v PreProcesoru, zdroj: Deform

4.3.2 Rozdělení tělesa na konečný počet prvků

Pro simulaci součinitele přestupu tepla bylo 3D těleso definované geometrie zasítováno pomocí funkce Mesh na 32 000 elementů, přičemž poměr mezi největším a nejmenším elementem byl 2.

Pro simulaci vzniklé struktury bylo z důvodu časové úspory zvoleno 2D těleso s rozdělením sítě na 5250 elementů a současně se změnil poměr největšího a nejmenšího elementu na 3 z důvodu vytvoření hustější sítě pro hodnocení struktury v oblastech vzorku, kde se zakřivuje geometrie – zejména po okrajích. Zde software upřednostňuje menší elementy a naopak v jádru tělesa, kde lze předpokládat pomalejší změny oproti povrchu pak elementy větší. Dále byla nastavena tepelná výměna celého povrchu tělesa s okolím.

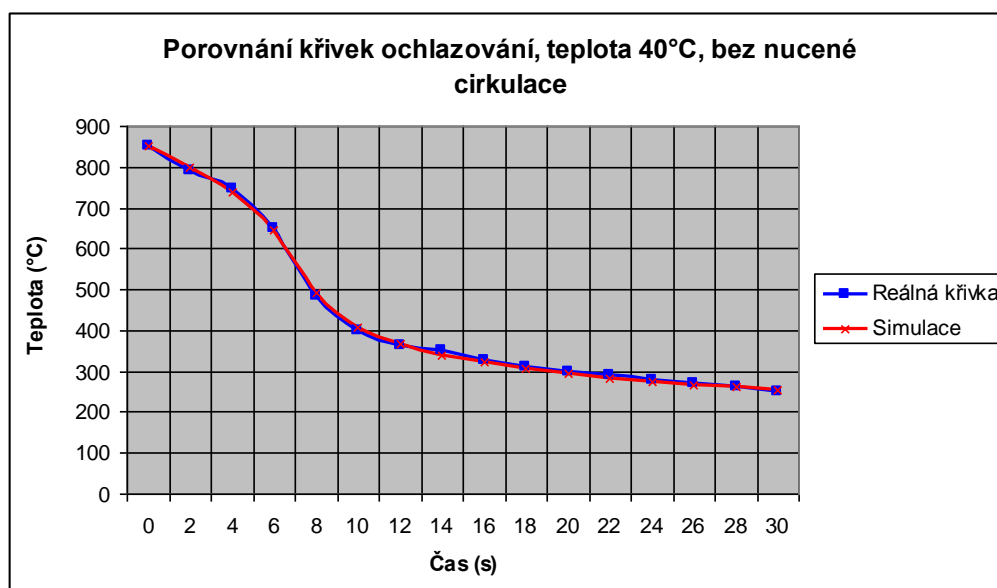


Obr. 24 Rozdělení tělesa, nastavení tepelné výměny s okolím, zdroj: Deform

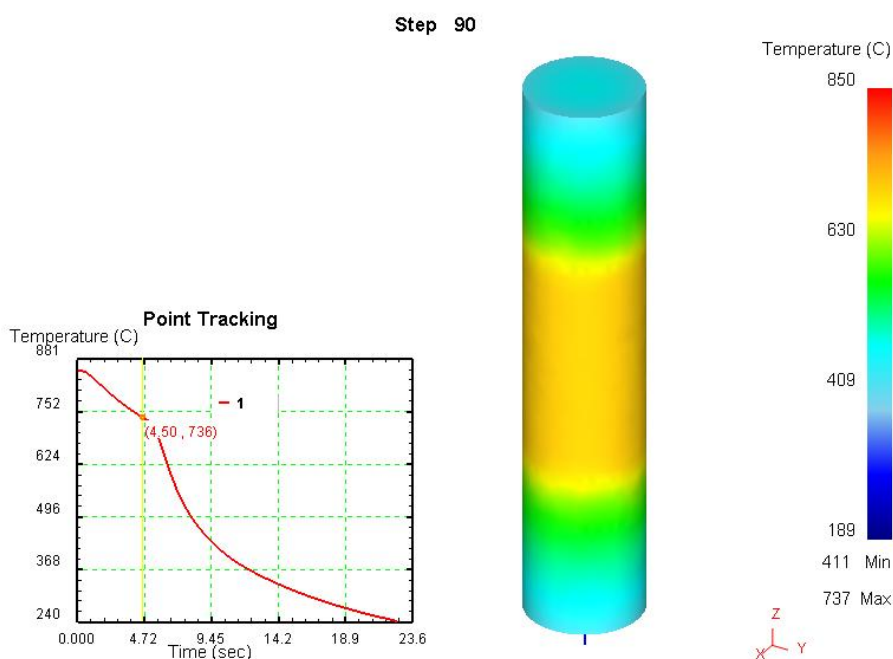
4.3.3 Postup simulace

Po spuštění výpočtu a doběhnutí simulace jednotlivé rychlosti proudění následovala analýza v Post-Processoru. Pomocí funkce Point-Tracking se analyzovala teplota ve středu sondy viz Obr. 25. Po časovém intervalu 2 sekundy byla teplota porovnána s hodnotou z reálné zkoušky (dle Tab. 7 a Tab. 8) a podle velikosti odchylky se následně hodnota koeficientu korigovala v PreProcessoru v záložce Proces Conditions. Poté se vygenerovala nová databáze a spustil se nový výpočet.

Pro ověření správnosti hodnot koeficientů přestupu tepla byl tento postup praktikován pro každou křivku. Jako uspokojující byla odchylka $\pm 10^\circ\text{C}$ od reálné hodnoty což odpovídalo přesnosti hodnot odečtených z grafického záznamu.



Graf 1 Porovnání křivek ochlazování, teplota 40°C, bez nucené cirkulace



Obr. 25 Zjišťování teploty uprostřed sondy vzorku (40A-07) pomocí funkce Point Tracking
zdroj: Deform

4.4 Kalicí olej DURIXOL W72 - ECOSOND s.r.o.

Stručný popis testovaného oleje:

„DURIXOL W 72 a DURIXOL W 71 jsou intenzivně kalicí oleje s vysokou odolností proti odpařování. Oleje jsou určeny pro kalení zboží uspořádaného do vsázek v otevřených i v uzavřených zařízeních pro tepelné zpracování, jako jsou např. víceúčelové pece, průběžné cementační pece, zvonové pece a pece s vodorovnou retortou.“ Přes intenzivní kalicí účinek jsou deformace

zboží kaleného v DURIXOLU W 72 minimální. Olej je svým charakterem dvourozsahový a umožňuje v případě potřeby snižování deformací pracovat v uzavřených pecních zařízeních při trvalé pracovní teplotě až 130°C“ [19]

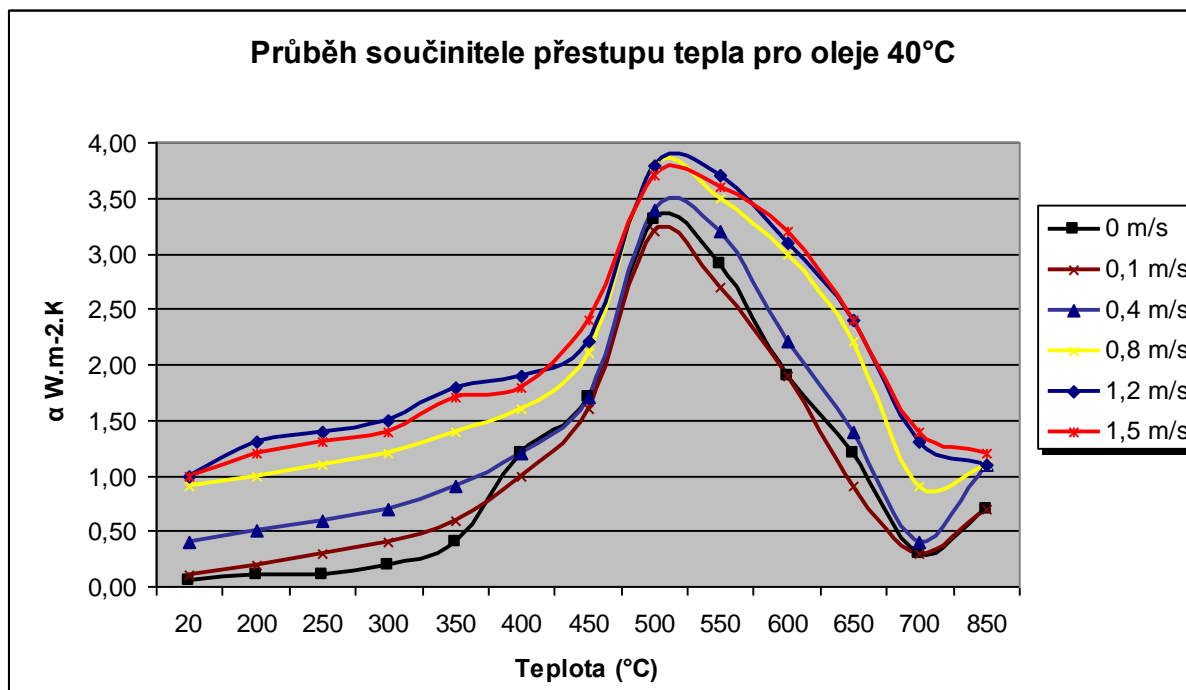
4.5 Výsledky – koeficienty přestupu tepla

Olej 40°C	Konvekční koef. (W/K.m ²)					
t (°C)	0 m/s	0,1 m/s	0,4 m/s	0,8 m/s	1,2 m/s	1,5 m/s
20	0,05	0,10	0,40	0,90	1,00	1,00
200	0,10	0,20	0,50	1,00	1,30	1,20
250	0,10	0,30	0,60	1,10	1,40	1,30
300	0,20	0,40	0,70	1,20	1,50	1,40
350	0,40	0,60	0,90	1,40	1,80	1,70
400	1,20	1,00	1,20	1,60	1,90	1,80
450	1,70	1,60	1,70	2,10	2,20	2,40
500	3,30	3,20	3,40	3,80	3,80	3,70
550	2,90	2,70	3,20	3,50	3,70	3,60
600	1,90	1,90	2,20	3,00	3,10	3,20
650	1,20	0,90	1,40	2,20	2,40	2,40
700	0,30	0,30	0,40	0,90	1,30	1,40
850	0,70	0,70	1,10	1,10	1,10	1,20

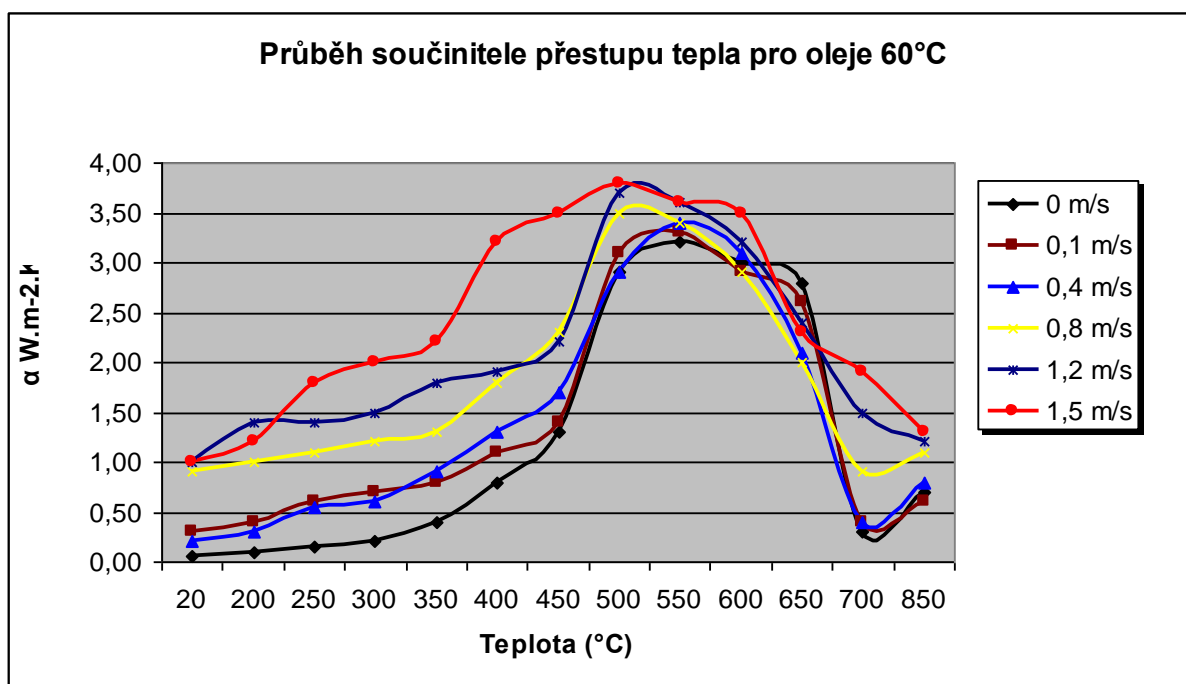
Tab. 7 závislost koef. přestupu tepla na teplotě, teplota lázně 40°C, rychlosti proudění 0m/s až 1,5m/s

Olej 60°C	Konvekční koef. (W/K.m ²)					
t (°C)	0 m/s	0,1 m/s	0,4 m/s	0,8 m/s	1,2 m/s	1,5 m/s
20	0,05	0,30	0,20	0,90	1,00	1,00
200	0,10	0,40	0,30	1,00	1,40	1,20
250	0,15	0,60	0,55	1,10	1,40	1,80
300	0,20	0,70	0,60	1,20	1,50	2,00
350	0,40	0,80	0,90	1,30	1,80	2,20
400	0,80	1,10	1,30	1,80	1,90	3,20
450	1,30	1,40	1,70	2,30	2,20	3,50
500	2,90	3,10	2,90	3,50	3,70	3,80
550	3,20	3,30	3,40	3,40	3,60	3,60
600	3,00	2,90	3,10	2,90	3,20	3,50
650	2,80	2,60	2,10	2,00	2,40	2,30
700	0,30	0,40	0,40	0,90	1,50	1,90
850	0,70	0,60	0,80	1,10	1,20	1,30

Tab. 8 závislost koef. přestupu tepla na teplotě, teplota lázně 60°C, rychlosti proudění 0m/s až 1,5m/s



Graf 2 Průběh součinitele přestupu tepla pro oleje 40°C



Graf 3 Průběh součinitele přestupu tepla pro oleje 60°C

5 Zhodnocení výsledů – porovnání vlivu rychlostí na součinitel přestupu tepla

5.1 Teplota lázně 40°C

Pro teplotu lázně 40°C lze zhodnotit z Obr. 17 vliv rychlosti a zároveň ho porovnat se získanými součiniteli přestupu tepla Graf 2. V první fázi průběhu ochlazování mají všechny křivky shodný průběh. Intenzita ochlazování dosahuje hodnoty 20°C/s.

Pro rychlosti 0 m/s, 0,1 m/s a 0,4 m/s nastává pokles intenzity ochlazování v oblasti vysokých teplot (cca mezi 800-650°C). Ten je způsoben vznikem parního polštáře, který izoloval sondu od styku s kapalinou. Parní polštář je stabilní do teploty 740°C a ochlazování přechází do nejintenzivnější fáze – fáze varu. K té dochází při teplotě jádra 650°C. Tyto tři křivky mají podobný průběh až do 430°C, kdy nastává fáze konvence. Tato fáze pozvolného dochlazení se požaduje nejvíce při martenzitické transformaci, kdy je požadováno snížení rizika vzniku trhlin a distorzí.

Těmto třem ochlazovacím charakteristikám odpovídá i průběh součinitele přestupu tepla. S rostoucí rychlostí se jeho hodnoty zvyšují, což odpovídá i poznatkům z průmyslové praxe tepelného zpracování.

Křivka rychlosti proudění 0,8 m/s je charakterizována zkrácením doby fáze parního polštáře oproti pomalejším rychlostem proudění a menším poklesem intenzity ochlazování. Rychlost ochlazování se výrazně zvyšuje ve fázi konvence oproti rychlostem 0 m/s až 0,4 m/s.

Z intenzit ochlazování pro rychlosti 1,2 m/s a 1,5 m/s lze odečíst omezení projevu parního polštáře. Proudění oleje zhoršuje jeho stabilitu a díky tomu je po celou dobu ochlazování fáze varu do až teploty jádra 450°C a ochlazování přechází do fáze konvence s poměrně vysokou intenzitou oproti pomalejším rychlostem. Tomu odpovídá i průběh součinitele přestupu tepla. Ten v oblasti počáteční fáze ochlazování neklesá, ale postupně vzrůstá.

5.2 Teplota lázně 60°C

Porovnáním hodnot záznamů hodnot z Obr. 18 a součinitele přestupu tepla pro teplotu lázně 60°C Graf 3 se počáteční fáze je průběh intenzity a rychlosti ochlazování téměř shodný jako u 40°C lázně. Křivky intenzit ochlazování se posunuly doprava k vyšším hodnotám. Fáze varu se zkracuje a přechází ve fázi konvence za vyšších teplot.

Výraznější rozdíly lze pozorovat u průběhu součinitele přestupu tepla. Křivky pro 0 m/s a 0,1 m/s v oblasti teplot 650-600°C rostou o něco rychleji než pro vyšší rychlosti proudění. Křivka u 0,8 m/s má již menší pokles hodnot v oblasti parního polštáře. Rychlost 1,5 m/s si udržuje vysoké hodnoty součinitele až do teploty jádra 350°C

Určité rozdíly hodnot pravděpodobně pramení z korekce koeficientů přestupu tepla při simulaci. Jednoduše řečeno, různými cestami lze dojít k jednomu výsledku. Výsledná plocha pod grafem určující celkové odvedené teplo je stejná, ale je různý průběh odvodu tepla. Právě průběh odvodu tepla má rozhodující vliv na výslednou strukturu.

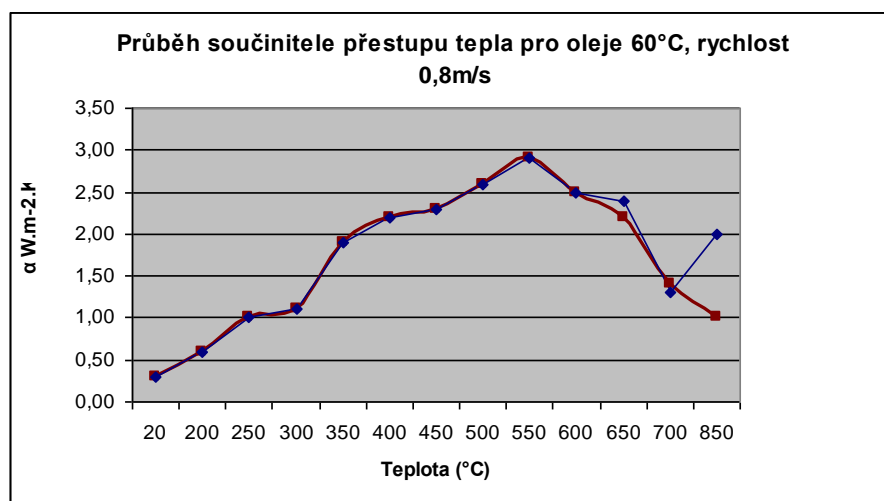
Problémy při simulaci

Jedním z největších problémů při simulaci byla korekce koeficientů po simulaci, kdy byla jedna hodnota určena pro teplotní interval 50°C ovšem její vliv se promítal i do okolních intervalů. Proto při korekci bylo nutné vždy upravit kromě koeficientu pro konkrétní interval teploty, kde bylo dosaženo největších rozdílů, také okolní intervaly, aby nedošlo k nárůstu odchylek v jiných intervalech teplot. Pokud byla teplota v určitém časovém intervalu vyšší

než z reálného měření, koeficient bylo nutné v okolních intervalech zvýšit a naopak. V některých případech ve fázi zpřesňování docházelo naopak k většímu odchýlení a proto bylo vhodné vrátit se o několik simulací zpět a začít znovu.

Odladění parametrů pro dosažení požadovaných výsledků shody pro jednu rychlost proudění a teplotu lázně bylo potřeba provést v průměru 14 simulací. Celkově i se simulacemi struktur a následnou analýzou bylo provedeno přes 200 simulací.

K dalším nepříjemnostem docházelo během překládání a generování nových databází. Program ne vždy uložil požadované nastavení.



Graf 4 Různé průběhy souč. přestupu tepla pro totožné parametry kalení, při stejném průběhu rychlosti ochlazování

6 Aplikace získaných dat – simulace vzniklé struktury, kalení reálných vzorků

V další části práce byly provedeny simulace kalení pro účel posouzení vzniklé struktury válečkových vzorků, které byly ochlazovány za stejných experimentálních podmínek jako byly podmínky Quench testu, respektive reálné vzorky.

6.1 Materiál a tvar zkušebních válečků

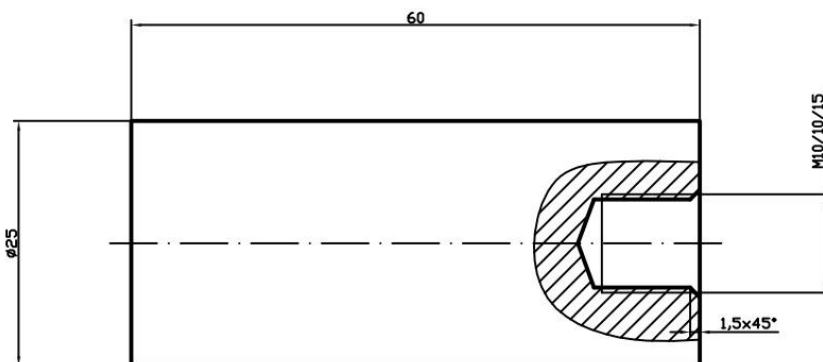
Na reálné vzorky byla použita ocel C35. Bohužel tato ocel není v databázi Deformu pro režim tepelného zpracování. Proto byla zvolena ocel C45 (ČSN 412050, ekvivalentní k ČSN 412040) a byla dále upravena v materiálových vlastnostech, aby odpovídala oceli C35. Hodnota uhlíku byla změněna z 0,44% na hodnotu 0,35%, TTT diagramy byly upraveny podle materiálových listů (Obr. 32)

Ocel C35 byla zvolena z důvodu menší prokalitelnosti oproti oceli 18CrNiMo7-6, která byla použita pro výrobu ozubených kol v souvislosti s diplomovou prací [14]. Volba vycházela z předpokladu, že by se experimentální vzorek z materiálu 18CrNiMo7-6 při těchto rozměrech plně prokalil a nebylo by možné posuzovat vliv kalicího prostředí. Ovšem dle provedené simulace kalení vzorku z ekvivalentního materiálu SNC 815 za totožných podmínek by k úplnému prokalení nedošlo a tento materiál by byl přínosnější pro tyto experimenty.

Chem. v %	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
C45	0,42-0,50	0,50-0,80	0,17-0,37	max 0,25	max 0,30	max 0,30	max 0,04	max 0,04
C35	0,32-0,40	0,50-0,80	0,15-0,40	max 0,25	max 0,30	max 0,30	max 0,04	max 0,04

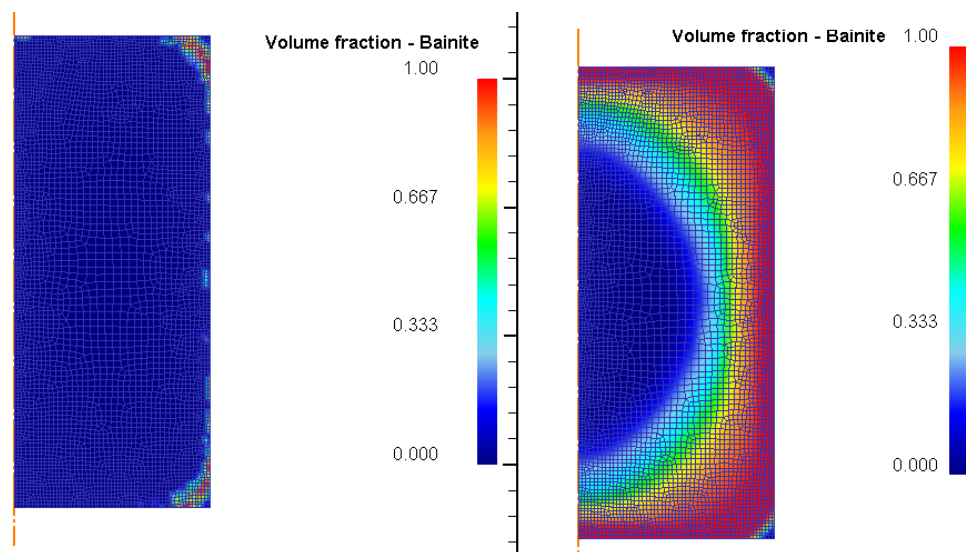
Tab. 9 Porovnání chemického složení ocelí [16],[20]

Z Tab. 9 je patrné, že z chemického hlediska se tyto oceli liší prakticky pouze v obsahu uhlíku. To se projevuje vyšší pevností oceli C45 a vyšší tažností oceli C35. Nezanedbatelný vliv uhlíku se projeví u kalení a výsledné tvrdosti. Je proto nutné brát v úvahu předpoklad, že vzorky ze simulací oceli C45 by byly více zakalené oproti reálným vzorkům oceli C35. To se potvrdilo při simulaci, kde u oceli C45 byl výrazně vyšší podíl bainitu ve struktuře.



Obr. 26 Výkres reálného vzorku[17]

Pro zjednodušení simulace byl model vzorku stejných rozměrů, ale bez vnitřního otvoru se závitem.



Obr. 27 Porovnání podílu bainitu oceli C35 vpravo a C45 vlevo při stejných podmínkách kalení

6.2 Kalení experimentálních vzorků

Kapitoly 6.2 a 7.2 jsou převzaty z již obhájené diplomové práce Ing. Jindřicha Kaizra. Jsou zde uvedeny pro lepší pochopení souvislostí z důvodu návaznosti na diplomovou práci [14].

Vzorky byly vyrobeny speciálně pro tento účel. Pro co nejrychlejší a nejsnazší transport z pece do lázně byl zhotoven speciální přípravek usnadňující manipulaci. Přípravek svým tvarem zapadá do stojanu, který zajišťuje co nejpřesnější a ustavení polohy vzorku, aby byla zajištěna sousost vzorku s hlavní přívodní trubicí kalícího média do lázně. [14]

6.2.1 Postup kalení

Vzorky byly vloženy na dobu 25 minut do vyhřáté pece na teplotu 850°C. Mezitím byly nastaveny parametry kalící lázně – teplota oleje a rychlost proudění.

Kalení probíhalo v lázni po dobu 2-3 minut pro dosažení požadovaného ochlazení. Poté byly vzorky dochlazeny v nádobě s vodou a oprány ve vodě s přidavkem přípravku na mytí nádobí zn. Jar. Po vyprání byly vzorky usušeny a označeny. Proces kalení probíhal ve společnosti Ecosond s.r.o. [14]

Podle doporučení pro tepelné zpracování by se teplota kalení měla pohybovat v intervalu 840°C až 880°C. Spodní hranice je doporučena při kalení do vody, horní hranice pro kalení do oleje. Pro kalení jsou vhodné i emulze ze syntetických polymerů. [20]

6.2.2 Hodnoty tvrdosti vzorků [14]

Ve firmě Wikov MGI a.s. následovalo další zpracování vzorků. Vzorky zde byly otryskány ručním tryskacím zařízením a označeny.

Měření povrchové tvrdosti

Tvrdość povrchu byla měřena na stacionárním tvrdoměru Rockwelovou metodou (HRC). Vtisk byl proveden na vybroušené plošce z pneumatické brusky. Zatížení bylo 150 kg. Výsledné hodnoty jsou v tab.

Vzorek	HRC na povrchu	průměr	Vzorek	HRC na povrchu	průměr
40_A_1	21, 24, 23	53	60_A_1	21, 25, 25	54
40_A_2	25, 24, 21	56	60_A_2	21, 21, 19	48
40_B_1	26, 27, 27	62	60_B_1	29, 28, 27	66
40_B_2	19, 21, 19	46	60_B_2	21, 19, 23	48
40_C_1	20, 19, 20	46	60_C_1	27, 26, 28	62
40_C_2	24, 26, 25	58	60_C_2	30, 28, 30	68
40_D_1	24, 24, 24	56	60_D_1	31, 33, 28	73
40_D_2	23, 32, 29	65	60_D_2	28, 31, 30	69

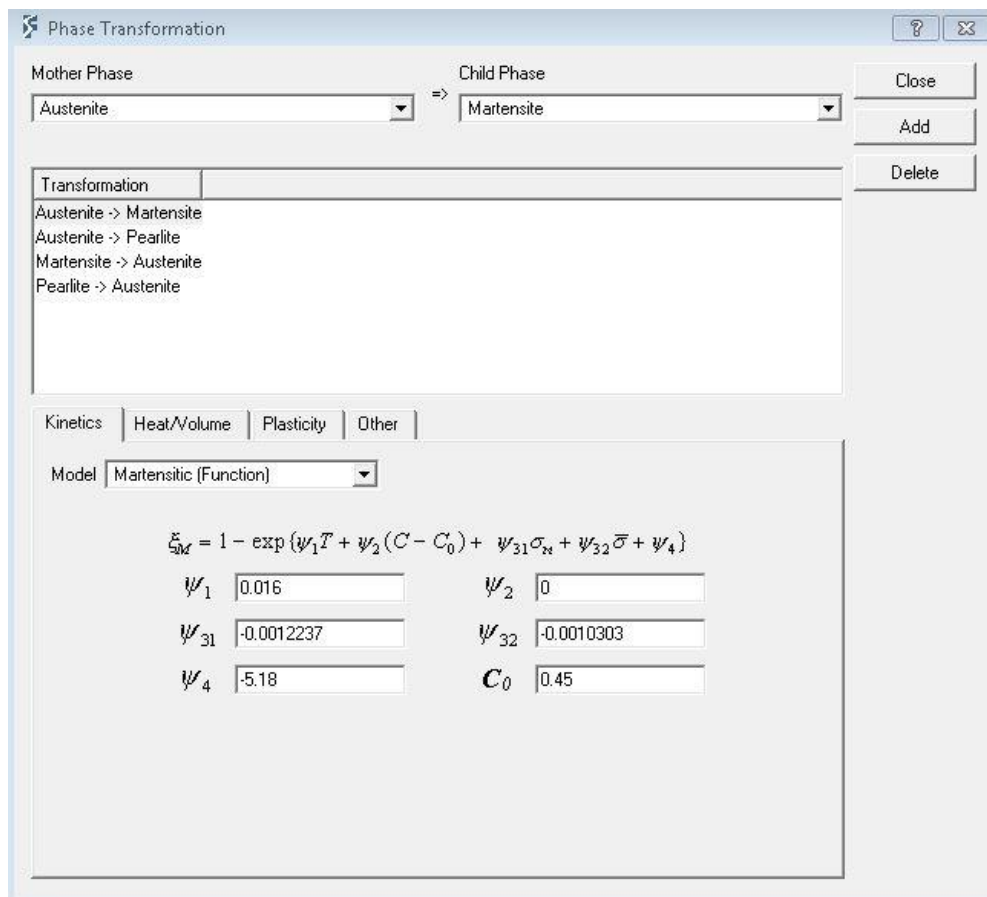
Tab. 10 Výsledné hodnoty povrchového měření tvrdosti dle HRC –[14]

6.2.3 Zadání fázových transformací

Software Deform při výpočtu vzniklé struktury používá data z IRA diagramů. Každý časový úsek výpočtu uvažuje konstantní teplotu pro každý konkrétní element.

Austenit – martenzit

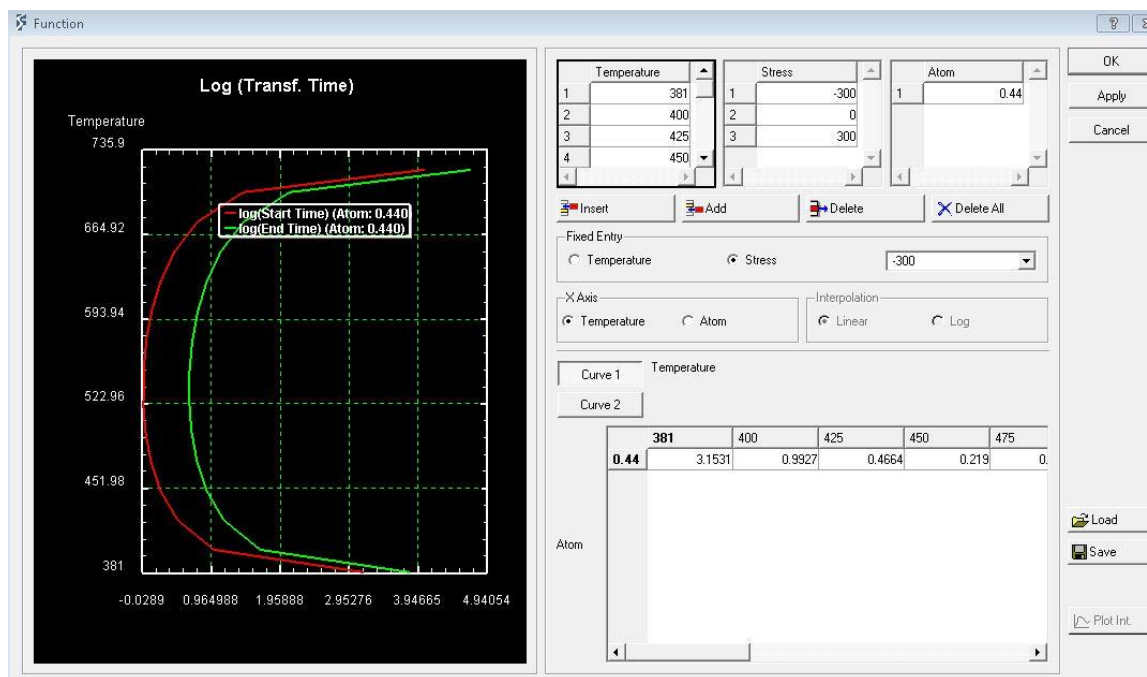
Přeměna austenitu na martenzit byla zadána Mageesovou rovnicí, která zohledňuje vliv napětí a obsah uhlíku viz Obr. 28.



Obr. 28 Mageesova rovnice pro transformaci austenitu na martenzit, zdroj: Deform

Austenit – bainit – tato transformace pro ocel C35 není definovaná.

Austenit – ferit - (uvažována fáze směsi feritu a perlitu) – byla definována pomocí TTT diagramu



Obr. 29 Austenit – ferit-perlit TTT diagram oceli C35, zdroj: Deform

6.2.4 Dodatečné vyhodnocení podílu bainitu ve vzniklé struktuře

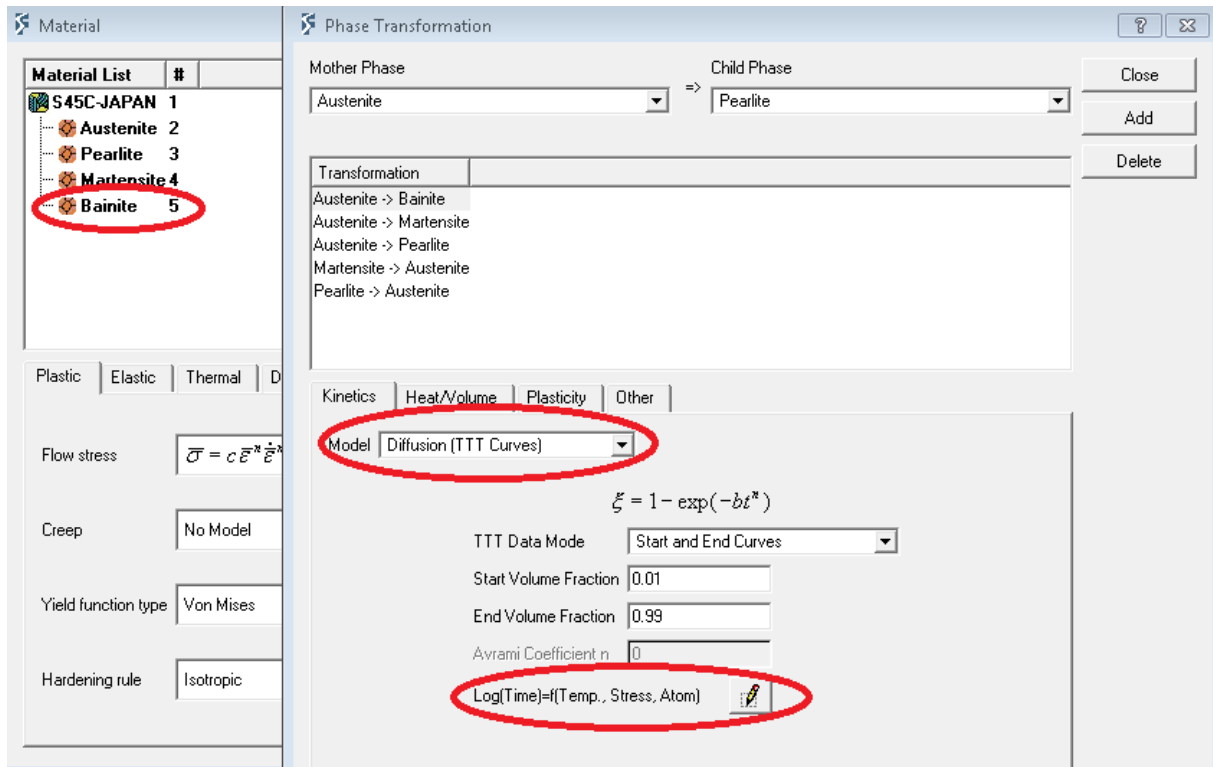
Deform standardně nezahrnuje bainitickou transformaci u oceli C35 a C45, proto bylo nutné upravit materiálový list v PreProcessoru. Byla přidána další fáze – bainit.

Výchozím podkladem pro simulace bainitické fáze byl diagram izotermického rozpadu austenitu pro ocel C35 Obr. 32, který popisuje transformace austenitu pro ochlazování při konstantní teplotě. Software Deform při simulaci fázových transformací používá pro každý jednotlivý krok výpočtu konkrétního elementu konstantní teplotu.

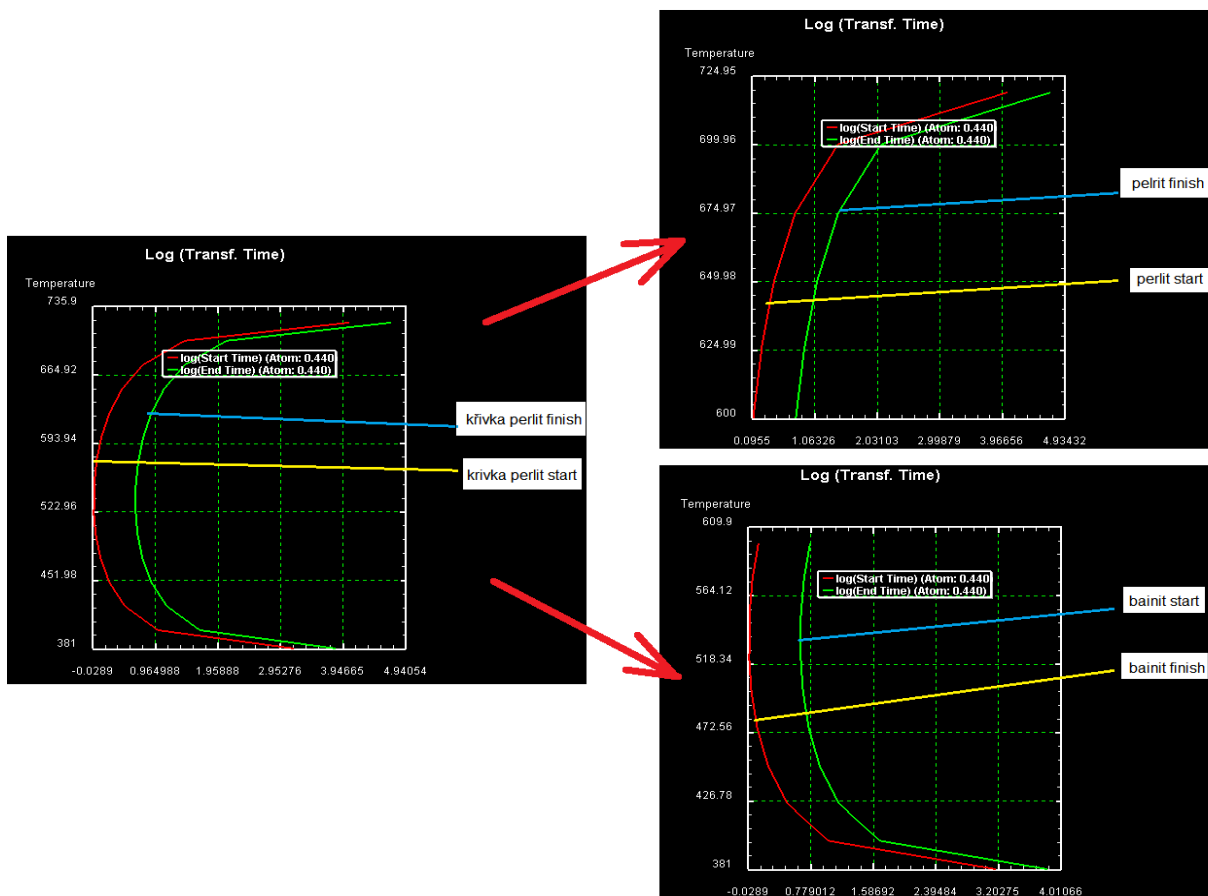
V materiálových vlastnostech byla přidána fáze Bainite 5, která byla založena na fázi Pearlite 3. Její fyzikální vlastnosti byly shodné.

Podle IRA diagramu pro ocel C35 probíhá fázová transformace A-P (austenit-perlit) do teploty 590°C a při této teplotě se skokově změní na transformaci A-B (austenit-bainit).

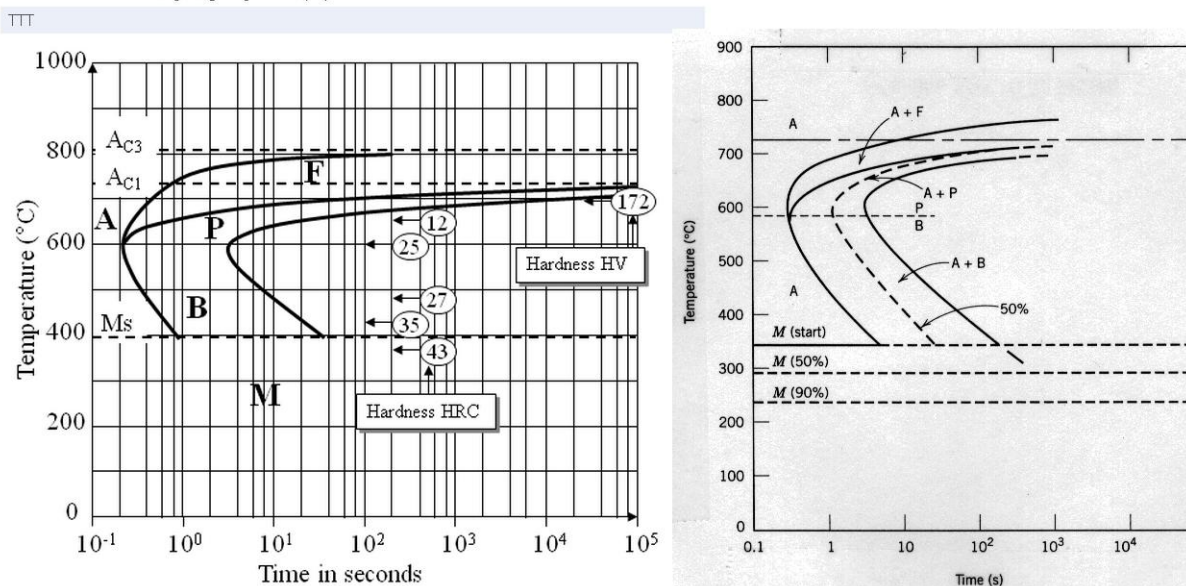
Jako funkční řešení simulace bylo rozdělení IRA digramu původního teplotního intervalu 719°C-381°C pro transformaci A-P na dva intervaly A-P pro teploty 719°C-590°C a A-B pro teploty 589°C-381°C. Byly rozděleny křivky začátku a konce transformace viz Obr. 31.



Obr. 30 Vytvoření nové fáze Bainite 5 v materiálovém listu oceli C3, zdroj: Deform



Obr. 31 Rozdělení fázových transformací



Obr. 32 TTT diagram oceli C35 vlevo a C45 vpravo [19]

7 Hodnocení struktury, podíl fází

7.1 Hodnocení výsledků oceli C35

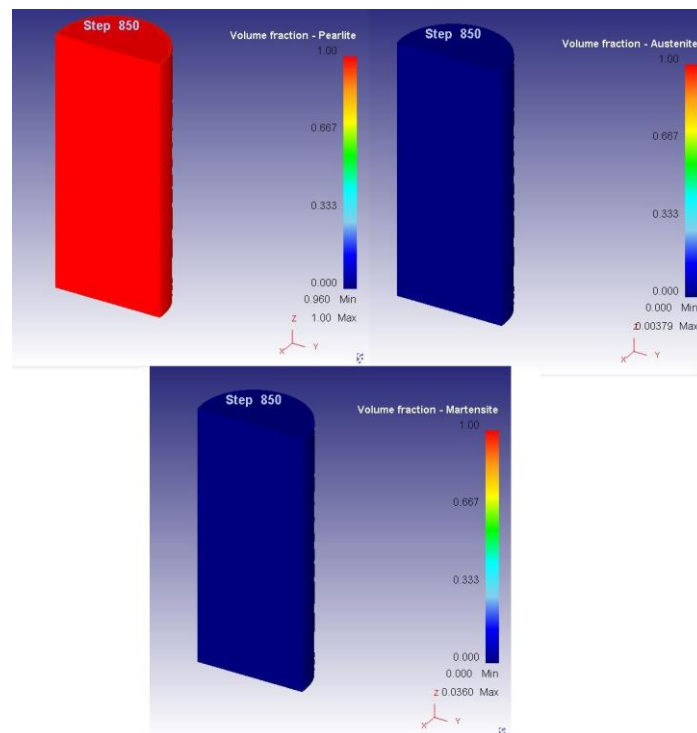
Pro ukázkou rozdílu hodnot výsledků byly vybrány rychlosti proudění 0 m/s a 1,5 m/s pro teploty lázně 40°C a 60°C. V Tab. 11 jsou uvedeny kompletní výsledky. V příloze zbylé snímky simulovaných struktur.

olej 40°C			
rychlost [m/s]	martenzit [%]	bainit [%]	perlit a ferit [%]
0	0	1,9	98
0,1	0	1,7	97,9
0,4	0	1,8	98,1
0,8	0	2,3	97,5
1,2	0,1	8,9	90,5
1,5	0,1	9,7	89,6

olej 60°C			
rychlost [m/s]	martenzit [%]	bainit [%]	perlit a ferit [%]
0	0	5,2	94,7
0,1	0	1,6	98,3
0,4	0	1,1	98,8
0,8	0	1,5	98,5
1,2	0,1	6,2	93,3
1,5	0,1	4,1	95,2

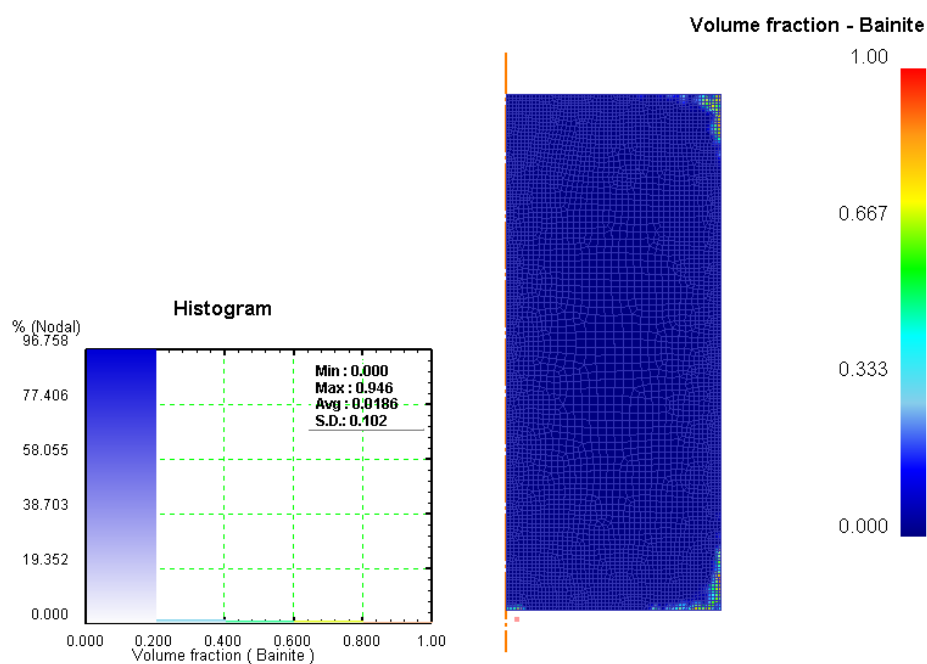
Tab. 11 Výsledné hodnoty podílu fází simulovaných vzorků v závislosti na rychlosti proudění oceli C35 v celém průřezu vzorku

Vzorek 40°C, 0m/s



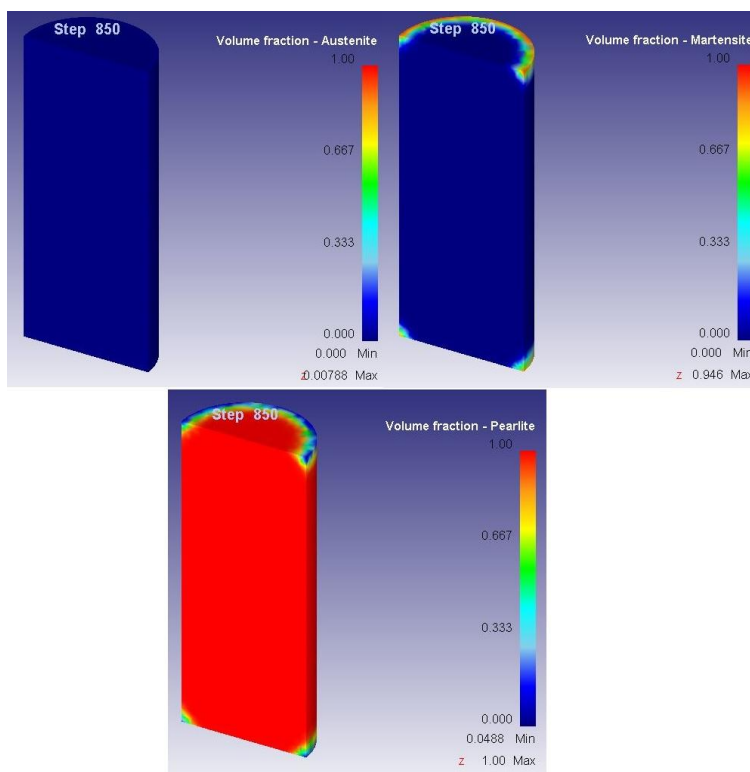
Obr. 33 Rozložení struktury po kalení, teplota lázně 40°C, bez nuceného proudění, bez bainitické fáze

Ve struktura vzorku je tvořena z 99,98% směsí feritu a perlitu. Martenzit tvoří podíl 0,01% a 0,001% je tvořeno zbytkovým austenitem - toto je důsledek použité matematické metody a nemá praktický význam. Výslednou strukturu lze označit jako směs feritu a perlitu.



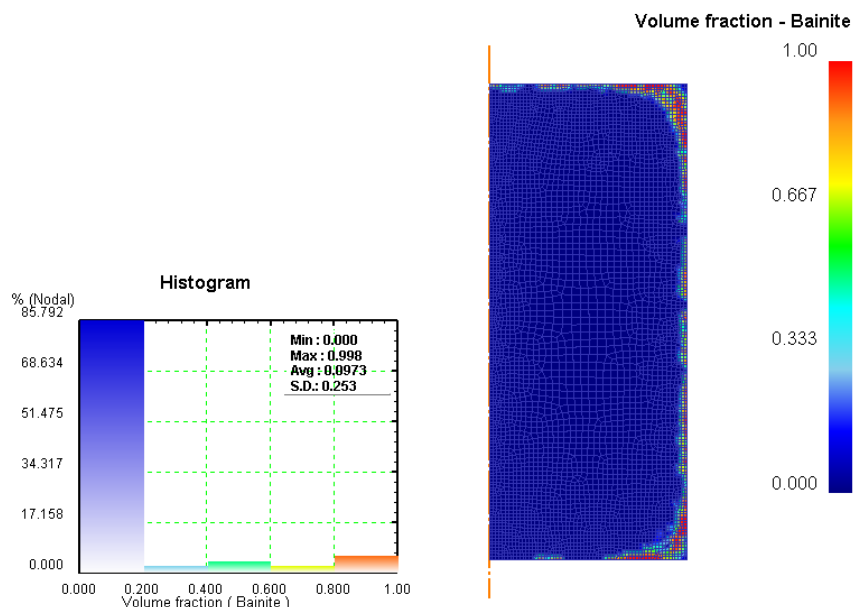
Obr. 34 Rozložení struktury po kalení, teplota lázně 40°C, bez nuceného proudění s podílem bainitu. Oblasti bainitu se vyskytují pouze v rozích v povrchové vrstvě.

Vzorek 40°C, 1,5m/s – bez bainitické fáze



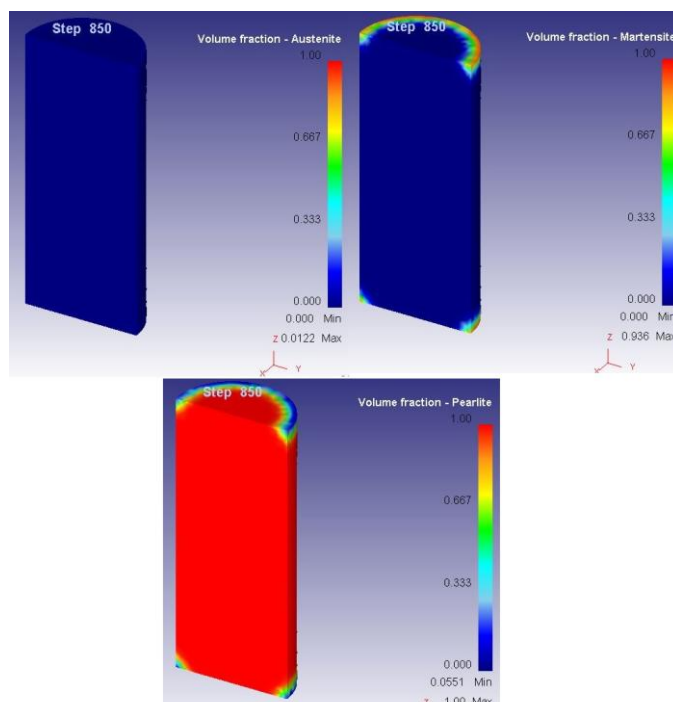
Obr. 35 Rozložení struktury po kalení, teplota lázně 40°C, při proudění o rychlosti 1,5 m/s

Struktura vzorku je tvořena z 99,9% směsí feritu a perlitu. Martenzit tvoří podíl 0,1 % a 0,01% je tvořeno zbytkovým austenitem. Oblast martenzitu je viditelná pouze po obvodu hranice mezi pláštěm a horní a spodní plochy.



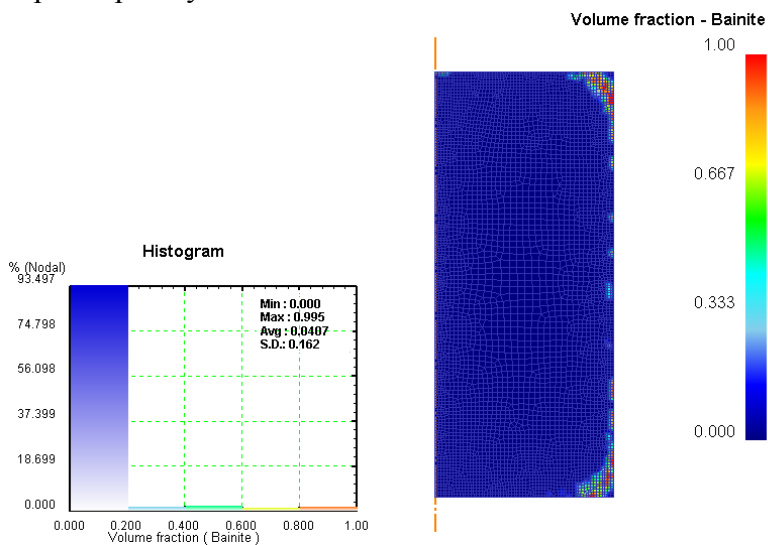
Obr. 36 Rozložení struktury po kalení, teplota lázně 40°C, při nuceném proudění o rychlosti 1,5m/s s podílem bainitu. Oblast bainitu se rozšířila i po obvodu pláště v povrchové vrstvě.

Vzorek 60°C 1,5 m/s



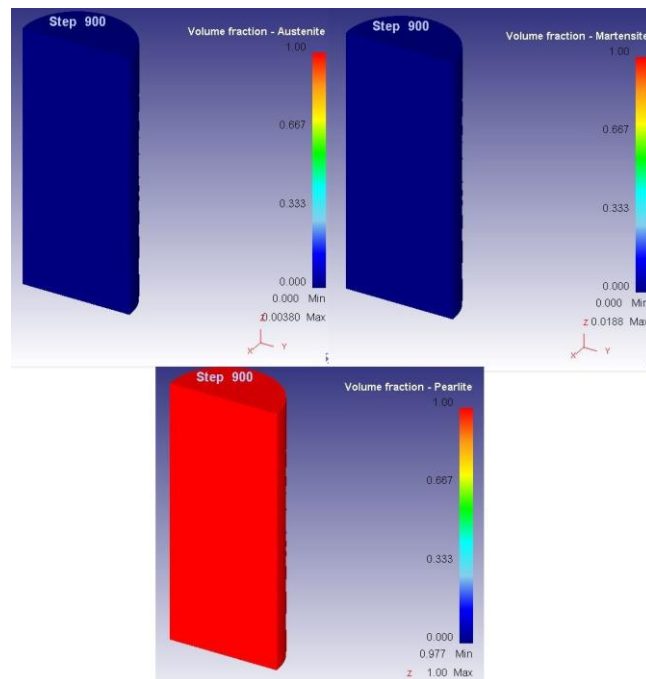
Obr. 37 rozložení struktury po kalení, teplota lázně 60°C, při nuceném proudění o rychlosti 1,5m/s

Struktura vzorku je tvořena z 99,9% směsí feritu a perlitu. Martenzit tvoří podíl 0,1 % a 0,002% je tvořeno zbytkovým austenitem. Výslednou strukturu lze rovněž označit jako feriticko perlitickou. Oblast martenzitu je opět viditelná pouze po obvodu hranice mezi pláštěm a horní a spodní plochy.



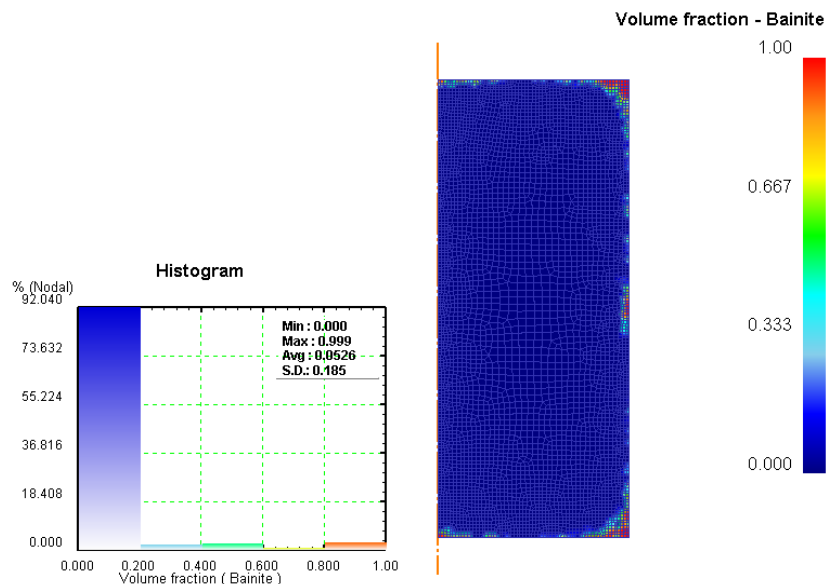
Obr. 38 Rozložení struktury po kalení, teplota lázně 60°C, při nuceném proudění o rychlosti 1,5m/s s podílem bainitu

Vzorek 60°C, 0m/s



Obr. 39 Rozložení struktury po kalení, teplota lázně 60°C, bez nuceného proudění, bez bainitické fáze

Struktura vzorku je tvořena z 99,9% směsí feritu a perlitu. Martenzit tvoří podíl 0,1% a 0,002% je tvořeno zbytkovým austenitem. Výslednou strukturu lze rovněž označit jako čistě feriticko-perlitickou. Oblast martenzitu již není viditelná ani po obvodu hranice mezi pláštěm a horní a spodní plochy.



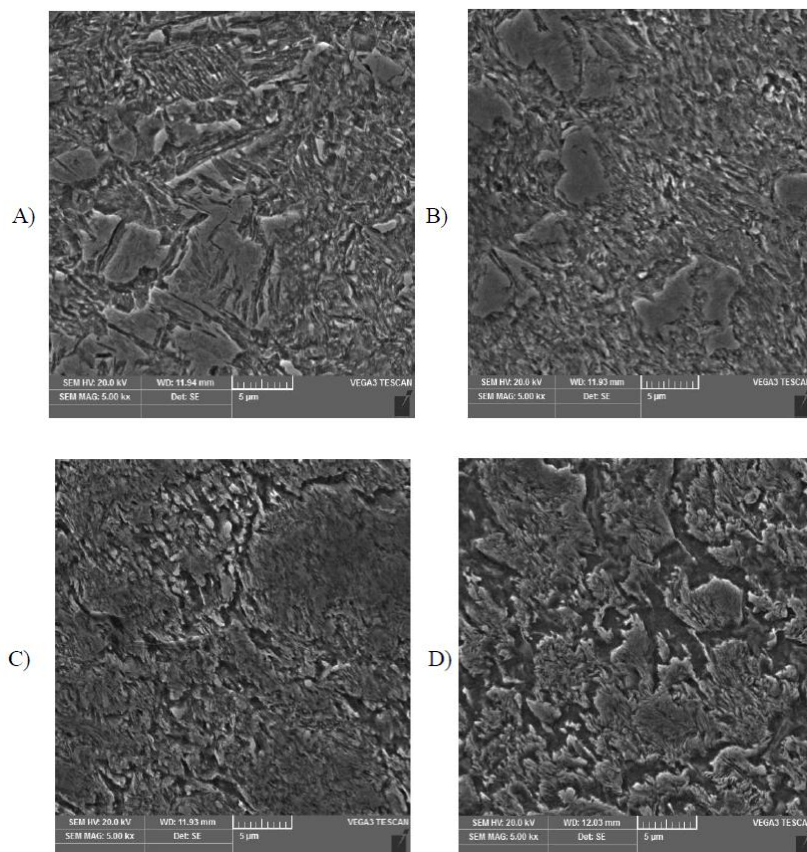
Obr. 40 Rozložení struktury po kalení, teplota lázně 60°C, bez nuceného proudění s podílem bainitu

7.2 Struktura reálných vzorků z oceli C35

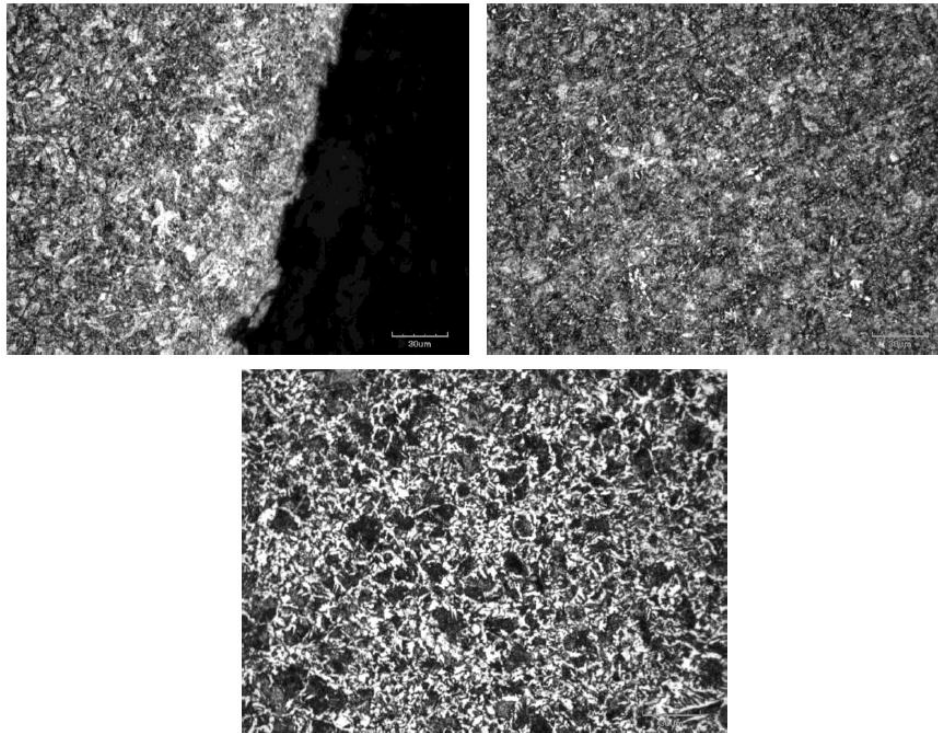
Hodnocení struktury a pořízení snímků bylo provedeno na mikroskopickém zařízení NEOPHOT 21. Všechny vzorky byly naleptány Nitalem (3%).

Pro porovnání struktury v různých místech vzorku se pořídily 3 snímky v různé hloubce a to na okraji vzorku, 0,2 mm od kraje a v jádře při použitím zvětšení 400x.

Rozdíly ve struktuře byly minimální. Výsledná struktura byla perliticko-feritická. Pouze u vzorku z kalení při rychlosti proudění 1,2 m/s a teploty oleje 60°C byl zaznamenán na povrchu vzorku malý podíl martenzitické a bainitické struktury (Obr. 41). Při druhé nejnižší rychlosti u obou teplot kalící lázně (40°C a 60°C) byl zaznamenán dokonce mírně oduhličený povrch. [14]



Obr. 41 Fotografie struktury vzorku zakaleného při rychlosti proudění 1,2 m/s a teplotě oleje 60°C pořízené na řádkovacím elektronovém mikroskopu, zvětšeno 5000x [14]



Obr. 42 Snímky stejného vzorku u povrchu a 0,2 mm pod povrchem s výskytem martenzitu a bainitu, v jádře – feriticko perlitická struktura, zvětšeno 500x

7.3 Diskuze výsledků

Ocel C35 byla zvolena z důvodu menší prokalitelnosti oproti oceli 18CrNiMo7-6, která byla použita pro výrobu ozubených kol. Volba vycházela z předpokladu, že by se experimentální vzorek z materiálu 18CrNiMo7-6 při těchto rozměrech plně prokalil a nebylo by možné posuzovat vliv kalícího prostředí. Ovšem dle provedené simulace kalení vzorku z ekvivalentního materiálu SCN 815 za totožných podmínek by k úplnému prokalení nedošlo a tento materiál by byl přínosnější pro tyto experimenty.

Ve fázi volby materiálu pro kalení reálných vzorků mohl být využit potenciál numerické simulace. Zakalením virtuálních vzorků z různých materiálů za stejných podmínek by bylo možné vyloučit materiály, např. právě ocel C35, kdy nedošlo k zakalení a materiály, které by se plně prokalily.

Aby se materiál více prokalil bylo by pravděpodobně nutné použít ochlazovací prostředí s větší intenzitou – vodu. Při zkušební simulaci se zvýšením kalící teploty na horní hranici (880°C) dle [20], která je doporučena pro kalení do oleje nepřineslo uspokojivé výsledky.

Na základě snímků výsledných reálných struktur po kalení nebylo možné vzorky dále porovnávat se snímky struktur z numerických simulací, protože v obou případech nedošlo k uspokojivému zakalení. Pro ilustraci je zde uveden snímek z řádkovacího elektronového mikroskopu Obr. 41 a optického mikroskopu Obr. 42. Ostatní fotografie struktur pořízené na světelném mikroskopu je možné nalézt ve zdroji [14].

Pro představu, jaký vliv bude mít vyšší obsah uhlíku 0,1% na vzniklou strukturu, byly provedeny simulace struktur oceli C45 při stejných podmínkách kalení jako u C35. Pouze byl v materiálovém listu oceli C45 v Deformu upraven TTT diagram tak, aby odpovídal oceli C45 viz Obr. 32.

Z Tab. 12 lze vyčíst že opět nedošlo k zakalení materiálu. Vzrostl podíl bainitu ve struktuře a to zhruba o 40% oproti oceli C35.

olej 40°C			
rychlost [m/s]	martenzit [%]	bainit [%]	perlit a ferit [%]
0	0	51,1	48,9
0,1	0	42,2	57,8
0,4	0	43,7	56,3
0,8	0	45,5	54,5
1,2	0,1	50,4	49,5
1,5	0,1	52,9	47,0

olej 60°C			
rychlost [m/s]	martenzit [%]	bainit [%]	perlit a ferit [%]
0	0	43,9	56,1
0,1	0	45,2	54,8
0,4	0	47,8	52,2
0,8	0	50,5	49,5
1,2	0,1	51,3	48,6
1,5	0,2	53,5	46,3

Tab. 12 Výsledné hodnoty podílu fází simulovaných vzorků v závislosti na rychlosti proudění oceli C45 v celém průřezu vzorku

7.4 Simulace kalení vzorku z oceli SNC 815

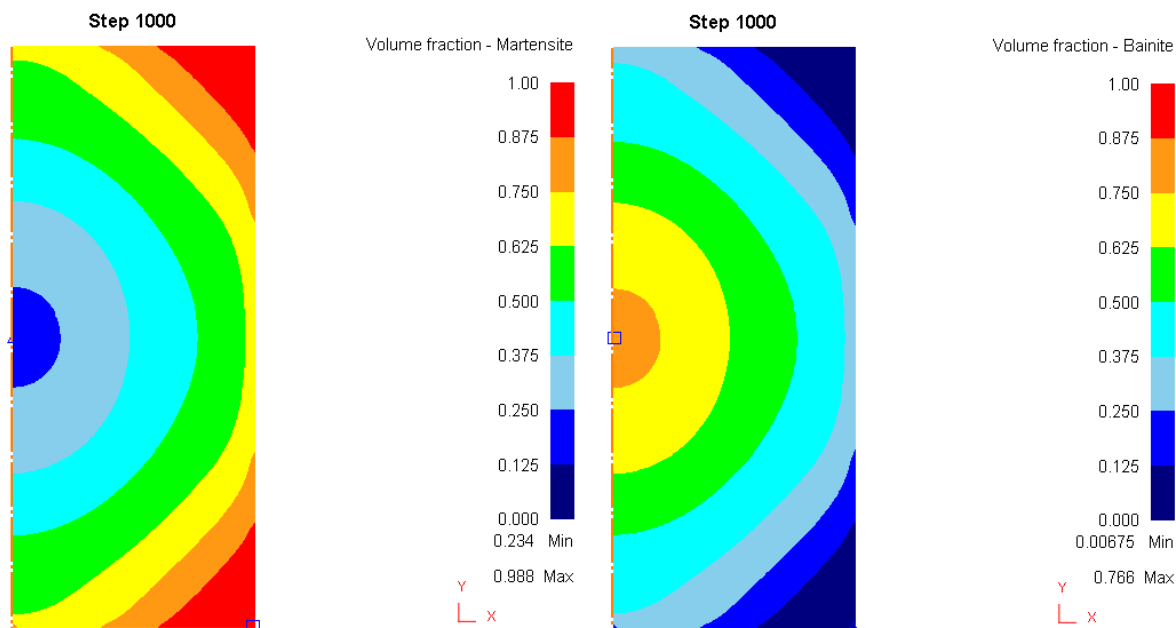
Protože kalení oceli C35 nepřineslo očekávané výsledky, aby mohl být dostatečně posouzen vliv parametru rychlosti proudění na strukturu, byla provedena dodatečná simulace kalení vzorků z původně zamýšleného materiálu SNC 815 (ekvivalentem 18CrNiMo7-6). Rozměry vzorků, jejich počáteční teplota i ochlazování probíhalo stejně jako v případě simulací u oceli C35.

Materiál SNC 815 je Cr-Ni ocel určená k cementování. Je dobře tvárná za tepla a v žíhaném stavu dobře obrobitelná. Používá se na velmi namáhané strojní součásti, určené k cementování, s vysokou pevností a při zachování houževnatého jádra, např. hřídele, drážkové hřídele nebo ozubená kola pro větrné elektrárny. Doporučená teplota pro kalení do oleje je 820 - 870°C. [17]

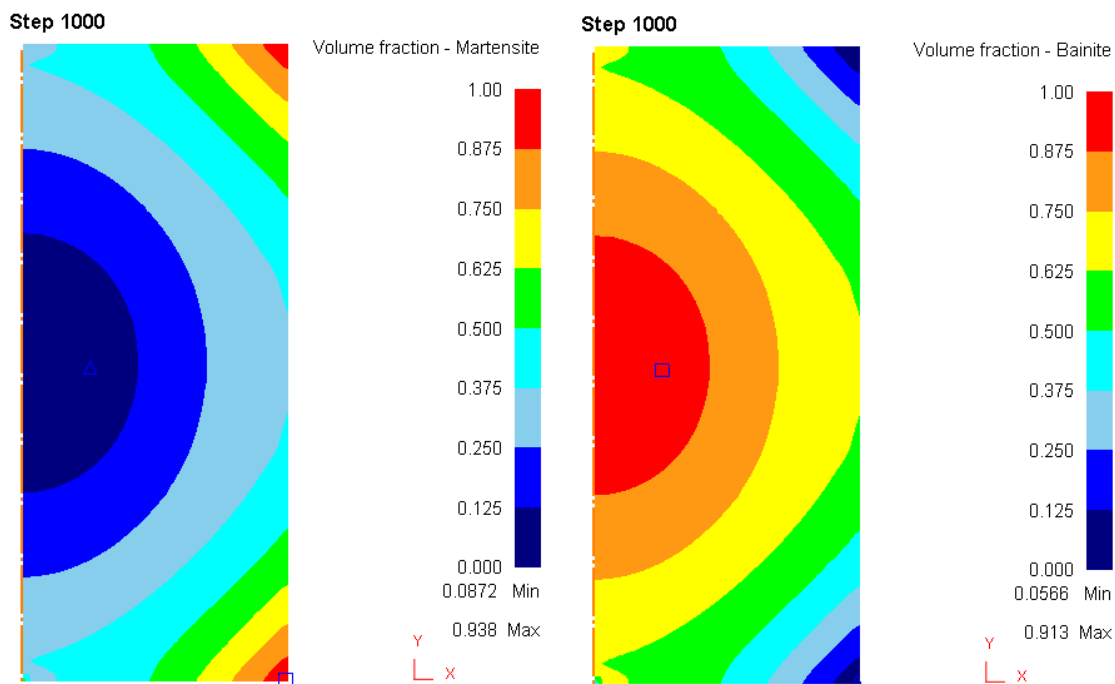
olej 40°C			
rychlost [m/s]	martenzit [%]	bainit [%]	aust. zbyt. [%]
0	9,3	91,7	0
0,1	7,1	92,9	0
0,4	12,8	87,2	0
0,8	28,3	71,7	0
1,2	41	58,9	0,1
1,5	37,3	62,6	0,1

olej 60°C			
rychlost [m/s]	martenzit [%]	bainit [%]	aust. zbyt. [%]
0	2,7	97,3	0
0,1	8,3	91,7	0
0,4	12,5	87,5	0
0,8	25,6	74,3	0,1
1,2	37	62,9	0,1
1,5	60,9	38,8	0,3

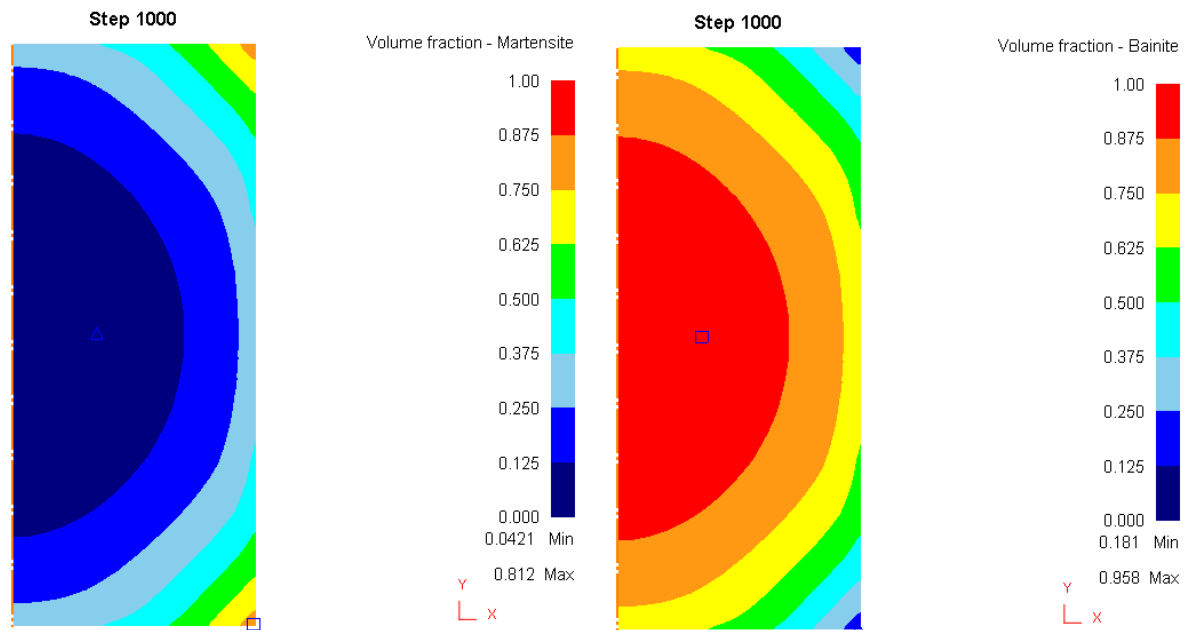
Tab. 13 Výsledné hodnoty podílu fází simulovaných vzorků v závislosti na rychlosti proudění oceli SNC 815 v celém průřezu vzorku



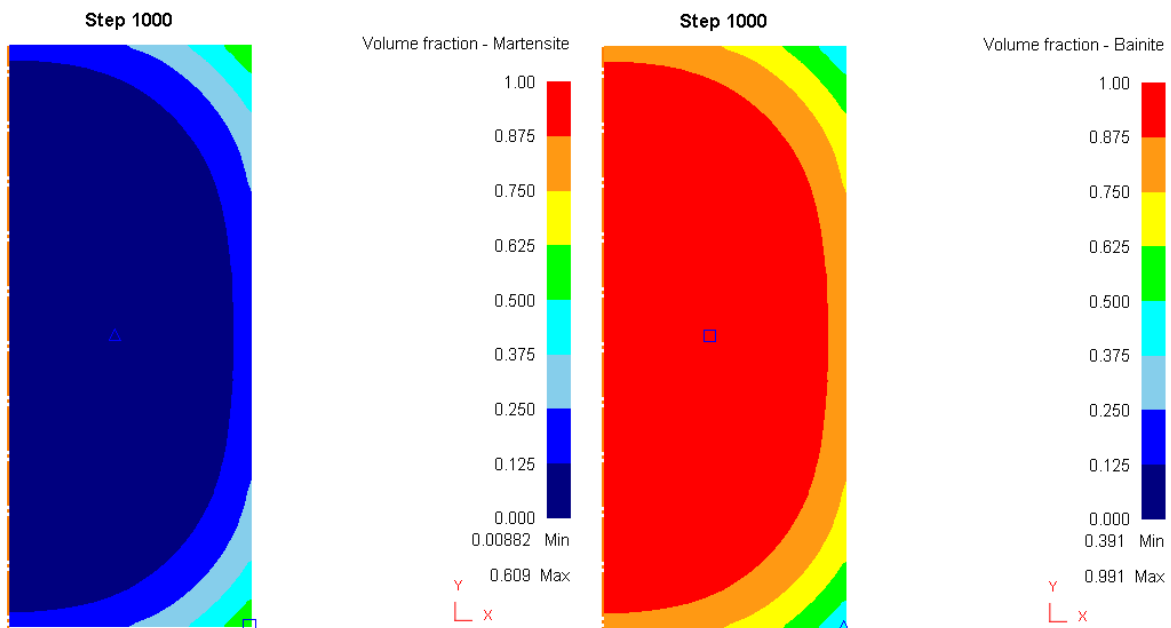
Obr. 43 Struktura vzorku oceli SNC 815, teplota oleje 60°C, rychlost proudění 1,5m/s. Podíl martenzitické fáze v celém průřezu dosahuje hodnoty 60,9%. Na levém snímku jsou vidět v rozích oblasti 100% martenzitu. V jádře je obsah bainitu téměř 90%.



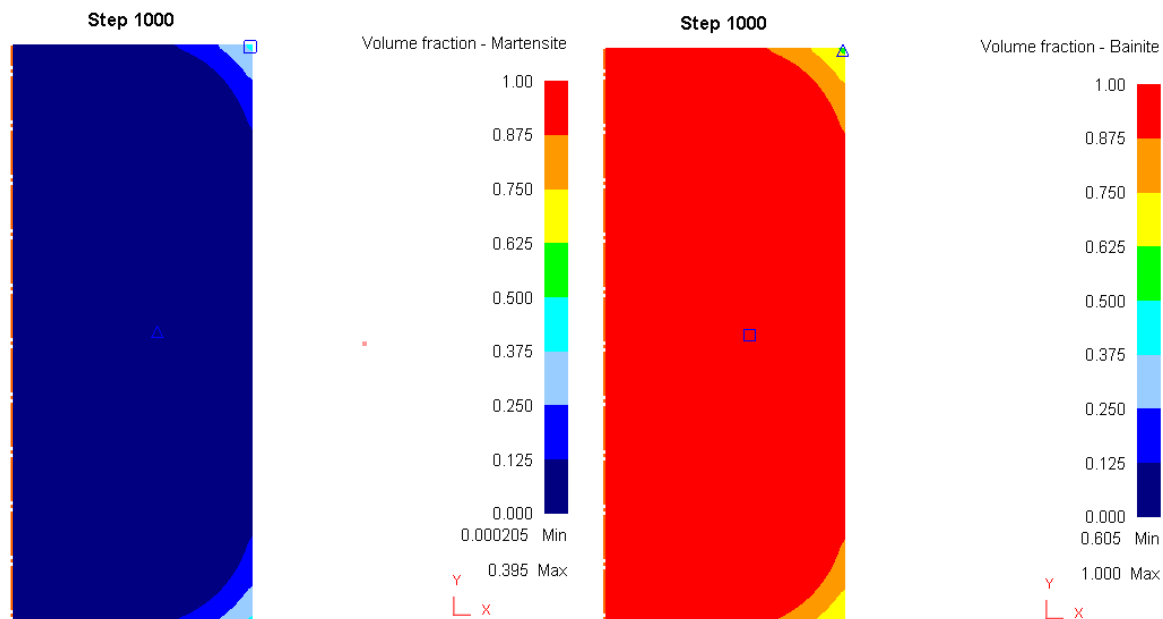
Obr. 44 Struktura vzorku oceli SNC 815, teplota oleje 60°C, rychlost proudění 1,2m/s. Podíl martenzitické fáze v celém průřezu dosahuje hodnoty 37%. Oproti rychlosti 1,5m/s výrazně menší oblast 100% martenzitu v rozích. Oblast jádra dosáhla hodnoty 100% bainitu.



Obr. 45 Struktura vzorku oceli SNC 815, teplota oleje 60°C, rychlost proudění 0,8 m/s. Podíl martenzitické fáze v celém průřezu dosahuje hodnoty 25,6%. V rozích malá oblast martenzitu o koncentraci 90%, oblast jádra 100% bainitu,



Obr. 46 Struktura vzorku oceli SNC 815, teplota oleje 60°C, rychlost proudění 0,4 m/s. Podíl martenzitické fáze v celém průřezu dosahuje hodnoty 12,5%. V rozích malá oblast martenzitu o koncentraci 62%, více rozšířená oblast 100% bainitu v jádře.



Obr. 47 Struktura vzorku oceli SNC 815, teplota oleje 60°C, rychlost proudění 0 m/s. Podíl martenzitické fáze v celém průřezu dosahuje hodnoty 2,7%. V rozích nejvyšší koncentrace martenzitu, hodnota dosahuje průměrně 50%. Zbylá struktura téměř 100% bainit.

Snímky struktur vzorků pro teplotu lázně 40°C jsou uvedeny v příloze

7.4.1 Diskuze výsledků

Vliv koeficientů přestupu tepla pro ocel SNC 815 je velmi výrazný. Maximální rychlost proudění 1,5 m/s prokalila vzorek přibližně do $\frac{1}{2}$ průřezu. S klesající rychlostí proudění klesal i podíl martenzitu a při rychlosti proudění 0 m/s měl vzorek bainitickou strukturu téměř v celém průřezu.

Zajímavé je i porovnání teplot lázní při stejné rychlosti proudění. Původní předpoklad, že olej o vyšší teplotě bude více kalit, se naplnil. Ale pouze pro rychlost proudění 1,5 m/s, kde bylo martenzitu výrazně více. Pro rychlosti 1,2 - 0,1 m/s vycházejí výsledky velmi podobně. Naopak u rychlosti 0 m/s bylo více martenzitu po kalení v lázni s nižší teplotou.

Tato ocel byla vhodnější pro posuzování vlivu parametrů rychlosti proudění a teploty lázně.

8 Závěr

8.1.1 Simulace součinitelů přestupu tepla

Byly provedeny simulace koeficientu přestupu tepla pro ochlazovací lázeň oleje Durixol W72 o teplotě 40°C a 60°C při rychlostech proudění oleje 0 m/s, 0,1 m/s, 0,4 m/s, 0,8 m/s, 1,2 m/s a 1,5 m/s na základě naměřených ochlazovacích charakteristik kalící lázně experimentálního zařízení. Hodnota koeficientů přestupu tepla se pohybovala v závislosti na teplotě v rozmezí 0,05 – 3,8 W/Km². Koeficienty byly dále použity pro simulace struktur, na jejichž základě byl posuzován vliv rychlosti proudění oleje.

8.1.2 Simulace struktury oceli C35 a C45 pro různé rychlosti proudění

Posouzení vlivu rychlosti proudění na vzniklou strukturu při kalení nebylo možné, jelikož se vzorky nezakalily. Při rychlostech proudění 1,5 m/s a 1,2 m/s se fáze martenzitu objevila, ale zanedbatelném množství 0,1%. Jinak byla struktura prakticky feriticko-perlitická.

Další výsledky přineslo vlastní rozšíření simulací o fázi bainitu, která byla vytvořena na základě znalostí TTT diagramů a kterou software Deform pro tyto materiály standardně nezahrnuje. U oceli C35 se hodnota bainitu pohybovala v rozsahu od 1,7 - 9,7% u teploty lázně 40°C a 1,1 - 6,2% pro teplotu 60°C. Vyšší obsah uhlíku u oceli C45 se projevoval na výrazně vyšším podílu bainitu, přibližně o 40%.

Výsledky simulací pro ocel C35 byly ve shodě s výsledky zakalených reálných vzorků. Nízké hodnoty podílu martenzitu nebylo možné detekovat na reálných vzorcích a výsledky numerických simulací nelze dále přibližovat výsledkům z reálných vzorů pomocí změny průběhu křivek v TTT diagramu.

Jeden z přínosů práce je možnost hodnocení podílu bainitu oproti optické metalografii, kde je jeho detekce velmi obtížná.

8.1.3 Simulace struktury oceli SNC 815

Vliv součinitele přestupu tepla se projevil okamžitě a velmi výrazně. Při nejvyšší rychlosti proudění byla struktura u teploty lázně 60°C tvořena 60% martenzitu, resp. 40% u teploty lázně 40°C. S klesající rychlostí proudění se podíl martenzitu snižoval na úkor růstu bainitické fáze. U nulové rychlosti proudění byla struktura prakticky bainitická. Byl zjištěn zanedbatelný vliv teploty lázně, zejména pro rychlost proudění 1,5 m/s, pro rychlosti 1,2-0,1 byla výsledná struktura velmi podobná. Na tomto materiálu bylo prokázáno, že změnou rychlosti proudění a tím i změnou koef. přestupu tepla lze výrazně ovlivnit průběh kalení.

8.1.4 Možnost využití získaných poznatků v praxi

Změna rychlosti proudění ochlazovacího média v průběhu kalení by mohla snížit riziko vzniku trhlin a deformací. A to podobným způsobem jako je tomu u lomeného kalení, kde se požaduje počáteční intenzivní ochlazování z důvodu vyhnutí se transformace austenitu na ferit/bainit a následné pomalé dochlazení v oblasti transformace na martenzit. Intenzivního proudění by se využilo v počáteční fázi kalení a při začátku martenzitické transformace následného pomalého dochlazení konvencí bez nuceného proudění s malou intenzitou ochlazování.

Seznam použité literatury

- [1] BENEŠOVÁ, Soňa. Materiálové modelování a numerická simulace jako nástroj pro vývoj technologických procesů. Plzeň, 2007. Disertační práce. Západočeská univerzita, Fakulta strojní. Vedoucí práce Vladimír Bernášek.
- [2] BARTUŠKA, Karel, SVOBODA, Emanuel. *Fyzika – molekulová fyzika a termika*. 3. vyd. Prometheus 1993, 249s. ISBN 80-7196-052-7
- [3] LIŠCIC, Božidar, FILETIN, Tomislav. *Measurement of quenching intensity, calculation of heat transfer coefficient and global database of liquid quenchants*. [online]. 26. February 2012, [cit. 2013-10-26]. Dostupné z: <http://fstroj.uniza.sk/journal-mi/PDF/2012/09-2012.pdf>
- [4] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999, 274 s. ISBN 80-708-2582-0.
- [5] LIŠCIC, Božidar [et al.]. *Quenching theory and technology*. 2nd ed. p. cm. Boca Raton: CRC Press, 2010. ISBN 978-0-8493-9279-5.
- [6] VRÁBLÍK, Filip, STOLAŘ, Pavel. *Význam kontroly kalících médií*. [online]. [cit. 2013-10-25]. Dostupné z: www.ecosond.cz/soubory/Vyznam_kontroly_kalicich_medii.pdf
- [7] SLOVÁČEK, Marek. *Numerické simulace svařování a tepelného zpracování*. MM Spektrum [online]. 2008, č. 10 [cit. 2013-10-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/numericke-simulace-svarovani-a-tepelneho-zpracovani.html>
- [8] BLAHETA, Radim. *Matematiké modeování a metoda konečných prvků*. [online]. 12. června 2012, 22:00 [cit. 2013-10-26]. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/numericke_metody_2.pdf
- [9] *Quenchant Fundamentals: Condition Monitoring of Quench Oils*. [online]. [cit. 2013-10-24]. Dostupné z: <http://www.machinerylubrication.com/Read/430/quench-oils>
- [10] LIŠCIC, Božidar, TOTTEN, G.E. *From GM Quenchnetometer VIA cooling curve analysis to temperature gradient method*. [online]. [cit. 2013-10-24]. Dostupné z: http://www.quenchtek.com/pdf_files/technical_paper/From%20GM%20Quenchnetometer%20via%20Cooling%20Curve%20Analysis%20to%20Temperature%20Gradient%20Method.pdf
- [11] ASM Handbook: *Volume 4: Heat Treating*, ASM International, 1997, 1012s. ISBN 0-87170-379-3
- [12] HALLIDAY, David, *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Část 2, Mechanika – Termodynamika*. RESNICK, Robert, WALKER, Jearl. Brno: VUTIM 2000. ISBN 80-214-1868-0
- [13] JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: Metalografická příručka*. 4. přepracované. Praha: SNTL, 1983, 392 s.

[14] KAIZR, Jindřich. Vliv parametru procesu chemicko-tepelného zpracování na deformace ozubených kol. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita, Fakulta strojní. Vedoucí práce Antonín Kříž

[15] FIEDLER, Lukáš. FR-TI3/503 VI. ETAPA Zpráva č. 12/2013 Experimentální ověření navržených variant: Měření ochlazovací schopnosti oleje při různých rychlostech proudění oleje. Plzeň, 2013.

[16] Ocel 12 040. [online]. [cit. 2014-01-22]. Dostupné z:
http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_vlastnosti_C45.pdf

[17] Ocel 16 420 – Legované oceli třídy 16. [online]. [cit. 2015-03-02]. Dostupné z:
<http://www.tumlikovo.cz/rubriky/materialy/konstrukcni-oceli/oceli-tridy-16/>

[18] LIŠČIC, Božidar. Temperature gradient quenching analysis systém. [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z <http://qrc.fsb.hr/wp-content/uploads/2010/03/TGQ-ANALYSIS-SYSTEM.pdf>

[19] TTT Diagram steel AISI 1035. [online]. [cit. 2014-04-06] Dostupné z:
<http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=Home&LN=CZ>

[20] *Ocel 12 050*. [online]. [cit. 2014-04-06]. Dostupné z:
http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/databaze_modelu_soubory/ocel_12050.3.pdf

Seznam příloh

Příloha č. 1 Kalící olej Durixol W 72

Příloha č. 2 Struktura oceli C35 po kalení

Příloha č. 3 Struktura oceli SNC815 po kalení

Příloha č. 1 Kalicí olej Durixol W 72

DURIXOL W 72 DURIXOL W 71

DURIXOL W 72 a DURIXOL W 71 jsou intenzivně kalicí oleje s vysokou odolností proti odpařování. Oleje jsou určeny pro kalení zboží uspořádaného do vsázek v otevřených i v uzavřených zařízeních pro tepelné zpracování, jako jsou např. víceúčelové pece, průběžné cementační pece, zvonové pece a pece s vodorovnou retortou.

Durixol W 72

byl vyvinut z osvědčeného oleje DURIXOL W 25 pro ty případy, kdy je při kalení vsázek potřeba vysoká intenzita ochlazování a zároveň vysoká odolnost proti odpařování.

Tvrdost / Deformace

Přes intenzivní kalicí účinek jsou deformace zboží kaleného v DURIXOLU W 72 minimální. Olej je svým charakterem dvourozsohový a umožňuje v případě potřeby snižování deformací pracovat v uzavřených pecích zařízeních při trvalé pracovní teplotě až 130°C.

Spotřeba oleje

DURIXOL W 72 je velmi tekutý a současně odolný proti odpařování. Ztráty odpařováním a výnosem jsou proto minimální. Důsledkem je minimální spotřeba oleje a dobrá omyvatelnost.

Odolnost proti stárnutí

Základní parafinický olej DURIXOLU W 72 s přesným chemickým složením a vybranými aditivy

zaručují zcela neobvyklou teplotní a oxidační stálost. Výsledkem je prakticky neomezená životnost kalicích lázní DURIXOLU W 72. Stačí pouze doplňovat ztráty vzniklé výnosem a je zaručen dlouhodobě stálý ochlazovací účinek.

Použití

Olej se používá k ochlazování vsázek střednělegovaných případně nelegovaných cementačních ocelí a ocelí ke zúšlechťení. Může být použit v pecích víceúčelových, průběžných, šachtových, zvonových. Olej je vhodný pro kalení náročných převodů a nástrojů. Kalení probíhá s minimálním prutím a deformacemi.

DURIXOL W 71

Má prakticky stejné kalicí účinky a chemické složení jako DURIXOL W 72. Odlišuje se pouze aditivy, které jsou voleny s ohledem na docílení lesklých povrchů zboží po kalení. Pro zvláštní případy je možné dodat olej DURIXOL W 71 S, s velmi nízkým obsahem síry (<0.05%).

Technické údaje - orientační hodnoty	Durixol W 72/DURIXOL W71
Hustota při 20°C	0.884
Viskozita při 20°C	47 mm ² /s
Viskozita při 40°C	21 mm ² /s
Viskozita při 50°C	15.7 mm ² /s
Viskozita při 100°C	4.7 mm ² /s
Bod vzplanutí	200 °C
Ztráta odpařováním podle Noacka (1h, 150°C)	0.9 váh. %
Doporučené teploty použití	50 - 130 °C

Pro jakékoli další dotazy jsme Vám kdykoliv k dispozici.

Zastoupení v ČR a SR:

ECOSOND s.r.o.

Provozovna: K Vodárně 531, 257 22 Čerčany

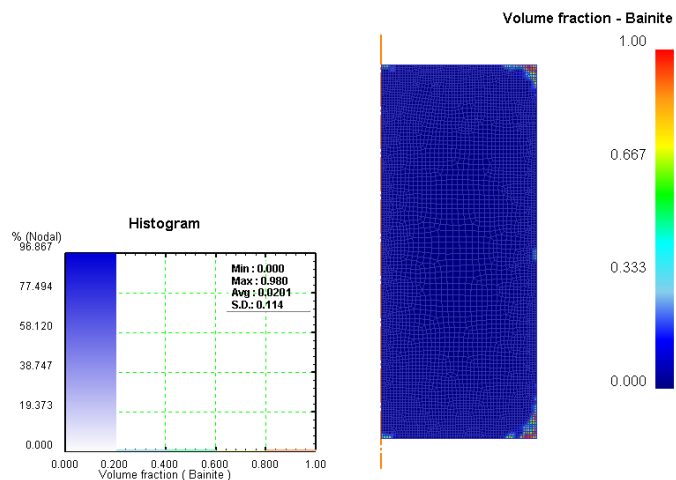
Tel./fax: +420 317 777 772-5

Email: ecosond@ecosond.cz

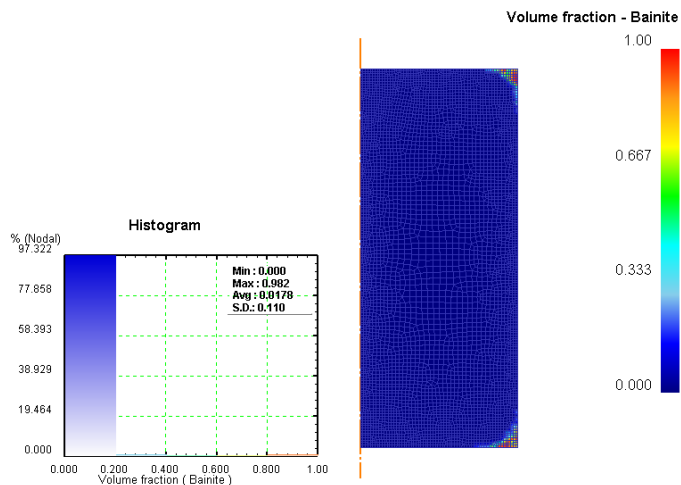
<http://www.ecosond.cz>

Obr. 48 Charakteristika ochlazovacího oleje Durixol W 72

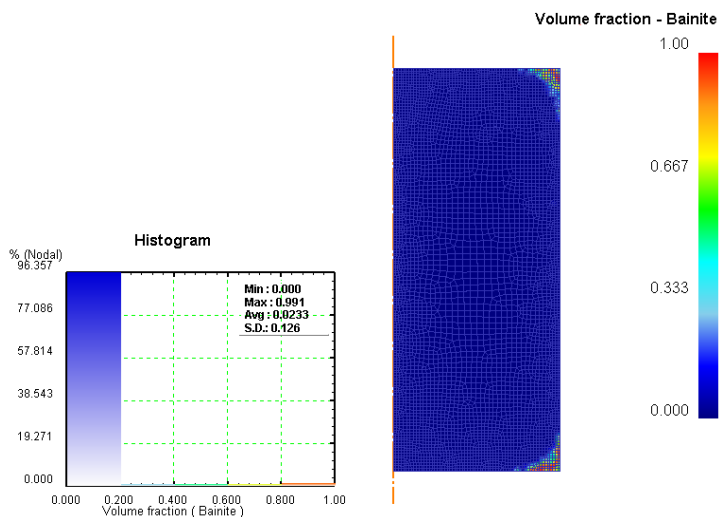
Příloha č. 2 Struktura oceli C35 po kalení



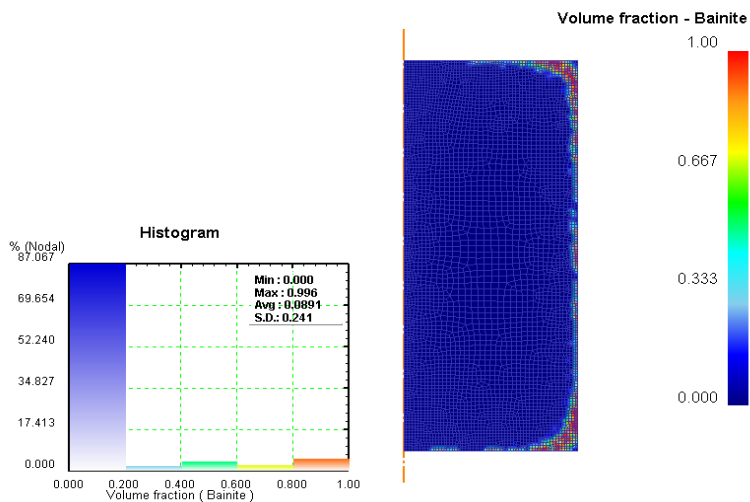
Obr. 49 Rozložení struktury po kalení, materiál C35, teplota lázně 40°C, proudění 0,1m/s s podílem bainitu



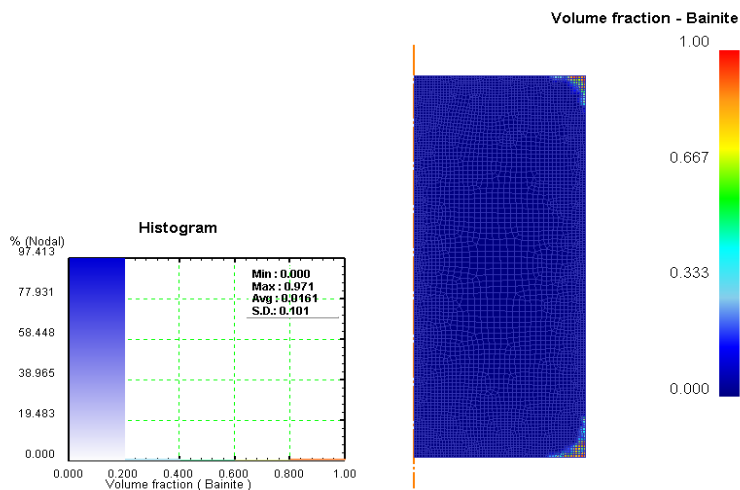
Obr. 50 Rozložení struktury po kalení, materiál C35, teplota lázně 40°C, proudění 0,4m/s s podílem bainitu



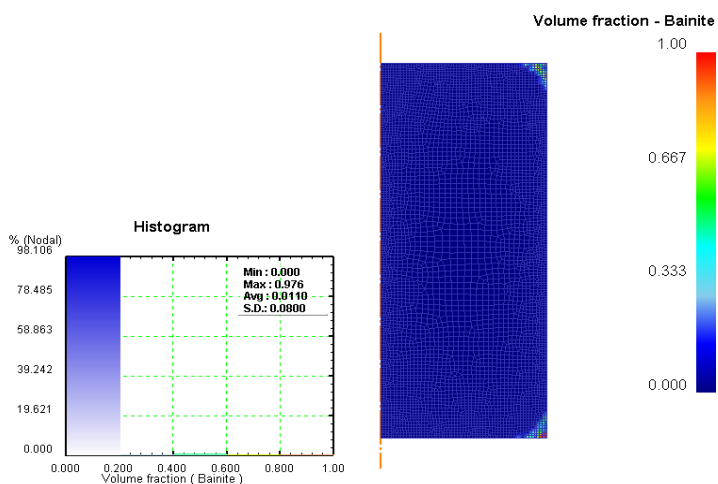
Obr. 51 Rozložení struktury po kalení, materiál C35, teplota lázně 40°C, proudění 0,8m/s s podílem bainitu



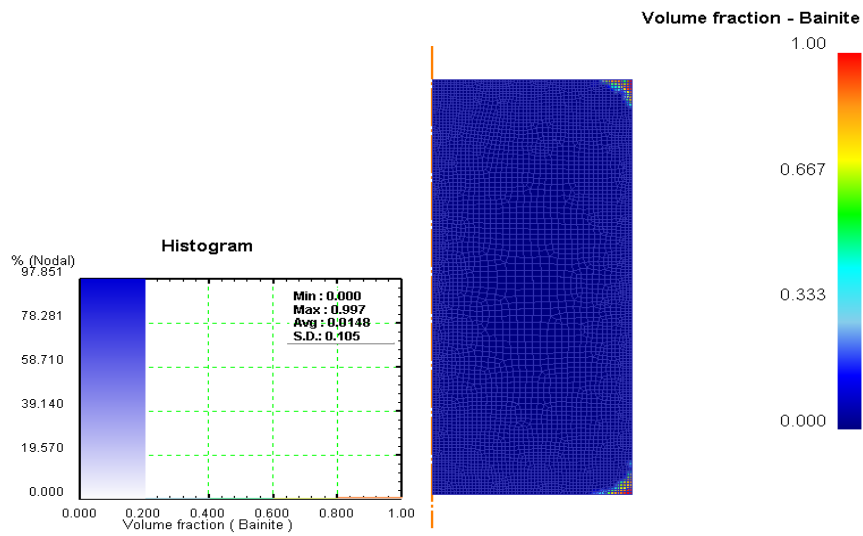
Obr. 52 Rozložení struktury po kalení, materiál C35, teplota lázně 40°C, proudění 1,2m/s s podílem bainitu



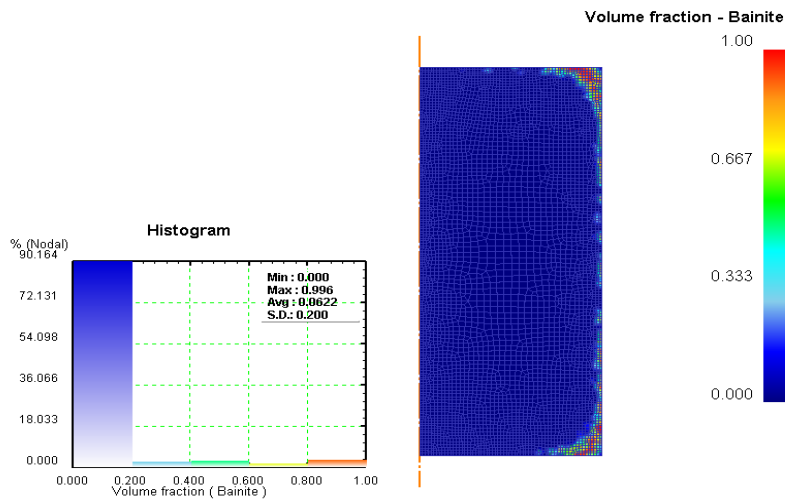
Obr. 53 Rozložení struktury po kalení, materiál C35, teplota lázně 60°C, proudění 0,1m/s s podílem bainitu



Obr. 54 Rozložení struktury po kalení, materiál C35, teplota lázně 60°C, proudění 0,4m/s s podílem bainitu

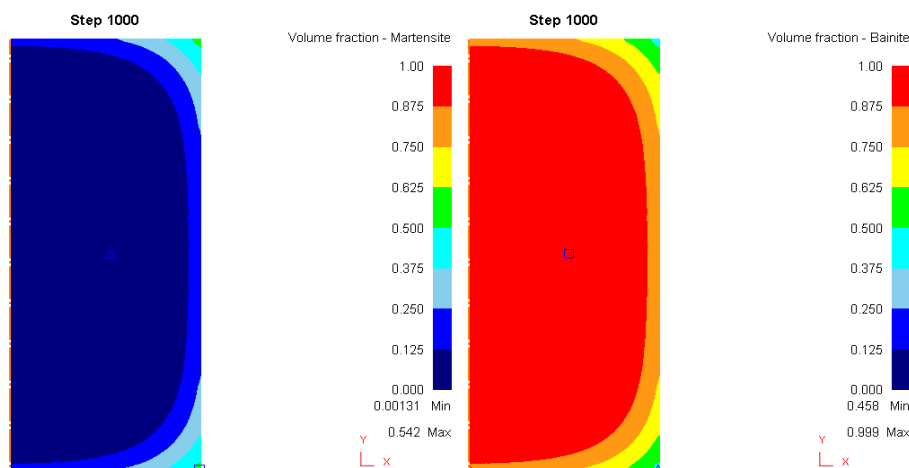


Obr. 55 Rozložení struktury po kalení, materiál C35, teplota lázně 60°C, proudění 0,8 m/s s podílem bainitu

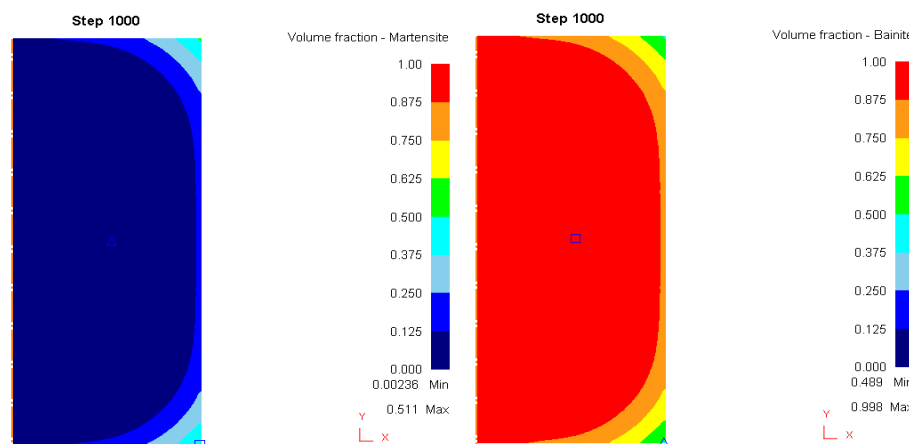


Obr. 56 Rozložení struktury po kalení, materiál C35, teplota lázně 60°C, proudění 1,2 m/s s podílem bainitu

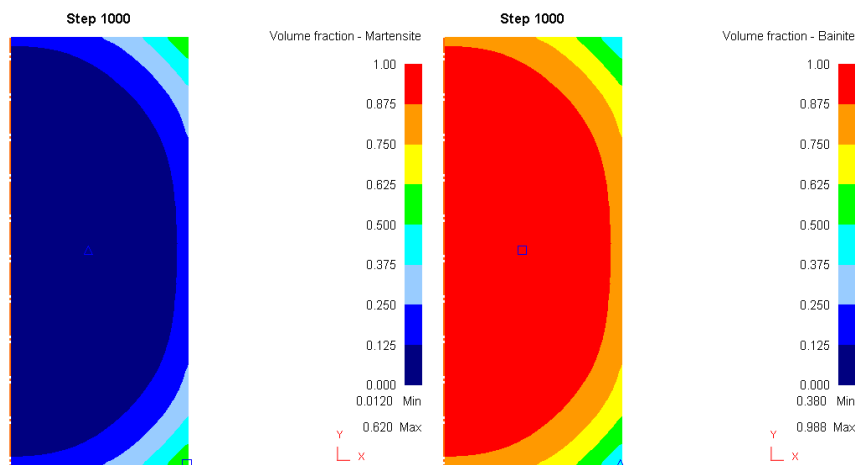
Příloha č. 3 Struktura oceli SNC815 po kalení



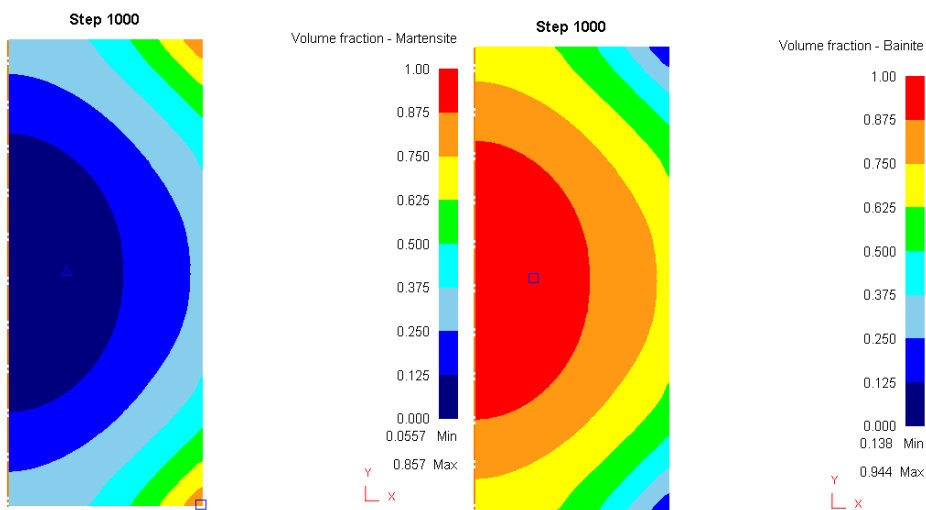
Obr. 57 Rozložení martenzitické a bainitické fáze po kalení, materiál SCN 815, teplota lázně 40°C, proudění 0 m/s. Podíl martenzitické fáze v celém průřezu dosahuje hodnoty 9,3%, největší koncentrace v rozích a to přibližně 50%.



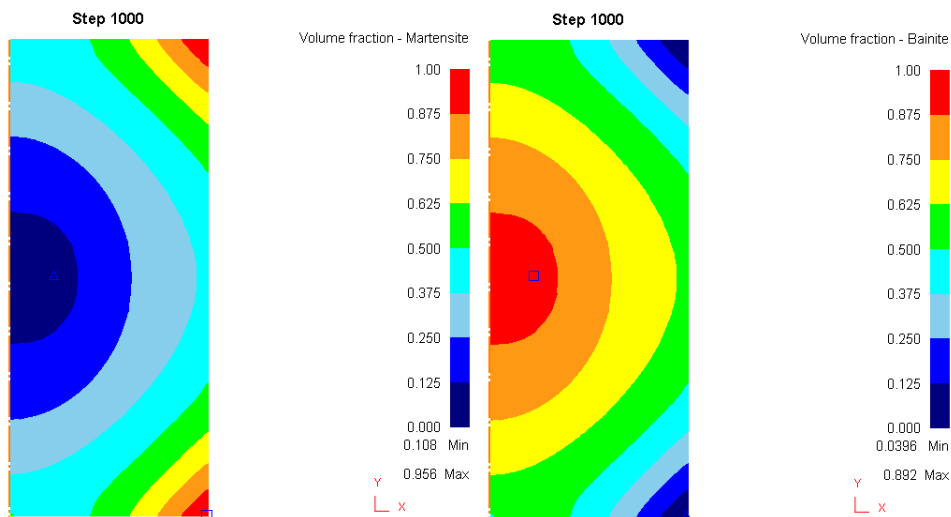
Obr. 58 Rozložení martenzitické a bainitické fáze po kalení, materiál SCN 815, teplota lázně 40°C, proudění 0,1 m/s. Podíl martenzitické fáze v celém průřezu dosahuje hodnoty 7,1%. Oproti rychlosti 0 m/s je koncentrace nižší i v rozích.



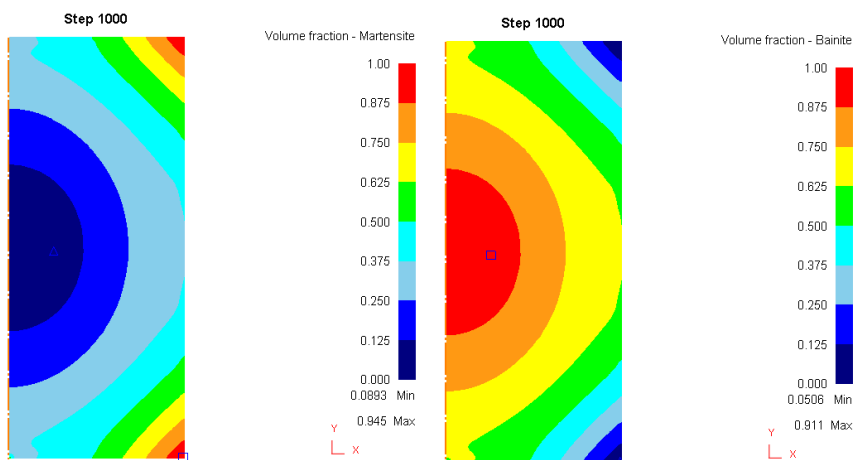
Obr. 59 Rozložení martenzitické a bainitické fáze po kalení, materiál SCN 815, teplota lázně 40°C, proudění 0,4 m/s. Podíl martenzitické fáze v celém průřezu dosahuje hodnoty 12,8%, martenzit se začíná vyskytovat na horní a dolní ploše válce



Obr. 60 Rozložení martenzitické a bainitické fáze po kalení, materiál SCN 815, teplota lázně 40°C, proudění 0,8 m/s. Podíl martenzitické fáze v celém průřezu dosahuje hodnoty 28,3%



Obr. 61 Rozložení martenzitické a bainitické fáze po kalení, materiál SCN 815, teplota lázně 40°C, proudění 1,2 m/s. Podíl martenzitické fáze v celém průřezu dosahuje hodnoty 41%, koncentrace v rozích již 100%.



Obr. 62 Rozložení martenzitické a bainitické fáze po kalení, materiál SCN 815, teplota lázně 40°C, proudění 1,5 m/s. Podíl martenzitické fáze v celém průřezu dosahuje hodnoty 37,3%