

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Studijní program Stavební inženýrství

Studijní obor Integrovaná bezpečnost staveb

**134 DPM – Diplomová práce**

**OCELOVÉ KONSTRUKCE  
PO POŽÁRNÍM ZÁSAHU**

STEEL STRUCTURES AFTER FIRE INTERVENTION

Bc. Lukáš Košata

Vedoucí práce: prof. Ing. František Wald, CSc.



2020

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Košata</u>	Jméno: <u>Lukáš</u>	Osobní číslo: <u>423170</u>
Zadávací katedra: <u>Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí</u>		
Studijní program: <u>Integrální bezpečnost staveb</u>		
Studijní obor: <u>Stavební inženýrství</u>		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Ocelové konstrukce po požárním zásahu</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Steel structures after fire attack</u>	
Pokyny pro vypracování: Shrnutí problematiky Příprava požárních experimentů ochlazení Provedení experimentů Vyhodnocení experimentů Příprava experimentu kalení Provedení experimentů Vyhodnocení experimentů Zavěry	
Seznam doporučené literatury: Wald, F.; Pokorný, M.; Horová, K.; Hejtmánek, P.; Najmanová, H.; Benýšek, M.; Kurejková, M.; Schwarz, I., Modelování dynamiky požáru v budovách, Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2017. ISBN 978-80-01-05633-2. Wald, F.; Wang, Y.C.; Burgess, I.W.; Gillie, M. Performance-Based Fire Engineering of Structures, Boca Raton: CRC Press, 2012. ISBN 978-0-415-55733-7. Wald, F.; Beneš, M.; Chladná, M.; Karpaš, J.; Holický, M.; Kuklík, P.; Kroupa, L.; Langer, J. et al. Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí Praha: CTU. Publishing House, 2005. ISBN 80-01-03157-8.	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>prof. Ing. František Wald, CSc.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>23.9.2019</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>5.1.2020</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

23.9.2019  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta(ky)

---

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Ocelové konstrukce po požárním zásahu“ jsem vypracoval samostatně pod odborným vedením prof. Ing. Františka Walda, CSc. a s použitím zdrojů uvedených v seznamu literatury.

Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 5.1.2020

.....

Bc. Lukáš Košata

---

## **Poděkování**

Děkuji své rodině a přítelkyni za veškerou podporu během studia a zpracovávání této diplomové práce. Děkuji prof. Ing. Františkovi Waldovi, CSc., za odborné vedení a věcné připomínky. Dále děkuji Ing. Marii Kolaříkové, PhD., za pomoc při metalografickém rozboru.



---

# Obsah

	<b>Abstrakt</b> .....	<b>V</b>
	<b>Abstract</b> .....	<b>V</b>
	<b>Seznam použitých symbolů a zkratk</b> .....	<b>VI</b>
<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Požární zásah</b> .....	<b>2</b>
2.1	Hašení vodou.....	2
2.2	Hašení jinými prostředky .....	4
2.3	Princip výpočtu .....	4
<b>3</b>	<b>Vlastnosti oceli</b> .....	<b>9</b>
3.1	Struktura oceli .....	10
3.2	Krystalizace oceli .....	11
3.2.1	Struktury vznikající při ochlazování .....	11
3.2.2	Struktury vznikající při ohřevu .....	12
3.2.3	Znázornění krystalizace oceli.....	12
3.3	Tepelné zpracování ocelí .....	14
3.3.1	Kalení .....	14
3.3.2	Vliv legujících prvků na prokalitelnost.....	15
3.3.3	Kalitelnost stavebních ocelí .....	16
<b>4</b>	<b>Cíle práce</b> .....	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>Stavební oceli po ochlazení</b> .....	<b>19</b>
5.1	Chemický a metalografický rozbor vzorků.....	22
5.1.1	Běžná konstrukční ocel S355J2 .....	23
5.1.2	Vysokopevnostní ocel S700.....	24
5.1.3	Ocel F36.....	25
5.2	Vyhodnocení .....	26
<b>6</b>	<b>Ochlazování vodním proudem</b> .....	<b>28</b>
6.1	Kalibrace termočlánků .....	28
6.2	Plný proud .....	31
6.3	Sprchový proud .....	33
6.4	Porovnání ochlazování .....	35
<b>7</b>	<b>Analytický model ochlazování</b> .....	<b>36</b>
7.1	Odhad účinnosti ochlazování vodou .....	36
7.2	Aplikace analytického výpočtu .....	40
7.3	Vyhodnocení .....	43
<b>8</b>	<b>Numerický model ochlazování</b> .....	<b>44</b>
8.1	Použitý software.....	44
8.1.1	Fire Dynamics Simulator (FDS) .....	44
8.1.2	FreeFEM .....	45
8.2	Definice modelu .....	45
8.3	Verifikace a validace.....	47

---

8.3.1	Sálání a přestup tepla prouděním .....	47
8.3.2	Ochlazování plným vodním proudem.....	48
8.4	Aplikace numerického modelu .....	51
8.4.1	Stropní nosník .....	51
8.4.2	Ocelový sloup .....	53
8.4.3	Ocelové ztužidlo .....	55
8.4.4	Vyhodnocení .....	56
<b>9</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>58</b>
	<b>Literatura.....</b>	<b>59</b>
	<b>Příloha A – metalografické snímky .....</b>	<b>61</b>
	<b>Příloha B – ochlazování vodním proudem.....</b>	<b>70</b>
	<b>Příloha C – zdrojový kód numerického modelu .....</b>	<b>73</b>

---

## Abstrakt

Cílem práce je popsat změny v krystalické struktuře ocelí po pomalém zahřívání během požáru a následném prudkém ochlazení vodním proudem. V první části práce jsou popsány základy vedení požárního zásahu. Ve druhé části jsou popsány materiálové struktury vznikající v ocelích, jejich vlastnosti a podmínky jejich vzniku. Ve třetí části je experimentálně ověřeno, jak je při prudkém ochlazení změněna struktura konstrukčních ocelí. Pozornost je věnována vzniku křehké martenzitické struktury. Ve čtvrté části je experimentálně ověřena skutečná rychlost poklesu teploty oceli při ochlazování vodním proudem. Pátá část práce se zabývá možností odhadu doby ochlazování analytickým způsobem a numerickou metodou na základě výsledků experimentu.

### Klíčová slova

ocelové konstrukce, požár, ochlazování, kalení, martenzit, vodní proud, metoda konečných prvků

## Abstract

The subject of this work is description of changes in the metallurgical structure of steel after a slow heating during building fire and following rapid cooling by water stream. In the first part is introduction to fire extinguishing by water. The second part describes metallurgical structures of steel. In the third part are experimentally verified changes in material structure of construction steels after rapid cooling. Attention is focused on martensite formation. The fourth part describes a real speed of temperature decrease during cooling by water stream. The fifth part describes analytical and numerical estimation of time to cooling various structure elements.

### Keywords

steel structures, fire, cooling, quenching, martensite, water stream, finite element method

---

## Seznam použitých symbolů a zkratek

### Velké latinské symboly

$A_a$	Plocha průmětu ocelového prvku ve vodním proudu	$m^2$
$A_w$	Plocha průřezu vodním proudem	$m^2$
$A_1$	Dolní teplota překrytí austenitu	$^{\circ}C$
$A_3$	Horní teplota překrytí austenitu	$^{\circ}C$
$C_a$	Tepelná kapacita oceli pro ochlazení	$J \cdot kg^{-1}$
$C_{w,eff}$	Účinná tepelná kapacita vody s vlivem výparu	$J \cdot kg^{-1}$
$G$	Jednotková hmotnost profilu	$kg \cdot m^{-1}$
$Q_a$	Teplo odebrané z oceli	J
$Q_w$	Teplo předané do vody	J
$Q_{V,w}$	Objemový průtok proudnicí	$m^3 \cdot s^{-1}$
$V$	Objem ocelového prvku	$m^3$

### Malé latinské symboly

$b_a$	Šířka ocelového profilu	m
$c_a$	Měrná tepelná kapacita oceli	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_w$	Měrná tepelná kapacita vody	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$h_a$	Výška ocelového profilu	m
$h_{net}$	Tepelný tok povrchem tělesa	$W \cdot m^{-2}$
$k_v$	Součinitel využití vodního proudu	-
$k_{vap}$	Součinitel výparu vody	-
$l$	Ochlazovaná délka	m
$l_v$	Měrné skupenské teplo vypařování vody	$J \cdot kg^{-1}$
$l_{v,eff}$	Účinné výparné teplo vody	$J \cdot kg^{-1}$
$m_a$	Hmotnost oceli	kg

---

$m_{w,eff}$	Účinný hmotnostní průtok vody	$kg \cdot s^{-1}$
$t$	Čas	s
<b>Řecké symboly</b>		
$\alpha_c$	Součinitel přestupu tepla prouděním vzduchu	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$\alpha_w$	Součinitel přestupu tepla do vody	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$\Delta\theta_{a,12,c}$	Předpokládaný rozdíl teplot mezi povrchem a jádrem vzorku	$^{\circ}C$
$\Delta\theta_{a,12,r}$	Měřený rozdíl teplot mezi povrchem a jádrem vzorku	$^{\circ}C$
$\Delta\theta_{TCL,dev}$	Odchylka měření termočlánku	$^{\circ}C$
$\varepsilon_g$	Emisivita okolí	-
$\varepsilon_m$	Emisivita materiálu	-
$\theta$	Teplota	$^{\circ}C$
$\theta_{w,0}$	Počáteční teplota vody	$^{\circ}C$
$\theta_{w,1}$	Konečná teplota vody	$^{\circ}C$
$\theta_a$	Teplota oceli	$^{\circ}C$
$\theta_{a,1}$	Teplota povrchu oceli	$^{\circ}C$
$\theta_{a,2}$	Teplota jádra oceli	$^{\circ}C$
$\theta_{a,1,r}$	Měřená teplota povrchu oceli	$^{\circ}C$
$\theta_{a,2,r}$	Měřená teplota jádra oceli	$^{\circ}C$
$\theta_{fin}$	Konečná teplota oceli	$^{\circ}C$
$\theta_g$	Teplota vzduchu	$^{\circ}C$
$\theta_{ini}$	Počáteční teplota oceli	$^{\circ}C$
$\theta_{w,var}$	Bod varu vody	$^{\circ}C$
$\lambda_a$	Tepelná vodivost oceli	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\rho_a$	Hustota oceli	$kg \cdot m^{-3}$
$\rho_w$	Hustota vody	$kg \cdot m^{-3}$

---

---

$\tau$	Doba ochlazování	s
$\psi_1, \psi_2, \psi_3$	Pomocné součinitele	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$

### Zkratky

ARA	Anizotermický rozpad austenitu
A110	Požární hadice s jmenovitým průměrem 110 mm (typ A)
B75	Požární hadice s jmenovitým průměrem 75 mm (typ B)
CAS	Cisternová automobilová stříkačka
CEV	Uhlíkový ekvivalent oceli
CFD	Simulace proudění tekutin (angl. Computational Fluid Dynamics)
C52	Požární hadice s jmenovitým průměrem 52 mm (typ C)
D25	Požární hadice s jmenovitým průměrem 25 mm (typ D)
IRA	Izotermický rozpad austenitu
JPO	Jednotka požární ochrany
LGPL	GNU Lesser General Public Licence (softwarová licence)

### Proměnné ve zdrojovém kódu numerického modelu

V kapitole 8 se používají názvy proměnných použitých v numerickém modelu. Přehled těchto proměnných a jejich význam je uveden v tab. 15.

Jejich názvy jsou zvýrazněny – font Courier New s tečkovaným podtržením

# 1 Úvod

Degradace materiálových vlastností oceli za zvýšených teplot závisí na rychlosti zahřívání. EN 1993-1-2:2005 poskytuje návrhové hodnoty meze kluzu, meze úměrnosti a modul pružnosti při zahřívání požárem 2 až 50 K za min [1]. Vztahy jsou připraveny pro navrhování stavebních konstrukcí při požáru. V literatuře jsou dispozici i materiálové vlastnosti konstrukční oceli po zahřátí nad teplotu austenitizace oceli. Neuvažuje se s rychlým ochlazováním konstrukcí, ke kterému může docházet při zdolávání požáru jednotkami požární ochrany. Krystalická struktura oceli se při ochlazení mění. Změna závisí na teplotě, rychlosti chlazení a množství uhlíku/příměsí. Ochlazování se využívá pro tepelné zpracování oceli. Při tepelném zpracování se mění dvě základní vlastnosti oceli pevnost/tažnost a houževnatost. U strojních ocelí se cíleně dosahuje požadované tvrdosti materiálu zchlazením – kalením., zároveň se ale zvyšuje křehkost oceli. Kalitelné jsou pouze uhlíkové oceli. Ve stavebních konstrukcích je křehkost nežádoucí. Tato práce se věnuje riziku zakalení při požárním zásahu na objektu s ocelovou nosnou konstrukcí.

Ve strojírenství se používá kalení, kterým se dosahuje vysoké tvrdosti pomocí prudkého ochlazení ve vodní lázni. K prudkému ochlazení vodním proudem může dojít při požárním zásahu. Při kalení se zvyšuje křehkost, která je ve stavebních konstrukcích nežádoucí. Na místě je proto otázka, zda v konstrukčních ocelích hrozí vznik martenzitické struktury, a tím zkřehnutí stavební konstrukce.

## 2 Požární zásah

Požárem se rozumí každé nežádoucí hoření, při kterém dochází k usmrcení nebo zranění osob a zvířat, škodám na majetku, nebo pokud jsou osoby, zvířata nebo majetek alespoň ohroženy [2]. Podstatou hoření je fyzikálně chemická reakce, při které hořlavá látka reaguje s oxidačním prostředkem za vzniku tepla a světla (exotermická reakce).

Hlavními podmínkami pro hoření je přítomnost paliva (hořlavé látky), oxidačního prostředku (kyslík) a iniciační energie (teplo). Tyto tři elementy jsou zpravidla nazývány trojúhelníkem hoření. Protože při chemické reakci vzniká teplo, které podporuje další průběh hoření, jedná se o řetězovou reakci. Hoření lze zamezit tak, že odebereme z pásma hoření nejméně jeden z elementů hoření:

- zředěním reagujících látek
- zamezením přístupu kyslíku k hořící látce
- ochlazením pásma hoření

Další možností je zamezení reakci chemickou cestou. Tohoto principu využívají halonová hasiva. S příchodem těchto hasiv byla teorie trojúhelníku hoření rozšířena o čtvrtý element – chemickou reakci. Tím vzniká tzv. čtyřstěn (tetraedr) hoření [3].

Úkolem jednotek požární ochrany (JPO) při požárním zásahu je lokalizace a následná likvidace požáru [4]. Toho lze dosáhnout výše uvedenými způsoby. Pro práci je důležitý zejména způsob hašení pomocí ochlazování pásma hoření. Právě při tomto způsobu může dojít k rychlému ochlazení stavebních konstrukcí.

### 2.1 Hašení vodou

Nejčastěji používaným hasebním prostředkem je voda. Použití vody jako hasicí látky je výhodné zejména z hlediska její snadné dostupnosti na většině míst, a zároveň značné univerzálnosti použití. Voda má dva hlavní hasební efekty [4]:

- **Ochlazovací efekt** vody spočívá zejména ve vypařování (bod varu vody za normálního tlaku je  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Voda má vysokou hodnotu výparného tepla, proto do sebe při vypařování může absorbovat velké množství tepla. Lze poměrně snadno ochladit celé požářiště a zároveň ochladit hořící látku bod teploty vzplanutí, a je zamezeno dalšímu hoření.

Díky vysokému chladicímu efektu lze vodu využít k ochlazování objektů v blízkosti požáru.



- **Dusivý efekt** vody spočívá ve zvětšení objemu vodní páry. Přechemem z kapaln6 vody na vodn6 p6ru se její objem zv6třuje asi 1700kr6t, 6mž je vyt6řnov6n vzduřn6 kysl6k a je zamezov6no dalř6mu hořen6.

**Vodn6 proud** je tok hasiva vych6zej6c6 z proudnice do okamžiku dosažen6 sv6ho c6le. Při pož6rn6m z6sahu se m6že vyuř6vat v n6kolika podob6ch:

- **Pln6 proud** (kompaktn6) – proud s t6m6ř rovnob6žn6mi okraji, pouř6v6 se pro dosažen6 co největř6ho dostř6ku. Po dlouhou dr6hu letu z6st6v6 proud ucelen6, k vypařov6n6 doch6z6 jen v omezen6 m6ře, m6 proto velkou pr6nikovou s6lu a chlad6c6 efekt tak lze soustředit do ohniska pož6ru.
- **Mlhov6 proud** – voda je v tomto proudu rozpt6lena do mal6ch kapi6ek. Je zde dosaženo velké povrchov6 plochy v pom6ru k objemu hasiva. Je tak dosaženo maxim6ln6ho 6c6nku chlad6c6ho efektu. Z6roveň se zna6n6 66st vody vypař6 j6ř ve vzduchu a chlad6c6 6c6nek tak p6sob6 na cel6 prostor. Hoř6c6 l6tka b6v6 zpravidla ochlazov6na jen minim6ln6 nebo v6bec.
- **Sprchov6 proud** – voda je po v6stř6ku z proudnice rozpt6lena do kuřele. Kapky v tomto proudu jsou v6tř6, neř v p6ripad6 mlhov6ho proudu. Sprchov6 proud kombinuje v6hody v6ře uveden6ch proud6. Proud si z velké 66sti zachov6v6 svou pr6nikovou s6lu, z6roveň je d6ky roztr6řt6n6 schopn6 ochlazovat prostor v m6st6 pož6ru.

Hasebn6 6c6nek vody lze zv6řsit pomoc6 p6rm6ř6 r6zn6ch chemik6li6 (sm66cedel) do vody. Sm66cedla sn6řzuj6 povrchov6 nap6t6 vody, a proto takto upraven6 voda dok6že sn6že zat6kat do prasklin a mezer v materi6lu, mezer v sypk6m materi6lu, apod. T6m se u n6kter6ch tuh6ch l6tek v6razn6 zv6řuje hasebn6 6c6nek vody. Vliv sm66cedel na ochlazov6n6 oceli nebude v t6to p6aci uv6zov6n. Voda je na m6st6 z6sahu dopravov6na pomoc6 hadic r6zn6ch typ6 a rozm6r6:

- **Savice** – pouř6v6 se k s6n6 vody ze zdroje (n6drř, vodn6 tok) do 6erpadla. Je konstruov6na na provoz s podtlakem, nepouř6v6 se pro dopravu vody do proudnice.
- **Hadice A110** – jmenovit6 pr6m6ř 110 mm; pouř6v6 se zejm6na p6i rozs6hl6ch pož6rech k doprav6 velk6ho mnořstv6 vody na velké vzd6lenosti mezi jednotliv6mi vodn6mi n6drřemi. Zpravidla nikdy neslouř6 k doprav6 vody do proudnice.
- **Hadice B75** – jmenovit6 pr6m6ř 75 mm; pouř6v6 se k doprav6 vody mezi 6erpadly nebo od 6erpadla do bl6zkosti 6to6n6ch proud6. Mohou sloužit k dod6vce vody p6rimo do proudnice, pokud není mořn6 p6ibl6žit se k p6asmu hořen6 a je t6eba zajistit velkou intenzitu dod6vky vody.

- **Hadice C52** – jmenovitý průměr 52 mm; pro dopravu vody se nepoužívá, slouží k napojení jednotlivých útočných proudů buď k rozdělovači, nebo přímo k čerpadlu.
- **Hadice D25** – jmenovitý průměr 25 mm; využívá se pro prvotní zásah a dohašování. Někdy se využívá v náročném terénu (lesní požáry), pokud není nutná intenzivní dodávka vody.

Proudnicí s napojením na hadici typu B lze použít při rozsáhlých požárech budov, pokud není možné přiblížit se s proudnicí k pásmu hoření a je třeba vést požární zásah z velké vzdálenosti. Intenzita dodávky vody pomocí proudnice B75 je vyšší, vzhledem k větší předpokládané vzdálenosti se nepředpokládá větší ochlazovací účinek, než při použití proudnice C52.

Hadice D25 se při zdolávání plně rozvinutého požáru v budově nepoužívá, nebude dále v práci uvažována. V této práci se jako nejnejpříznivější uvažuje proudnice C52.

## 2.2 Hašení jinými prostředky

I přes značnou univerzálnost vody při hašení požáru, není vždy nejvhodnějším hasebními prostředkem. Například pro hašení elektrických zařízení se jedná o nevhodné hasivo. Přimícháním pěnidla do vody lze při použití pěnotvorné proudnice vytvořit lehkou nebo těžkou pěnu. Ta je vhodná například při hašení hořlavých kapalin, aut, skladišť a mnoha jiných případech. Lehkou pěnu lze využít i pro hašení elektrických zařízení pod napětím [5]. Hasební účinek těžké pěny je ochlazovací a izolační, u lehké pěny je ochlazovací účinek téměř zanedbatelný.

Oxid uhličitý je dalším hasivem využívajícím ochlazujícího účinku. Stlačený oxid uhličitý má po opuštění tlakové nádoby teplotu až -70 °C. U dalších hasiv je ochlazovací účinek zanedbatelný. Práce se dále bude zabývat ochlazováním vodou.

## 2.3 Princip výpočtu

Pro odhad rychlosti ochlazování při požárním zásahu se použijí rovnice, vycházející z [15] a [16]. Tyto rovnice se doplní o další součinitele, které budou zohledňovat vliv různých typů proudu a vzdálenosti proudnice od ocelového prvku. Základním předpokladem je skutečnost, že množství tepla odebraného z ocelového prvku se musí rovnat množství tepla, které se předá do vody (přestup tepla do okolního vzduchu se zanedbá):

$$Q_a = Q_w \quad (1)$$

kde  $Q_a$  je teplo odebrané z oceli [J]

$Q_w$  teplo předané do vody; viz rovnice (10) [J]

Teplo odebrané z oceli je závislé na hmotnosti ochlazovaného prvku a tepelné kapacitě oceli:

$$Q_a = m_a \cdot \int_{\theta_{fin}}^{\theta_{ini}} (c_a \cdot d\theta_a) \quad (2)$$

$$m_a = V \cdot \rho_a \quad (\text{pro blokový prvek}) \quad (3)$$

nebo

$$m_a = G \cdot l \quad (\text{pro tyčový prvek}) \quad (4)$$

kde	$G$	je jednotková hmotnost profilu	[kg/m <sup>2</sup> ]
	$c_a$	měrná tepelná kapacita oceli	[J/(kg·K)]
	$l$	ochlazovaná délka (resp. průměr kužele vodního proudu)	[m]
	$m_a$	hmotnost oceli	[kg]
	$V$	objem ocelového prvku	[m <sup>3</sup> ]
	$\rho_a$	hustota oceli	[kg/m <sup>3</sup> ]

Změna hustoty oceli v závislosti na teplotě je zanedbatelná, může být uvažována konstantní ( $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$ ). Tepelnou kapacitu oceli lze uvažovat konstantní, stejnou jako za běžné teploty ( $c_a = 425 \text{ J/(kg·K)}$ ); na straně bezpečnosti). Pro přesnější výpočet je možné využít vztahy uvedené v [1]:

– pro  $20 \text{ °C} \leq \theta_a \leq 600 \text{ °C}$ :

$$c_a(\theta_a) = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \cdot \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_a^3 \quad (5)$$

– pro  $600 \text{ °C} \leq \theta_a \leq 735 \text{ °C}$ :

$$c_a(\theta_a) = 666 + \frac{13\,002}{738 - \theta_a} \quad (6)$$

– pro  $735 \text{ °C} \leq \theta_a \leq 900 \text{ °C}$ :

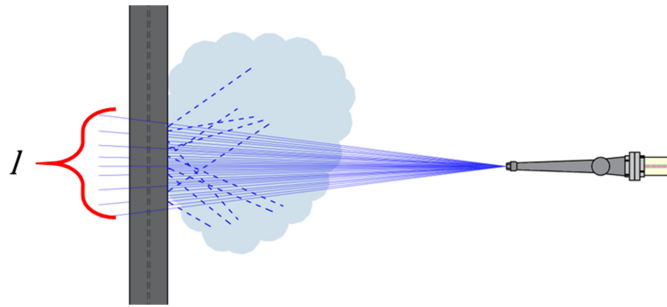
$$c_a(\theta_a) = 545 + \frac{17\,820}{\theta_a - 731} \quad (7)$$

– pro  $900 \text{ °C} \leq \theta_a \leq 1200 \text{ °C}$ :

$$c_a(\theta_a) = 650 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \quad (8)$$

kde  $\theta_a$  je teplota oceli [°C]

Ochlazovaná délka tyčového prvku závisí na příčném rozměru vodního proudu. (obr. 1) Ten závisí na použitém druhu proudu (sprchový proud bude mít větší příčný rozměr, než plný proud, tím bude ochlazovat větší délku) a vzdálenosti proudnice od ocelového prvku (vodní proud se rozšiřuje s rostoucí vzdáleností).



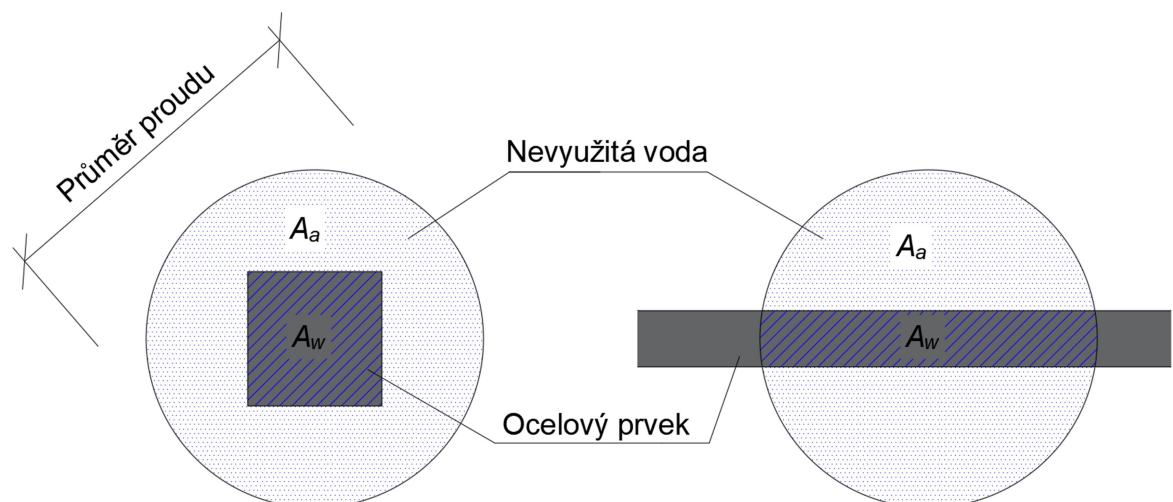
obr. 1: Znárodnění ochlazované délky ocelového prvku

Dále je třeba stanovit parametry vodního proudu. Přestože jevy, které se odehrávají na povrchu oceli s vysokou teplotou, jsou mnohem složitější, bude se pro zjednodušení předpokládat, že objem vody z proudnice se dá rozdělit na 3 části, znázorněné na obr. 3, z nichž každá se bude uvažovat s jiným vlivem na ochlazování oceli:

- 1) Část objemu vůbec nepřijde do styku s povrchem oceli – zejména u širokého sprchového proudu je plocha příčného řezu kuželem vodního proudu velká a značná část „paprsků“ vodního proudu vůbec neprotíná ochlazovaný prvek. (obr. 2) Tato část vodního objemu je zcela zanedbána. Zbývající část objemu je vyjádřena součinitelem  $k_v$ :

$$k_v = \frac{A_a}{A_w} \leq 1,0 \quad (9)$$

kde  $k_v$  je součinitel využití vodního proudu [-]  
 $A_a$  plocha průmětu ocelového prvku v průřezu vodním proudem [ $\text{m}^2$ ]  
 $A_w$  plocha průřezu vodním proudem [ $\text{m}^2$ ]

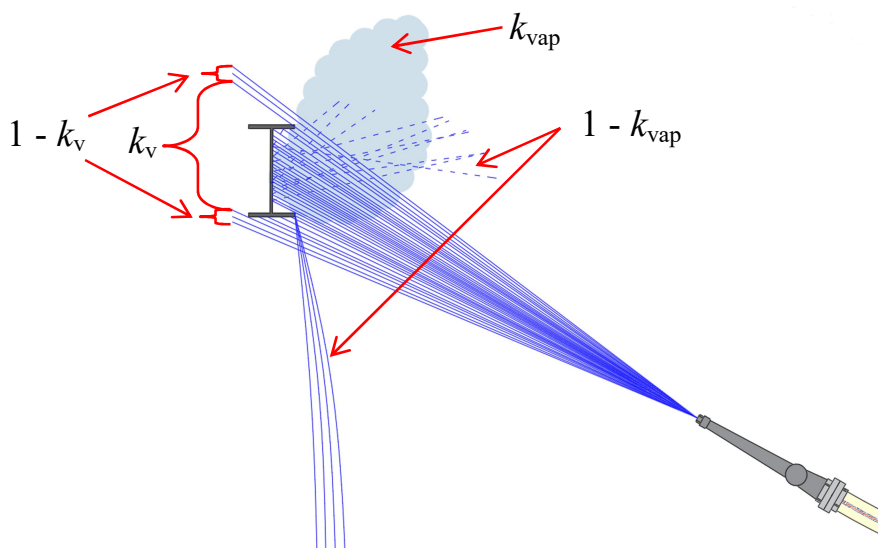


obr. 2: Příčný řez vodním proudem při ochlazování (a) bloku oceli nebo (b) tyčového prvku. Šrafovaná část odpovídá součiniteli  $k_v$ , tečkovaná část průřezu je ve výpočtu zcela zanedbána.

- 2) Část vody dopadne na povrch oceli a vypaří se, tzn. odebere teplo odpovídající ohřevu na bod varu a skupenskému teplu vypařování. Podíl vypařeného množství vody k množství vody podílející se na ochlazování, se vyjádří součinitelem  $k_{vap}$ .
- 3) Voda, která se po dopadu na ocelový prvek nevypaří, se pouze ohřeje na teplotu  $\theta_{w,1}$  a opustí povrch ocelového prvku. Teplota  $\theta_{w,1}$  se může lišit v závislosti na tom, jakým způsobem opustí povrch oceli (odrazem, stečením). Proto je třeba uvažovat průměrnou teplotu vody, která opustí povrch oceli.

**Příklad:**

- Ocelový plech o velikosti čtverce se stranou  $0,5\text{ m}$  ( $A_a = 0,25\text{ m}^2$ ) se ze vzdálenosti  $2,35\text{ m}$  ochlazuje sprchovým vodním proudem s průtokem  $100\text{ l/min.}$  a úhlem rozstříku  $30^\circ$ .
- $A_w = \pi \cdot [2,35 \cdot \tan(30^\circ/2)]^2 = 1,25\text{ m}^2$
- $k_v = 0,25/1,25 = 0,20$
- Na povrch plechu tedy dopadne 20 % vodního objemu ( $20\text{ l/min.}$ ). Z tohoto objemu se během 1 min ochlazování vypaří  $1,8\text{ l}$ , zbývajících  $17,2\text{ l}$  se odrazí nebo odteče při průměrné teplotě  $35\text{ }^\circ\text{C}$ .
- $k_{vap} = 1,8/20,0 = 0,09$        $\theta_{w,1} = 35\text{ }^\circ\text{C}$



obr. 3: Znárodnění součinitelů pro využití objemu a výparného tepla

Při malém množství vody dopadající na povrch oceli s vysokou teplotou se dá očekávat, že se většina této vody vypaří ( $k_{vap} \approx 1,0$ ). Naopak při soustředění velkého množství vody do jednoho místa značná část vody odteče z povrchu nebo se rovnou odrazí ( $k_{vap} \approx 1,0$ ). Celkové teplo odvedené vodním proudem lze vyjádřit takto:

$$Q_w = m_{w,eff} \cdot C_{w,eff} \cdot \tau \quad (10)$$

$$m_{w,eff} = k_v \cdot Q_{V,w} \cdot \rho_w \quad (11)$$

$$C_{w,eff} = k_{vap} \cdot [l_v + c_w \cdot (\theta_{w,var} - \theta_{w,0})] + (1 - k_{vap}) \cdot c_w \cdot \Delta\theta_w \quad (12)$$

$$\Delta\theta_w = \theta_{w,1} - \theta_{w,0} \quad (13)$$

kde	$Q_w$	teplo předané do vody	[J]
	$m_{w,eff}$	účinný hmotnostní průtok vody	[kg/s]
	$\rho_w$	hustota vody	[kg/m <sup>3</sup> ]
	$c_w$	měrná tepelná kapacita vody	[J/(kg·K)]
	$C_{w,eff}$	účinná tepelná kapacita vody s vlivem výparu	[J/kg]
	$Q_{V,w}$	objemový průtok vody	[m <sup>3</sup> /s]
	$k_v$	součinitel využití vodního proudu; viz rovnice (9)	[-]
	$k_{vap}$	součinitel výparu vody	[-]
	$l_v$	měrné skupenské teplo vypařování vody	[J/kg]
	$\theta_{w,var}$	teplota varu vody	[°C]
	$\theta_{w,0}$	počáteční teplota vody	[°C]
	$\theta_{w,1}$	konečná teplota vody	[°C]
	$\tau$	doba ochlazování	[s]
	$\Delta\theta_w$	přírůstek teploty vody z povrchu oceli	[K]

Po dosazení do rovnice (1) lze vyjádřit:

$$m_a \cdot \int_{\theta_{fin}}^{\theta_{ini}} (c_a \cdot d\theta_a) = m_{w,eff} \cdot C_{w,eff} \cdot \tau \quad (14)$$

$$\tau = \frac{m_a \cdot \int_{\theta_{fin}}^{\theta_{ini}} (c_a \cdot d\theta_a)}{m_{w,eff} \cdot C_{w,eff}} \quad (15)$$

Ve všech výpočtech budou uvažovány následující materiálové vlastnosti:

tab. 1: Vstupní hodnoty společné pro všechny výpočty

Veličina		Hodnota
Bod varu vody	$\theta_{w,var}$	100 °C
Měrná tepelná kapacita vody	$c_w$	4180 J/(kg·K)
Měrné skupenské teplo vypařování vody	$l_v$	$2,257 \cdot 10^6$ J/kg
Hustota vody	$\rho_w$	1000 kg/m <sup>3</sup>
Měrná tepelná kapacita oceli	$c_a$	dle rovnic (5) až (8)
Hustota oceli	$\rho_a$	7850 kg/m <sup>3</sup>
Tepelná vodivost oceli	$\alpha_a$	dle [1]

### 3 Vlastnosti oceli

Ocel je slitina železa a uhlíku. Oceli s malým obsahem uhlíku jsou středně tvrdé, s rostoucím obsahem uhlíku nabývají na tvrdosti. Při obsahu uhlíku nad 2,1 % již vymizí austenitická struktura a ocel přestává být při teplotách nad 727 °C tvárná. Touto hranicí je definován rozdíl mezi ocelí a litinou. Uhlík má vliv zejména na kujnost a tvrdost oceli. Další příměsi mohou ovlivňovat jiné vlastnosti oceli, jako například pevnost či svařitelnost [6]. Legovacími prvky jsou zejména molybden, mangan, chrom, vanad, nikl a měď.

Obsah uhlíku v konstrukčních ocelích se obvykle pohybuje pod 0,2 %. Podle současné normy pro nelegované konstrukční oceli, smí být obsah uhlíku v hotovém výrobku maximálně 0,27 %, přičemž pro většinu tříd oceli je tento požadavek ještě nižší [7]. Obsah některých legujících prvků v těchto ocelích je omezen pomocí uhlíkového ekvivalentu (CEV):

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Maximální hodnota uhlíkového ekvivalentu je omezena, v závislosti na konkrétní třídě oceli se pohybuje mezi 0,35 až 0,50 %. Rovněž je omezený obsah některých jednotlivých prvků ve stavebních ocelích.

tab. 2: Chemické složení vybraných tříd konstrukčních ocelí podle [7] a [8]

Třída oceli	Maximální obsah prvku [%]												Zdroj
	C	Si	Mn	P	S	V	Ti	Mo	B	N	Cu	CEV	
<b>S235</b>	0,17-0,20	-	1,40	0,025-0,035	0,025-0,035	-	-	-	-	0,012	0,55	0,35-0,40	[7]
<b>S275</b>	0,18-0,22	-	1,50	0,025-0,035	0,025-0,035	-	-	-	-	0,012	0,55	0,40-0,44	
<b>S355</b>	0,20-0,24	0,55	1,60	0,025-0,035	0,025-0,035	-	-	-	-	0,012	0,55	0,45-0,49	
<b>S450</b>	0,20-0,22	0,55	1,70	0,030	0,030	-	-	-	-	0,025	0,55	0,47-0,49	
<b>S355MC</b>	0,12	0,50	1,50	0,025	0,015	0,20	0,15	-	-	-	-	-	[8]
<b>S460MC</b>	0,12	0,50	1,60	0,025	0,015	0,20	0,15	-	-	-	-	-	
<b>S700MC</b>	0,12	0,60	2,10	0,025	0,015	0,20	0,22	0,50	0,005	-	-	-	
<b>S900MC</b>	0,20	0,60	2,20	0,025	0,010	0,20	0,25	1,00	0,005	-	-	-	
<b>Poznámka:</b> Pokud je uváděno rozmezí maximálních hodnot, je konkrétní maximální hodnota závislá na jakostním stupni oceli (JR, JO nebo J2)													

### 3.1 Struktura oceli

Železo krystalizuje ve dvou modifikacích. První je **železo  $\gamma$** , které má kubickou plošně středěnou strukturu. Vyskytuje se při vyšších teplotách a je schopné rozpouštět v sobě uhlík. Druhou modifikací je **železo  $\alpha$**  s kubickou prostorově středěnou strukturou, které se vyskytuje při nižších teplotách. Tato modifikace má oproti první jmenované značně omezenou schopnost rozpouštět uhlík.

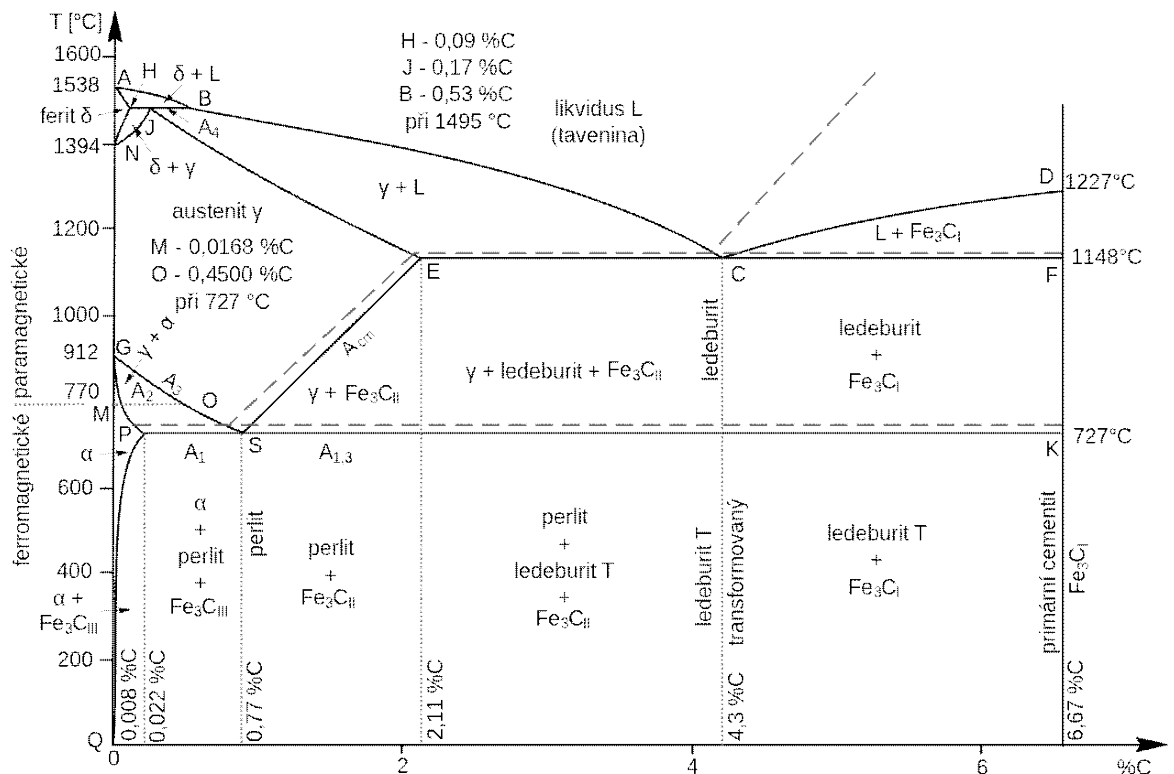
V závislosti na obsahu uhlíku, změnách teploty a dalších podmínkách vytváří slitina železa s uhlíkem několik různých materiálových struktur. Základní fáze a jejich závislost na teplotě a obsahu uhlíku jsou zřejmé z *obr. 4*. Tato práce se bude zabývat zejména strukturami, které vznikají v ocelích s obsahem uhlíku menším než 0,77 %, tedy tzv. podeutektoidních ocelích:

- **Tavenina** (likvidus) – vyskytuje se při teplotách nad 1495 °C.
- **Austenit** je intersticiálním roztokem uhlíku v železe  $\gamma$ . Vzniká při ochlazování taveniny při teplotách pod 1495 °C. Maximální rozpustnost uhlíku v austenitu je 2,11 % hmotnostních. Ochlazováním austenitu pod teplotu  $A_3$  (727 až 911 °C) dochází k překrytí na ferit a perlit.
- **Ferit** – oproti austenitu má krychlovou prostorově středěnou krystalickou mřížku (železo  $\alpha$ ). Začíná vznikat ochlazováním austenitu pod teplotu  $A_3$  (727 až 911 °C). Maximální obsah uhlíku ve feritu je 0,022 %. Při klesající teplotě rozpustnost uhlíku klesá a nerozpustitelný uhlík je vysrážen jako **cementit** (karbid vápníku –  $Fe_3C$ ). Obsah uhlíku v cementitu je 6,67 %.
- **Perlit** – směs feritu a cementitu. Vzniká mezi jednotlivými zrny feritu a tvoří tak tmel mezi těmito zrny. Cementit se může v perlitu vyskytovat ve dvou podobách:
  - o **Lamelární perlit** – destičky cementitu mezi jednotlivými destičkami feritu.
  - o **Globulární perlit** – zrna cementitu přibližně kulového tvaru rozmístěné v celém objemu feritu. Vzniká při dlouhodobé výdrži ve vysokých teplotách těsně pod  $A_1$ . Při teplotách pod  $A_1$  je stabilní.
- **Bainit** – vzniká při teplotách cca 250-550 °C. Krystalická mřížka feritu má vysokou koncentraci dislokací, které činí bainitickou strukturu pevnější. Tvrdost je větší než u austenitu a feritu. Je to metastabilní fáze, při opětovném ohřevu se mění na sorbit.
- **Martenzit** – podchlazený přesycený roztok uhlíku v železe. Při extrémně rychlém ochlazování austenitu není umožněna difúze přebytečného uhlíku, proto vzniká martenzitická



struktura, která má stejné složení, a tím pádem stejný obsah uhlíku, jako původní austenit. Tato struktura dosahuje vysoké tvrdosti, zároveň je křehká [9]. Je to metastabilní fáze oceli, při ohřevu uvolňuje přebytečný uhlík a mění se na sorbit.

- **Sorbit** – vzniká opětovným ohřevem bainitu a martenzitu, které uvolňují přebytečný uhlík v podobě přechodových karbidů ( $\text{Fe}_2\text{C}$  – karbid  $\epsilon$ ). Při teplotách těsně pod  $A_1$  se karbidy shlukují a vzniká globulární perlit.



obr. 4: Binární rovnovážný diagram soustavy železo-uhlík [10]

## 3.2 Krystalizace oceli

### 3.2.1 Struktury vznikající při ochlazování

Ochlazením pod teplotu  $A_3$  se v oceli vytváří aktivní zárodky feritu schopné dalšího růstu. Po ochlazení pod teplotu  $A_1$  dochází k přeměně austenitu na perlit. Přebytečný uhlík je z feritu vytlačován ve formě destiček cementitu a postupně vzniká lamelární perlit – směs tvořená destičkami feritu a cementitu. Perlitická přeměna probíhá zpočátku pomalu. Většina přeměny proběhne v relativně krátkém časovém úseku se „zpožděním“ závislém na teplotě. Zbytkový austenit se přeměňuje opět pomalu [11].

Dalším ochlazením začne docházet k bainitické přeměně austenitu. Ta probíhá intenzivně již od počátku, ke konci postupně zpomaluje. Přebytný uhlík se vylučuje ve formě jemných karbidů. Bainit vytváří zrna jehlicovité struktury.

Pokud je ocel ochlazená příliš rychle, je zamezeno dostatečné difúzi uhlíku v materiálu. Austenit se téměř okamžitě přemění na martenzit. Přebytný uhlík zůstává rozpuštěn ve vzniklém martenzitu. Vzniká tak přesycený roztok uhlíku v železe a dochází k deformaci krystalické mřížky železa. Pnutím způsobeným objemovými změnami při ochlazování vznikají drobné jehlice martenzitu s četnými dislokacemi v krystalické mřížce. Kolem dislokací se difúzně hromadí uhlík.

### 3.2.2 Struktury vznikající při ohřevu

Termodynamické rovnováhy v ochlazené oceli lze dosáhnout jen v případě, že je austenitizovaná ocel ochlazována velmi pomalu. Stabilní fází oceli je sorbit. V praxi je ocel zpravidla ochlazována příliš rychle na to, aby se struktura materiálu zformovala do plně rovnovážné soustavy. Při rychlejším ochlazování vznikají metastabilní fáze oceli, které se při opětovném ohřevu mění na stabilnější fáze ještě před ohřevem na teplotu austenitizace  $A_1$  [11].

Již při teplotě cca  $100\text{ }^\circ\text{C}$  se z martenzitu uvolňuje uhlík v podobě přechodových karbidů ( $\text{Fe}_2\text{C}$  – karbid  $\epsilon$ ). Se zvyšováním teploty se tyto karbidy mění na cementit a vzniká jemně zrnitá struktura – sorbit. Do této podoby se rovněž mění bainit. Při dalším ohřátí a setrvání těsně pod teplotou  $A_1$  pokračuje růst karbidů a zaniká jejich orientace podle jehlic martenzitu. Cementit utváří zrna přibližně kulového tvaru rozptýlené ve feritu, vzniká globulární perlit.

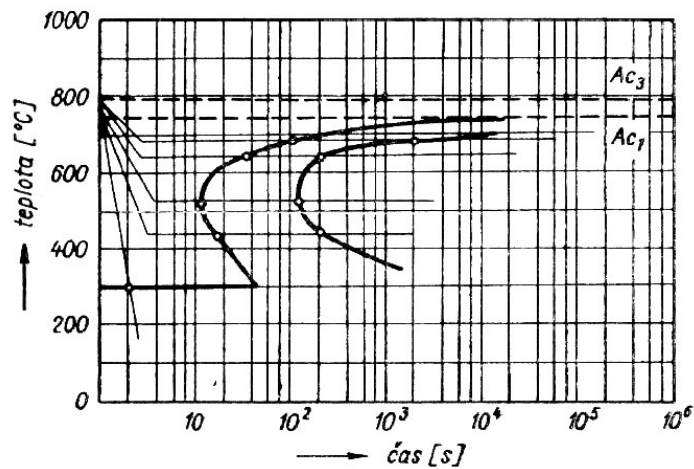
Lamelární perlit je při nízkých teplotách metastabilní, zpočátku tedy při zahřívání nedochází ke strukturálním změnám v perlitu. Teprve při teplotách blízkých  $A_1$  se začíná cementit obsažený v perlitu shlukovat a rovněž se mění v globulární perlit.

Při zahřívání nad teplotu  $A_1$  dochází k opětovné austenitizaci a se vzrůstající teplotou k homogenizaci oceli. Celý proces ochlazování a krystalizace tak může probíhat od začátku, jak bylo popsáno v předchozí podkapitole.

### 3.2.3 Znázornění krystalizace oceli

Rozpad austenitu lze sledovat dvěma způsoby. Prvním z nich je **izotermický rozpad austenitu** (IRA). Při tomto způsobu je vzorek oceli prudce ochlazen z  $A_3$  na určitou teplotu, která je následně udržována po dlouhou dobu. Při této teplotě je sledováno, po jaké době nastává začátek

a konec rozpadu. Poté se vzorek ochladí na pokojovou teplotu. Z časů začátku a konce rozpadu při jednotlivých teplotách lze sestavit křivky zobrazené na obr. 5.

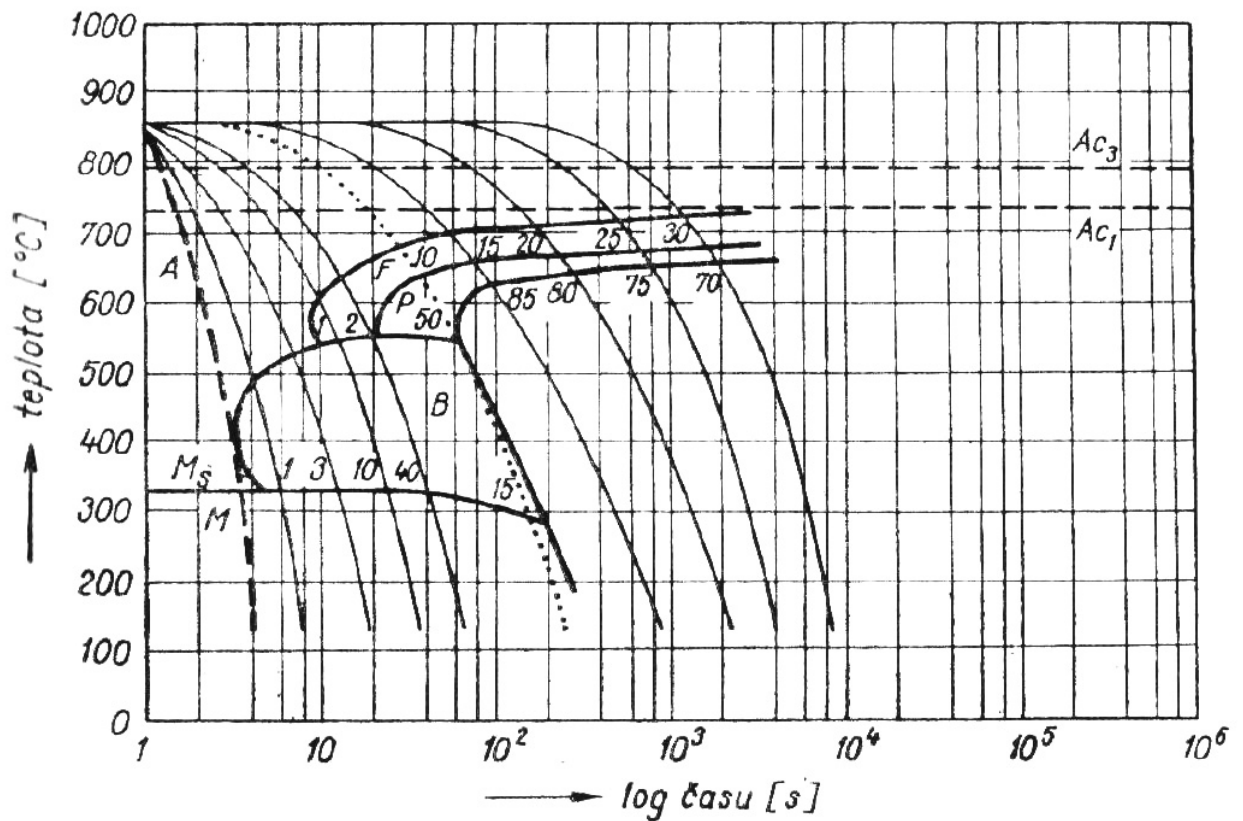


obr. 5: Ukázka diagramu IRA (převzato z [11])

Bod na křivce, kdy začíná a končí rozpad za nejkratší dobu (teplota cca 500 °C) se nazývá *nos* [9]. Část křivky nad nosem se obvykle označuje jako *Ps* (pearlite start), resp. *Pf* (pearlite finish), část pod nosem se označuje jako *Bs* (bainite start) a *Bf* (bainite finish).

Druhým způsobem je anizotermický rozpad austenitu (ARA). V tomto případě je vzorek oceli nepřetržitě ochlazován danou rychlostí z teploty nad  $A_3$  až na pokojovou teplotu. V průběhu ochlazování tak dochází zpravidla ke vzniku několika odlišných struktur v různém poměru. Příklad diagramu ARA je uveden na obr. 6. Diagram je rozdělen na několik oblastí – A (austenit); F (ferit), P (perlit); M (martenzit). V diagramu jsou znázorněny různé rychlosti ochlazování. Číslo u jednotlivých křivek ochlazování značí, jaká část původního austenitu se přemění v danou strukturu. Při dosažení křivky *Ms* (martensite start) se zbývající austenit přemění na martenzit.

Zvláštní význam mají křivky vyznačené čárkovaně a tečkovaně. *Horní kritická rychlost ochlazování* (čárkovaně) je taková rychlost, při které dojde k „doteku“ s oblastí vzniku bainitu. Pokud je ocel ochlazována rychleji, dojde ke kompletní přeměně austenitu na martenzit. Při pomalejším ochlazení je již část austenitu přeměněna na bainit. Druhou křivkou je *dolní kritická rychlost ochlazování* (tečkovaně). Při této rychlosti je naprostá většina austenitu přeměněna na jiné struktury (ferit, perlit, bainit), stále je možnost vzniku malého množství martenzitu. Při pomalejším ochlazování již nedochází ke vzniku martenzitu.



obr. 6: Ukázka diagramu ARA (převzato z [11])

### 3.3 Tepelné zpracování ocelí

Vhodným tepelným zpracováním lze dosáhnout různých vlastností oceli při zachování chemického složení materiálu. Obecně závisí strukturální složení oceli zejména na rychlosti a průběhu ochlazování austenitizované oceli, resp. změnách teploty tepelně zpracovávané oceli.

#### 3.3.1 Kalení

Kalení je jedním ze způsobů tepelného zpracování oceli. Při tomto procesu je výrobek zahřátý na tzv. kalicí teplotu. Poté je výrobek prudce ochlazen, obvykle buď proudem vzduchu nebo ve vodní či olejové lázni. Cílem metody je dosáhnout větší než dolní kritické rychlosti ochlazování a dosáhnout tak vytvoření martenzitické struktury oceli, tzv. zakalení.

Z hlediska této metody tepelného zpracování se rozlišují dvě hlavní vlastnosti oceli. První z nich je *kalitelnost*. Tato vlastnost označuje alespoň teoretickou schopnost oceli vytvořit strukturu s alespoň 50 % martenzitu. Jako kalitelné se obvykle považují oceli s obsahem uhlíku nad 0,2 %. Oceli s více než 0,35 % uhlíku jsou dobře kalitelné.

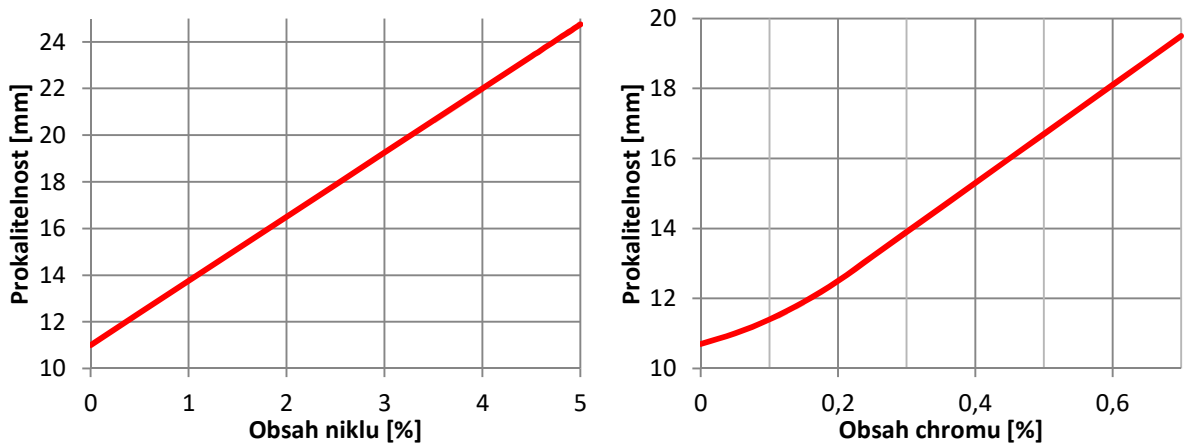
Ve skutečnosti nelze, zvláště u výrobků větších rozměrů, dosáhnout zakalení v celém objemu. Kritické rychlosti ochlazování je zpravidla dosaženo na povrchu výrobku a v jeho okolí. Schopnost dosáhnout zakalené struktury v určité hloubce pod povrchem oceli se nazývá *prokalitelnost*.

Kalením oceli je dosaženo vysoké tvrdosti oceli, například na břitech ocelových nástrojů. Široké využití má kalení ve strojírenství, kde je často žádoucí dosáhnout vysoké tvrdosti ocelových součástek, jako jsou například hřídele nebo ozubená kola [12]. Zakalená ocel zároveň ztrácí svou houževnatost a stává se křehkou, což je ve stavebních konstrukcích naopak nežádoucí vlastnost. V křehké stavební konstrukci může snadno dojít k porušení a následnému kolapsu bez předchozích varovných příznaků (praskliny, průhyb), užívání takové stavby proto není bezpečné.

### 3.3.2 Vliv legujících prvků na prokalitelnost

Na změny struktury při tepelném zpracování mohou mít vliv různé legující prvky. Vlastnosti související se vznikem martenzitu nejvíce ovlivňují následující prvky [13]:

- **Mangan** – se zvyšujícím se obsahem chromu se zpomaluje transformace austenitu v perlitické i bainitické oblasti. Křivky diagramu ARA a IRA se posouvají doprava, tím se zvyšuje prokalitelnost.
- **Chrom** – křivky počátku transformace austenitu v diagramech ARA a IRA se posouvají doprava. Prokalitelnost zvyšuje pouze chrom rozpuštěný v austenitu, proto je zvýšení prokalitelnosti podmíněno rozpuštěním karbidů chromu při austenitizaci oceli. Například při obsahu 0,3 % uhlíku a 5 % chromu se karbidy chromu zcela rozpouští při teplotě kolem 900 °C, s klesajícím obsahem uhlíku se tato teplota snižuje. Nerozpuštěné karbidy naopak působí jako krystalizační zárodky a prokalitelnost snižují. Prokalitelnost oceli s chemickým složením 0,2 % C, 0,3 % Mn a žádném obsahu chromu je prokalitelný průměr 10 mm. Při obsahu chromu 0,3 % se prokalitelný průměr zvyšuje na 14 mm, při obsahu 0,6 % Cr je prokalitelnost 18 mm.
- **Nikl** – prokalitelnost zvyšuje podstatně méně než mangan nebo chrom (obr. 7).



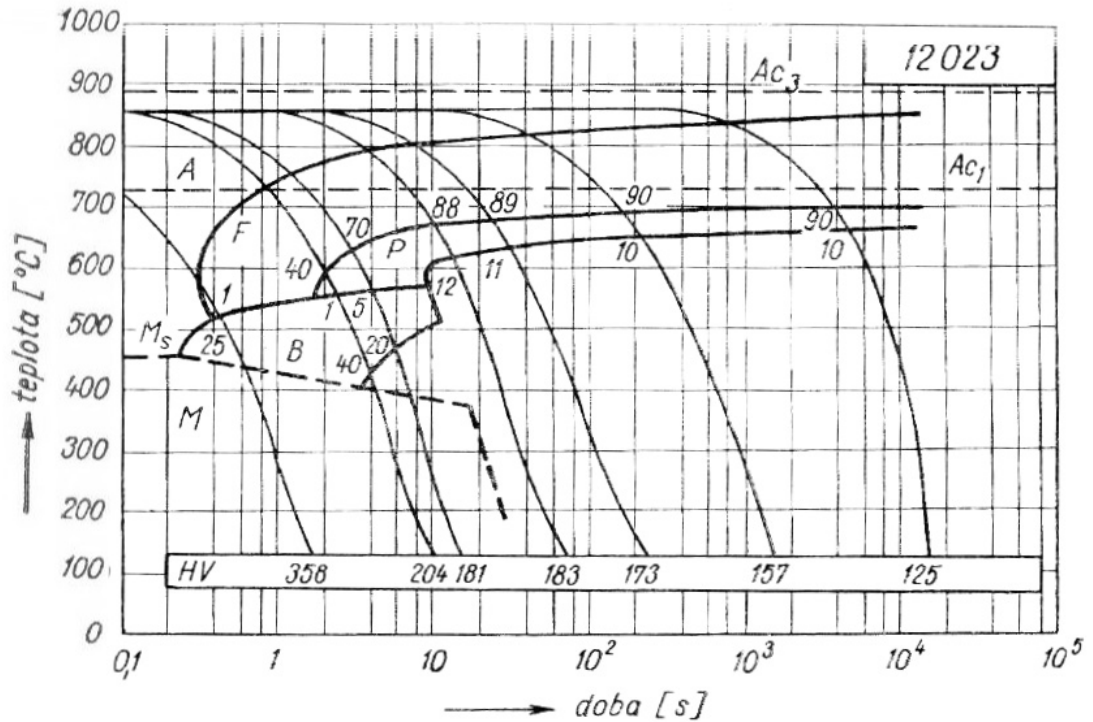
obr. 7: Vliv niklu a chromu na prokalitelnost oceli složení 0,2% C; 0,3% Mn (převzato z [13])

- **Molybden** – křivky *Ps* a *Fs* v diagramech ARA a IRA posouvá směrem doprava (oddaluje začátek vzniku feritu a perlitu), bainitická oblast zůstává vysunuta doleva. Zároveň posouvá perlitickou oblast k vyšším teplotám a bainitickou oblast k nižším teplotám. Tím vzniká pásmo teplot, ve kterém může austenit zůstat stabilní po delší dobu.
- **Wolfram** – prokalitelnost zvyšuje pouze wolfram rozpuštěný v austenitu, proto jeho vliv na prokalitelnost závisí na teplotě austenitizace
- **Bor** – oddaluje začátek austenitické transformace, prokalitelnost zvyšuje výrazně více, než jiné prvky. Přísada 0,003 % boru zvyšuje prokalitelnost při obsahu uhlíku 0,2 % stejně, jako 0,3 % molybdenu, 0,4 % chromu, 0,8 % manganu nebo 2,4 % niklu. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku se vliv boru v porovnání s těmito prvky snižuje.

Obsah prvků, které mají vliv na prokalitelnost je, podle současných evropských norem pro konstrukční oceli ([7], [8]) omezen zejména uhlíkovým ekvivalentem CEV; viz kap. 3.

### 3.3.3 Kalitelnost stavebních ocelí

Kalitelné jsou oceli s obsahem uhlíku nad 0,2 %. Konstrukční oceli používané v současnosti mohou obsahovat až 0,24 % uhlíku, proto nelze zakalení zcela vyloučit. Pro konstrukční oceli nejsou dobře zdokumentované diagramy ARA, proto bude vycházeno z diagramu oceli 12 023, jakožto zástupce nízkouhlíkových ocelí (obr. 8).



obr. 8: Diagramu ARA oceli 12 023 (převzato z [11])

Ke vzniku martenzitické struktury v této oceli dochází při prudkém ochlazení z 850 °C na cca 450 °C do 2 s. Ke vzniku alespoň malého množství martenzitu dochází při ochlazení na cca 400 °C do 4 s. Takové rychlosti ochlazení lze za běžných podmínek dosáhnout jen obtížně, v případě masivnějších prvků s tloušťkou větší, než jednotky milimetrů, je takové ochlazení prakticky nemožné při použití vody jako hasiva.

V následujících kapitolách bude experimentálně ověřeno, jakým způsobem je ve skutečnosti ovlivňována struktura konstrukčních ocelí při prudkém ochlazení a jak rychle mohou být ocelové konstrukce ochlazeny.

## 4 Cíle práce

Cílem diplomové práce je ověřit, jakým způsobem jsou ovlivněny vlastnosti a struktura materiálu stavebních ocelí v případě, kdy jsou během požáru zahřáty na vysoké teploty a následně prudce ochlazeny vodním proudem při požárním zásahu. Pozornost bude věnována zejména možnosti vzniku martenzitu, vlivem kterého se stavební konstrukce mohou stát křehkými. Za tímto účelem bylo provedeno několik experimentů, které jsou popsány v následujících kapitolách:

- 4) **Metalografický rozbor stavebních ocelí** – vzorky několika tříd stavebních ocelí byly tepelně zpracovány způsobem odpovídajícím kalení oceli. Tyto vzorky byly následně podrobeny metalografickému rozboru.
- 5) **Zkouška vrubové houževnatosti** – ze stejných ocelí, jako při prvním experimentu, byly připraveny vzorky pro provedení zkoušky vrubové houževnatosti. Na základě zkoušky Charpyho kladivem bude vyhodnoceno, zda dochází ke změně houževnatosti po tepelném zpracování těchto ocelí.
- 6) **Ochlazování vodním proudem** – byla provedena série zkoušek ochlazování pomocí vodního proudu, který je používán při reálném požárním zásahu. Budou srovnány rychlosti ochlazování oceli za různých podmínek (vodní lázeň, vodní proud, ochlazování vzduchem).

Na základě výsledků se připraví postup pro analytický odhad doby ochlazování některých typických ocelových stavebních konstrukcí. Bude vytvořen numerický model ochlazování pro simulaci nerovnoměrného rozložení teplot.



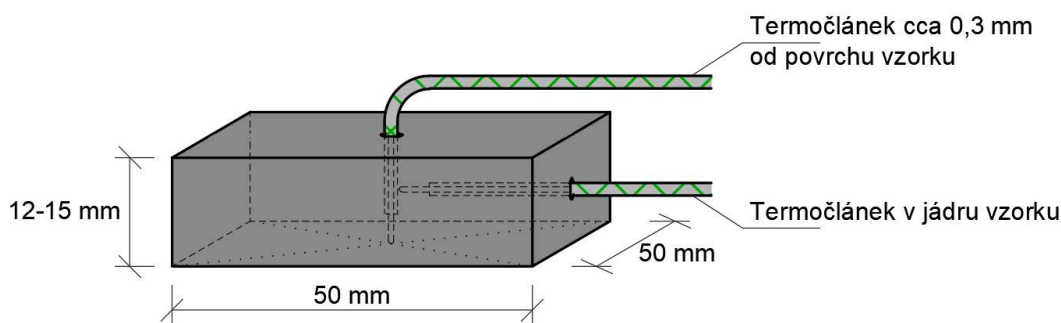
## 5 Stavební oceli po ochlazení

Experimentem se ověří, jakým způsobem se může změnit struktura a vlastnosti materiálu stavebních ocelí. Během experimentu se vzorky tepelně zpracovaly způsobem, který má napodobit způsob tepelného namáhání během požáru a následné prudké ochlazení vodním proudem.

Pro experiment se zvolily 3 třídy oceli, přičemž od každé byly vytvořeny 3 vzorky, z nichž 2 prošly tepelným zpracováním, třetí slouží jako referenční pro porovnání změn ve struktuře oproti původnímu stavu. Pro experiment byly zvoleny tyto oceli:

- Běžná konstrukční ocel **S355J2**
- Vysokopevnostní ocel **S700**
- Ocel **F36** z roku 1925

Každý vzorek je výřezem z pásoviny, o rozměrech 50x50 mm a tloušťkou 12 nebo 15 mm. Do těchto vzorků byly navrtané otvory pro vložení 2 termočlánků zaznamenávajících průběh teplot uprostřed a na povrchu vzorku. První termočlánek byl zaveden z boční strany vzorku poblíž geometrického středu vzorku. Druhý termočlánek byl zaveden tak, aby jeho konec byl cca 0,3 mm od povrchu vzorku.



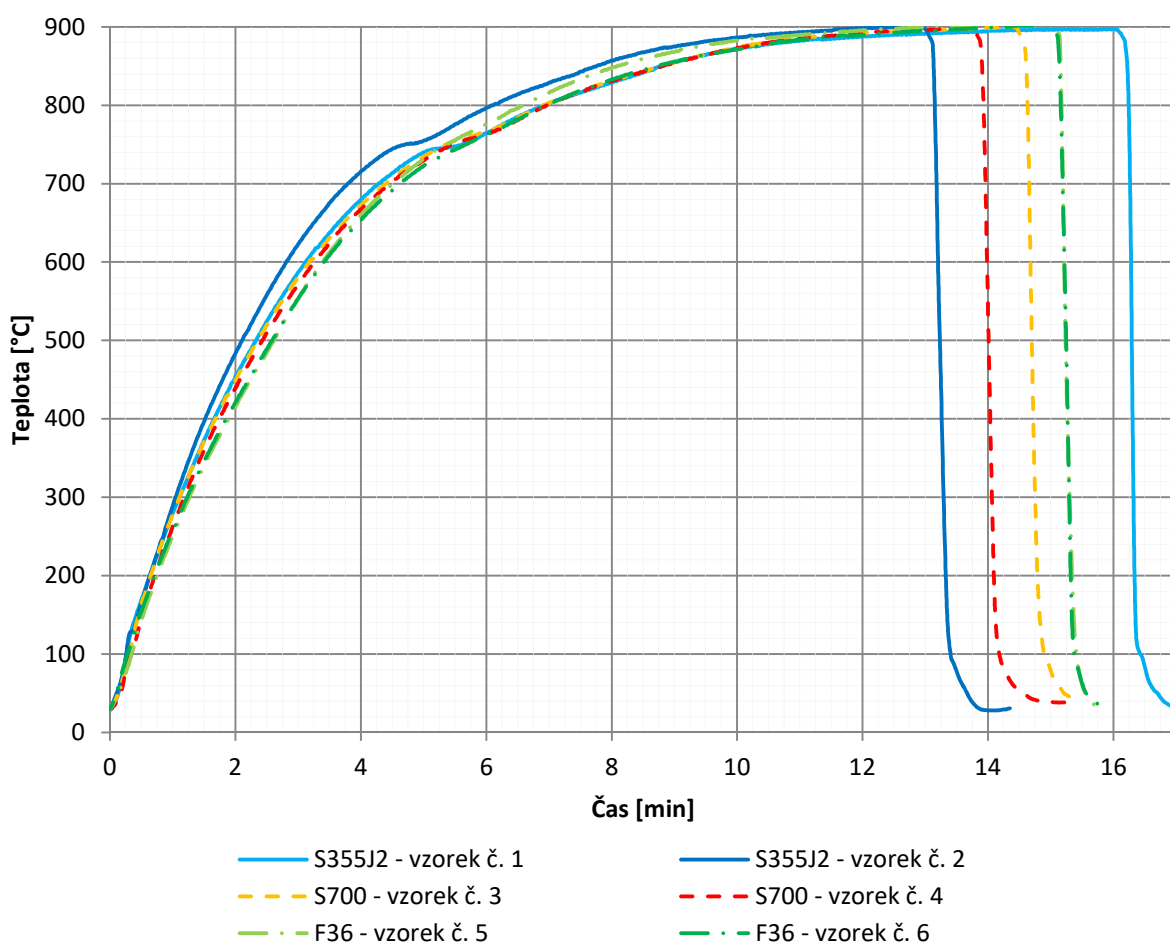
obr. 9: Rozměry vzorků a znázornění polohy termočlánků

Pro potřeby rozlišení byly jednotlivé vzorky označeny čísly podle tab. 3.

tab. 3: Číslování vzorků oceli podrobených experimentu

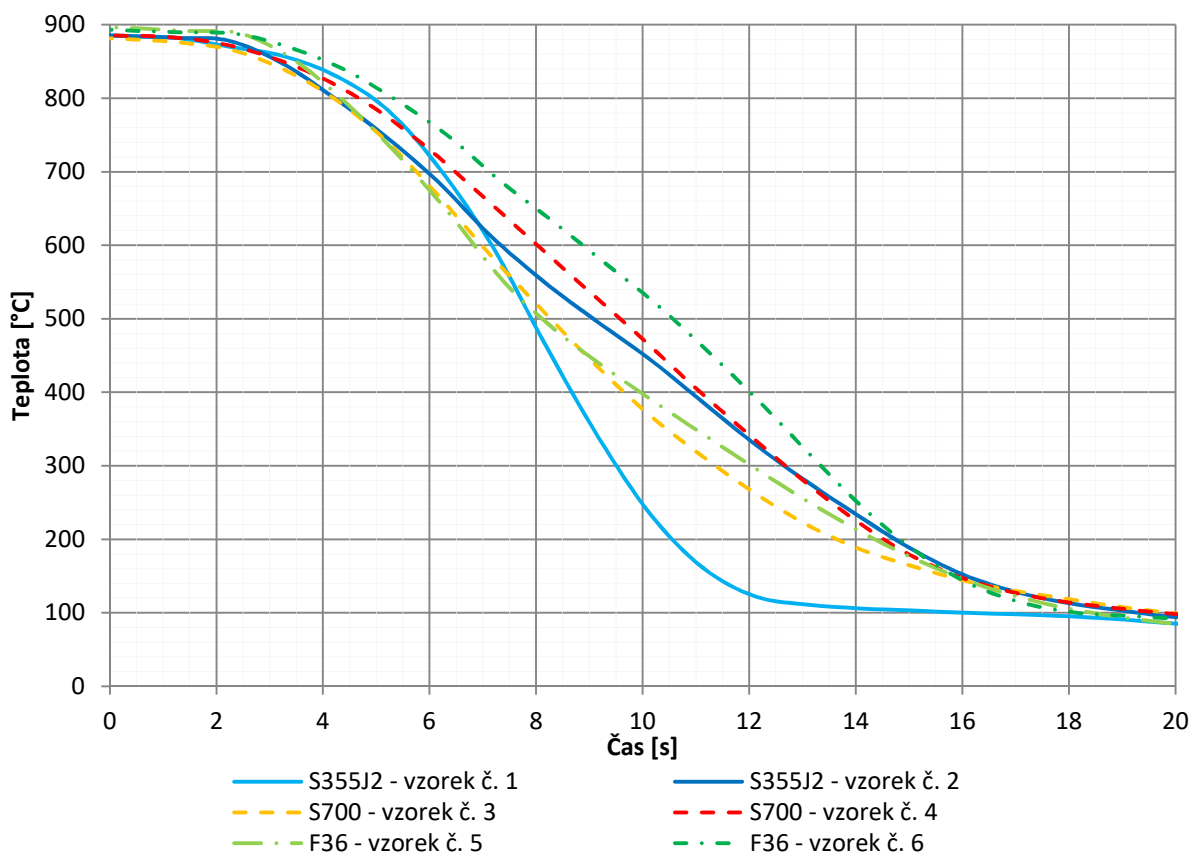
Třída oceli	Zahřívání vzorky		Referenční vzorek	Tloušťka vzorků
	1. vzorek	2. vzorek		
<b>S355J2</b>	č. 1	č. 2	č. 7	12 mm
<b>S700</b>	č. 3	č. 4	č. 8	15 mm
<b>F36:1925</b>	č. 5	č. 6	č. 9	15 mm

Tato práce se zabývá riziky spojenými se vznikem martenzitu při rychlém ochlazení stavebních ocelí. Pro vznik martenzitu je třeba, aby byla ocel nejprve austenitizována, v opačném případě vznikají pouze stabilnější struktury oceli, jako sorbit a globulární perlit. Jednotlivé vzorky proto byly vkládány do laboratorní pece předehřáté na 900 °C.



obr. 10: Teplota vzorků během ohřevu

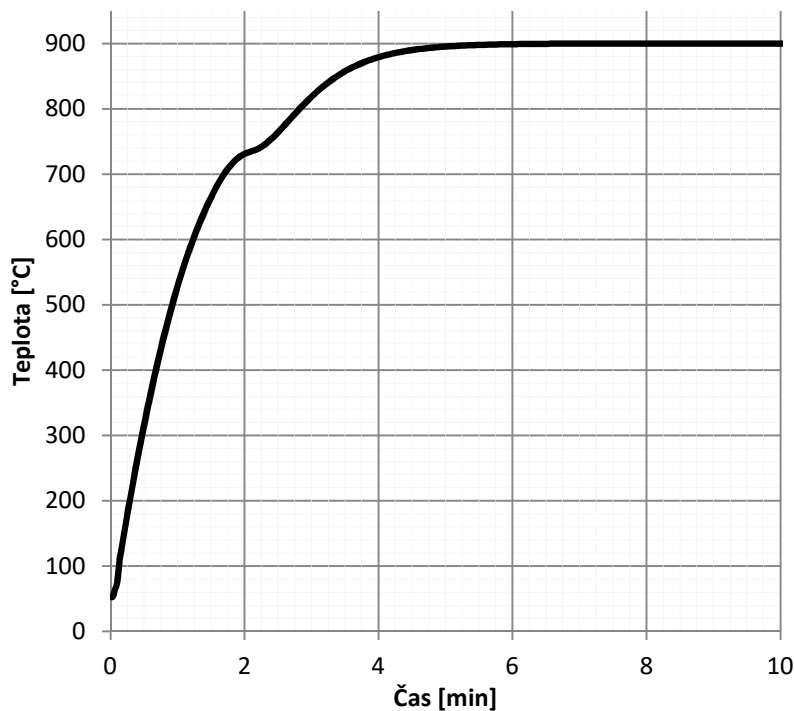
Mírně rychlejší nárůst teploty v případě vzorků oceli S355J2 lze vysvětlit menší tloušťkou vzorků, a tím i menší tepelnou setrvačností. Po vyrovnání teplot byly vzorky z pece vyjmuty a vloženy do vodní lázně (teplota cca 25-40 °C) a prudce ochlazeny.



obr. 11: Průběh teplot 0,3 mm od povrchu vzorků během ochlazování

Průběh teplot při ochlazování jednotlivých vzorků je srovnatelný. Výjimkou je pouze vzorek č. 1, u kterého byl zaznamenán rychlejší pokles teploty. Ten je způsoben odlišným způsobem ochlazování. Vzorek č. 1 byl z pece do vodní lázně přesunut pomocí kovářských kleští, značná část tepla tak mohla být odvedena do kovového materiálu kleští. Další vzorky byly zavěšeny na háku, čímž se omezily ztráty tepla vedením.

Ze stejných tříd oceli se připravily další vzorky sloužící pro srovnání houževnatosti oceli. Od každé třídy byly připraveny 3 kusy vzorků s rozměry 50x10x10 mm s U-vrubem pro zkoušení podle [14]. Tyto vzorky byly rozdělené do 3 skupin, přičemž v každé skupině byl jeden vzorek od každé třídy oceli. První skupina sloužila jako referenční pro zjištění původní houževnatosti. Další dvě skupiny byly vloženy do pece zahřáté na teplotu 900 °C. Na základě numerického modelu bylo odhadnuto, že vyrovnání teploty vzorků s teplotou v peci bylo dosaženo přibližně po 6 min. (obr. 12) Druhá skupina vzorků byla po 8 min z pece vyjmuta (2 min po zahřátí na cílovou teplotu) a vzorky byly ochlazeny ve vodní lázni. Totéž bylo po 16 min, 10 min po zahřátí, provedeno s třetí skupinou vzorků. U všech vzorků ze vyzkoušela vrubová houževnatost pomocí Charpyho kladiva při teplotě vzorků i okolního prostředí 20 °C. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tab. 4.



obr. 12: Průběh teplot vzorků pro zkoušku houževnatosti během ohřevu (dle numerického modelu)

Pro každý z případů podle tab. 4 bylo provedeno pouze jedno měření. Pro vyloučení statistické chyby by bylo vhodné provést více měření, zkouška houževnatosti ale nebyla hlavním cílem práce a pro výrobu vzorků ke zkoušce již nebyl v době měření dostatek materiálu, používal se materiál zbylý z předchozího experimentu.

tab. 4: Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti

Třída oceli	Vrbová houževnatost [J]		
	Bez tepelného zpracování	Doba zahřívání v peci	
		8 min	16 min
<i>S355J2</i>	118	42	57
<i>S700</i>	143	126	100
<i>F36</i>	60	100	109

## 5.1 Chemický a metalografický rozbor vzorků

Pro ověření změn ve struktuře materiálu se u každého ze vzorků provedl metalografický rozbor. Posoudily se změny ve struktuře ocelí po tepelném zpracování, oproti struktuře oceli, která tepelným zpracováním neprošla. Jako referenční vzorky sloužily vzorky č. 7-9.

Jednotlivé dvojice vzorků oceli po tepelném zpracování (vzorky č. 1-6) byly se mezi sebou nejprve vizuálně srovnaly pro vyloučení statistické odchylky. Na základě této vizuální kontroly

lze usoudit, že u žádné ze tříd oceli nedošlo ke vzniku dvou různých struktur materiálu a v rámci jednotlivých dvojic vzorků došlo ke vzniku srovnatelných struktur. Z toho důvodu se metalografický rozbor provedl z každé třídy oceli jen u jednoho vzorku po tepelném zpracování.

### 5.1.1 Běžná konstrukční ocel S355J2

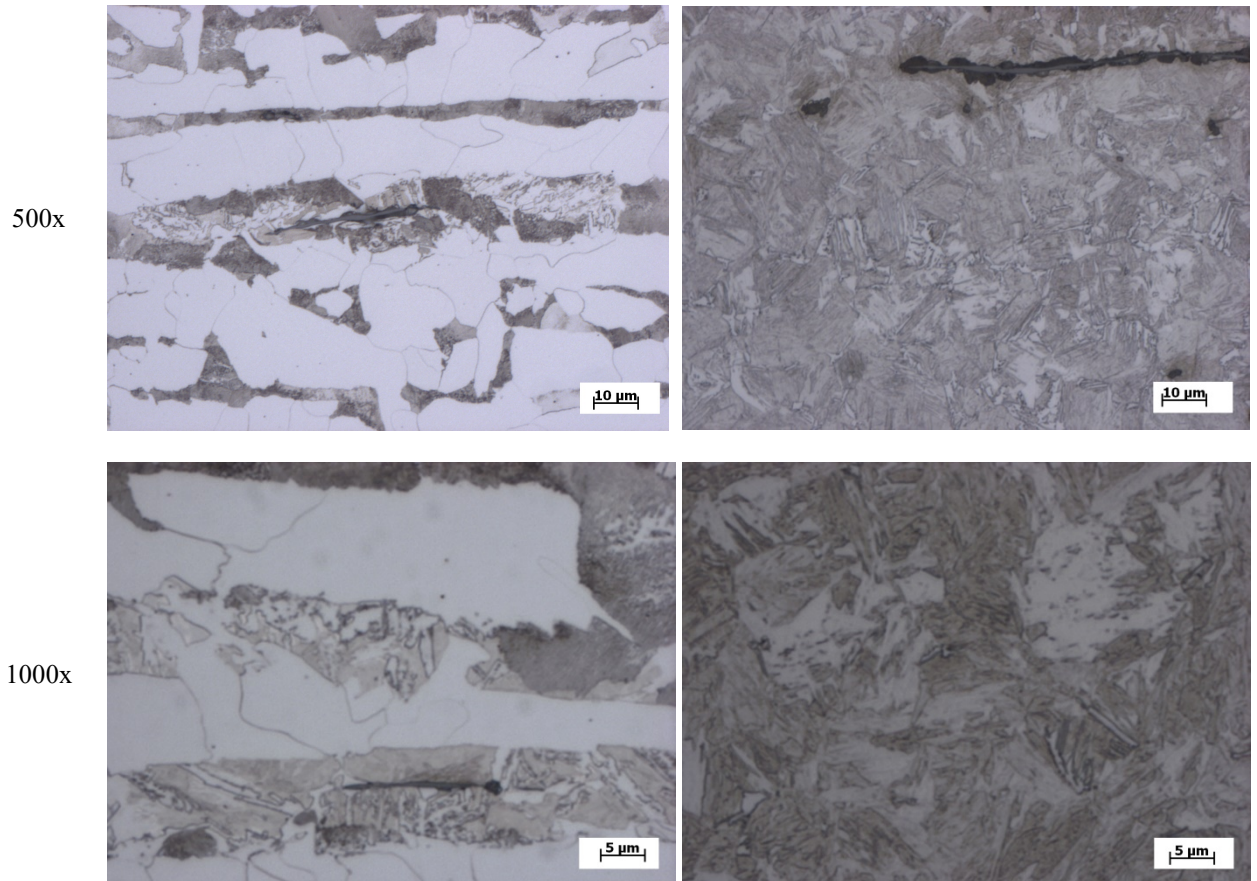
Vzorek oceli třídy S355J2 měl podle chemického rozboru materiálu obsah uhlíku 0,173 % s uhlíkovým ekvivalentem CEV 0,428 %. Za kalitelné se považují oceli s obsahem uhlíku nad 0,2 %. Vzorek oceli S355 by proto neměl být kalitelný, není ale vyloučen vznik určitého množství martenzitu. Z prvků zvyšujících prokalitelnost je přítomný zejména mangan.

tab. 5: Chemické složení oceli S355J2

	Obsah prvku [%]									
	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Cu	Al	CEV
<i>Skutečnost podle rozboru tavby</i>	0,180	0,350	1,510	0,012	0,003	0,005	0,020	0,040	0,036	0,438
<i>Skutečnost podle rozboru vzorku</i>	0,173	0,364	1,497	0,010	<0,150	-	0,013	0,038	0,037	0,428
<i>Maximum podle [7]</i>	0,230	0,600	1,700	0,035	0,035	-	-	0,600	-	0,450

Původní materiál konstrukční oceli třídy S355J2 měl feriticko-perlitickou strukturu s intermetalickými vměstky deformovanými tvářecím procesem. Původní velikostí zrn feritu byla přibližně 10-20  $\mu\text{m}$ . Po tepelném zpracování se struktura přeměnila na feriticko-bainitickou s obsahem martenzitu. Největší velikost zrn se snížila na 10  $\mu\text{m}$ . Po tepelném zpracování se v materiálu zvýšil podíl bainitu na úkor feritu. Bainit vykazuje oproti feritu vyšší pevnost, zároveň je ale křehčí, lze tedy předpokládat zhoršenou houževnatost. Zároveň bainit vykazuje zvýšenou pevnost, nemělo by tedy dojít ke snížení pevnosti.

Při zkoušce vrubové houževnatosti se zjistil výrazný pokles spotřebované energie. Rázová energie potřebná na přelomení původního materiálu byla 118 J, po tepelném zpracování se tato energie snížila na 42 až 57 J (pokles o 50 až 65 %). Vzhledem k teplotě, při které byla zkouška prováděna, nelze určit, zda by ocel nadále splňovala jakostní stupeň J2, který se stanovuje při teplotě  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Obě změřené hodnoty vyhovují požadavku pro jakostní stupně JR (min. energie 27 J) a KR (min. 40 J).



obr. 13: Metalografické snímky oceli S355J2 zvětšené 500x a 1000x před tepelným zpracováním (vlevo) a po tepelném zpracování (vpravo)

### 5.1.2 Vysokopevnostní ocel S700

Vzorek oceli třídy S700 měl podle chemického rozboru materiálu obsah uhlíku 0,144 % s uhlíkovým ekvivalentem 0,436 %. Podle obsahu uhlíku se nejedná o kalitelnou ocel. Z prvků zvyšujících prokalitelnost je přítomný zejména molybden a chrom.

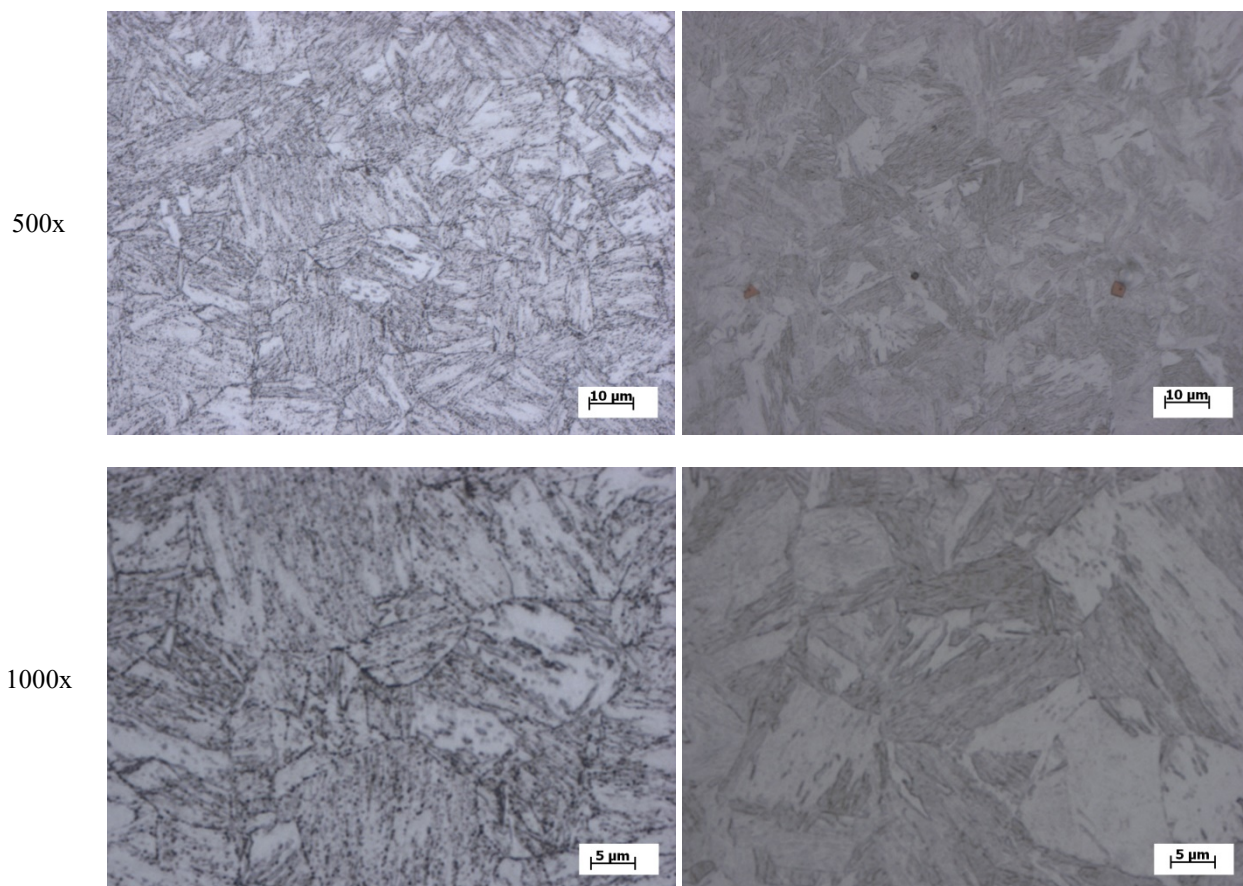
tab. 6: Chemické složení oceli S700

	Obsah prvku [%]								
	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Ni	CEV
<b>Skutečnost podle rozboru vzorku</b>	0,144	0,312	1,164	0,006	<0,150	0,164	0,307	0,057	0,436
<b>Maximum podle [8]</b>	0,120	0,600	2,100	0,025	0,015	0,500	-	-	-

Původní materiál oceli třídy S700 měl bainitickou strukturu. Ve struktuře jsou přítomny karbonitridy titanu. Přítomnost molybdenu oddaluje v diagramech ARA a IRA oblast vzniku perlitu a feritu doprava. Bainit mohl vznikat během výrobního procesu i při pomalejším ochlazení a umožnil se vznik velkého množství hrubých zrn karbidů železa na okrajích jehlic



bainitu. Po tepelném zpracování oceli byly tyto karbidy rozpuštěné. Rozpuštění zrn karbidů byla jediná výraznější změna struktury oceli.



obr. 14: Metalografické snímky oceli S700 zvětšené 500x a 1000x před tepelným zpracováním (vlevo) a po tepelném zpracování (vpravo)

Rázová energie při zkoušce Charpyho kladivem se i v případě oceli S700 po tepelném zpracování snížila. Původní ocel se přelomila rázovou energií 143 J, po tepelném zpracování 100 až 126 J (pokles o 12 až 30 %).

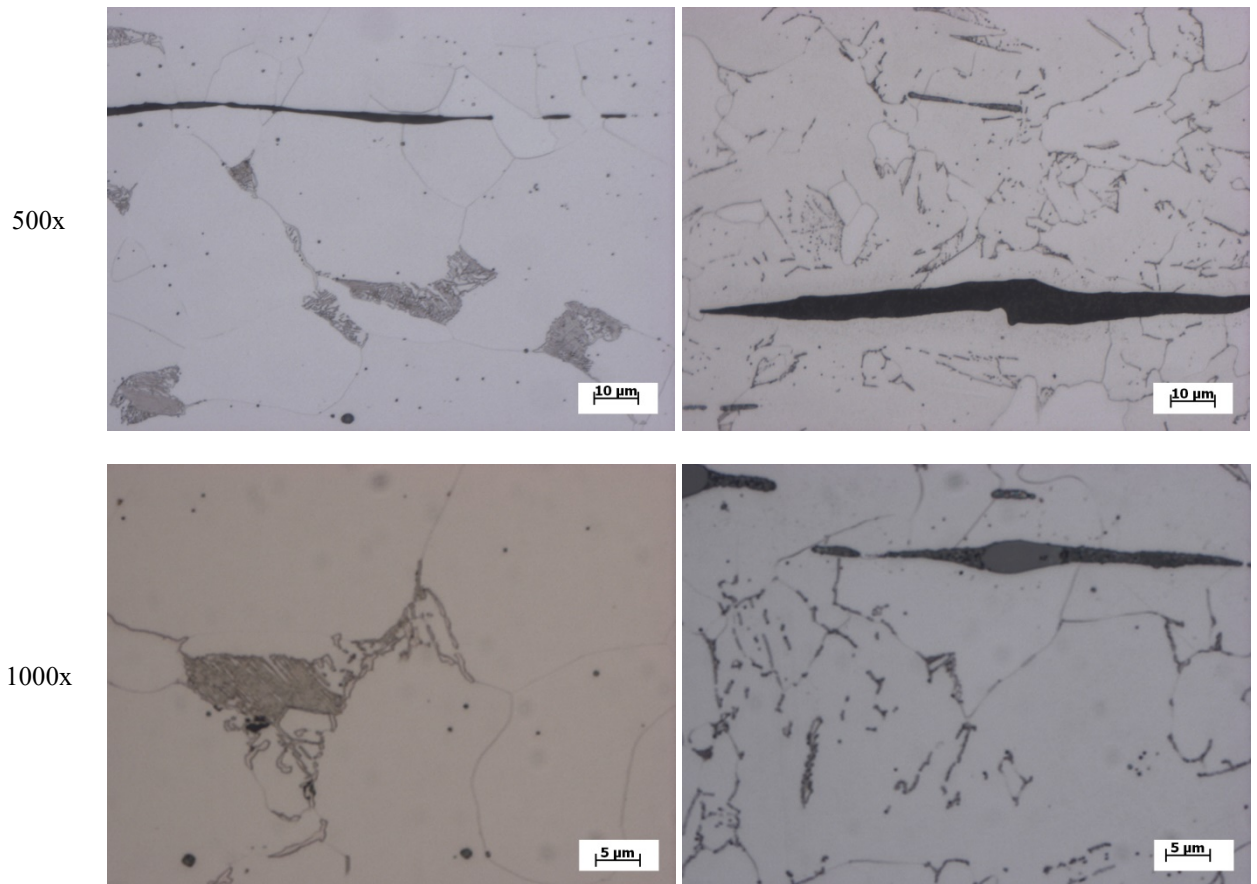
### 5.1.3 Ocel F36

tab. 7: Chemické složení svářkové oceli F36

	Obsah prvku [%]								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	CEV
<b>Skutečnost podle rozboru vzorku</b>	0,063	<0,010	0,398	0,043	<0,150	0,115	0,017	0,026	0,142

Svářková ocel měla obsah uhlíku 0,063 %. Ocel lze považovat za nekalitelnou. V chemickém složení nebyly ve větším množství zastoupeny ani legovací prvky, které by v případě kalitelné oceli zlepšovaly prokalitelnost. Uhlíkový ekvivalent prvků v oceli byl 0,142%. Struktura oceli

byla feritická, velikost zrna 15-40  $\mu\text{m}$ , s malým obsahem perlitu a velkým množstvím intermetalické struskové fáze. Při daném množství uhlíku nelze přepokládat vznik výrazně odlišné struktury. Po tepelném zpracování byl perlit částečně rozpuštěn, zrna feritu byly jemnější (10-20  $\mu\text{m}$ ).



obr. 15: Metalografické snímky oceli F36 zvětšené 500x a 1000x před tepelným zpracováním (vlevo) a po tepelném zpracování (vpravo)

Při zkoušce vrubové houževnatosti byl na rozdíl od předchozích vzorků zaznamenán nárůst rázové energie pro přelomení zkušební vzorku. Původní ocel se přelomila rázovou energií 60 J. Při tepelném zpracování se zvýšil podíl houževnatého feritu ve struktuře materiálu, rázová energie potřebná pro přelomení se zvýšila na 100 až 109 J (nárůst o 67 až 82 %).

## 5.2 Vyhodnocení

Během experimentů popsaných v této kapitole se ověřilo, jakým způsobem se mění struktura konstrukčních ocelí při ohřevu na vysoké teploty a prudkým ochlazením. Dále se ověřilo, jak tento způsob tepelného zpracování ovlivní houževnatost ocelí.



Jednotlivé zkoušené oceli se od sebe lišily složením i původní strukturou materiálu. Při tepelném zpracování se výrazně změnila pouze struktura konstrukční oceli třídy S355J2 s 0,18 % uhlíku a s obsahem manganu, kde se původní feriticko-perlitická struktura změnila na feriticko-bainitickou. V případě oceli s vyšší mezí kluzu třídy S700 se v bainitické struktuře vlivem tepelného zpracování rozpustily karbidy uhlíku. Svářková ocel s nízkým obsahem uhlíku měla feritickou strukturu s menším množstvím perlitu. Vlivem tepelného zpracování se perlit částečně rozpustil.

V žádné ze zkoušených ocelí nedošlo ke vzniku významného množství martenzitu. Vlivem nárůstu obsahu bainitu na úkor perlitu v oceli S355 se zhoršila houževnatost materiálu. K poklesu houževnatosti došlo rovněž u oceli S700 s bainitickou strukturou. Lepší houževnatosti se dosáhlo rozpuštěním perlitu a nárůstem podílu feritu ve struktuře svářkové oceli.

U ocelí se nezkoušela pevnost v tahu, na základě zjištěných změn lze odhadovat, jak mohla být pevnost ocelí ovlivněna. Bainitická struktura vykazuje vyšší pevnost. To dokládá bainitická struktura oceli s vyšší mezí kluzu. Při zvýšení podílu bainitu v oceli S355 se dá očekávat zvýšení pevnosti. U vysokopevnostní oceli se pevnost pravděpodobně nijak výrazně nezměnila.

tab. 8: Srovnání zkoušených ocelí a jejich změn po tepelném zpracování

<i><b>Třída oceli</b></i>	<i><b>Složení</b></i>	<i><b>Původní struktura</b></i>	<i><b>Změna struktury</b></i>	<i><b>Houževnatost po tepelném zpracování</b></i>	<i><b>Pevnost (předpoklad, neověřeno zkouškou)</b></i>
<b>S355J2</b>	0,18 % uhlíku obsah manganu	feriticko-perlitická	feriticko-bainitická malý obsah martenzitu	výrazně horší (stále vyhovující alespoň nižší jakostní stupeň)	zvýšení
<b>S700</b>	0,14 % uhlíku obsah molybdenu	bainitická s množstvím karbidů uhlíku	bainitická, rozpuštěné karbidy	horší	bez výraznější změny
<b>F36</b>	0,06 % uhlíku	feritická, malý obsah perlitu	feritická, perlit částečně rozpuštěn	zvýšená	?

## 6 Ochlazování vodním proudem

Pro účely vyhodnocení změn struktury materiálu oceli po prudkém ochlazení se vzorky ponořily do vodní lázně. Tento způsob ochlazení způsobí, při použití vody jako chladicí látky, nejrychlejší pokles teploty oceli a lze tedy předpokládat, že způsobí nejvýraznější změny struktury oproti původnímu materiálu.

Při reálném požárním zásahu je používán vodní proud. Ochlazení vodním proudem způsobí pomalejší pokles teploty oceli, a z hlediska rizika nečekaných změn vlastností oceli a stability konstrukce představuje menší nebezpečí. Pro porovnání rychlostí ochlazování oceli ve vodní lázni a vodními proudy bylo provedeno několik experimentů.

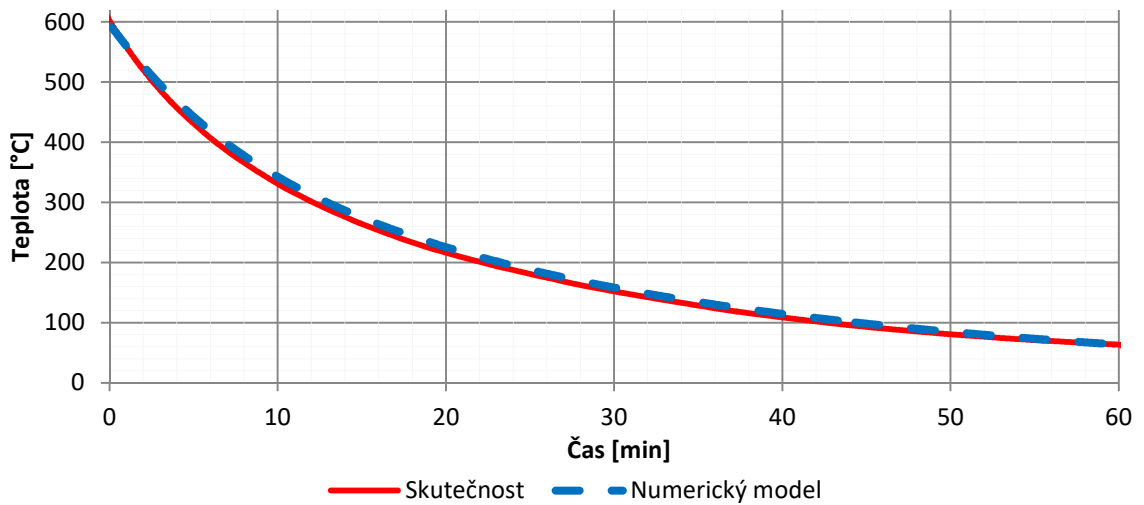
První experiment měl ověřit skutečnou rychlost poklesu teploty při použití vodních proudů. Pro tento účel, byl připraven vzorek ploché válcované oceli s tloušťkou 20 mm a rozměry stran 200x200 mm. Tyto rozměry byly zvoleny s předpokladem, že takovýto vzorek má dostatečně velkou tepelnou setrvačnost, aby byly vyloučeny náhodné odchylky okrajových podmínek (vítr, teplota vzduchu, roztržitost vodního proudu). Do vzorku byly umístěny dva termočlánky s obdobným umístěním, jako v případě ochlazování ve vodní lázni. Oba termočlánky byly umístěné poblíž geometrického středu vzorku. První termočlánek měřil teplotu uprostřed tloušťky vzorku, druhý byl umístěn 0,5 mm pod povrchem ochlazované strany vzorku. Vzorek byl přivařený ke konstrukci ze dvou čtyřhranných dutých profilů, které měly zajistit vzorek proti pohybu a překlopení. Tyto profily do určité míry mohou odvádět teplo a urychlovat chladnutí ve spodní části vzorku, předpokládá se ale, že tento jev má zanedbatelný vliv v porovnání s odvodem tepla vodním proudem, proto bude tato skutečnost zanedbána.

Před ochlazováním se vzorek z jedné strany zahříval plamenem směsi acetylenu a kyslíku. Z druhé strany byl během ohřevu vzorek zakrytý minerální vlnou, pro zamezení tepelných ztrát a urychlení ohřevu. Na konci ohřevu měl vzorek vždy teplotu cca 600-650 °C. Poté byl ponechán nejméně na 60 s v klidu, aby bylo dosaženo co největšího vyrovnání teplot ve vzorku. Následně se vzorek ochlazoval vodním proudem z proudnice *Tajfun Profi C* s možností vytvoření plného proudu nebo sprchového proudu s plynulým nastavením úhlu rozstříku. Proudnicí byla připojena pomocí tří kusů hadice C52 na cisternovou automobilovou stříkačku (CAS).

### 6.1 Kalibrace termočlánků

Vzorek byl před zkouškami s ochlazováním vodním proudem zahřátý na teplotu 600 °C a poté během jedné hodiny „přirozeně“ ochlazený okolním prostředím. Toto měření se provedlo

pro pozdější porovnání s ochlazováním vodou. (obr. 16) Teplota okolního vzduchu byla po celou dobu přibližně  $\theta_g = 8 \text{ }^\circ\text{C}$ .



obr. 16: Zaznamenaná teplota vzorku při ochlazování okolním prostředím (bez vlivu vodního proudu)

Na základě měření se zjistila odchylka v měření termočlánku umístěného v jádru vzorku, kde byla po celou dobu ochlazování zaznamenávána nižší teplota, než na povrchu vzorku. (obr. 17) Měřená plocha povrchu byla navíc vystavená mírnému větru, je tedy nepravděpodobně, že by povrch vzorku skutečně měl vyšší teplotu, než jádro vzorku. Naopak je předpoklad, že při nejvyšších teplotách vzorku bude teplota povrchu nižší, než uvnitř vzorku. Odchylka se potvrdila orientačním měřením pomocí infračerveného teploměru.

Z toho důvodu byl vytvořen numerický model vzorku, pomocí kterého se simulovalo skutečné ochlazování vzorku vzduchem. Numerický model je popsán v kapitole 8.

Podle výsledků numerického modelu by při teplotě vzorku kolem  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  měla být teplota povrchu o cca 4 K nižší. (obr. 18) Ve skutečnosti byla naměřená teplota o 12 K vyšší, rozdíl 16 K. Při teplotě vzorku kolem  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  by měla být teplota povrchu stejná, naměřená teplota byla o 4 K vyšší. Lze předpokládat, že měření termočlánku v jádru vzorku je přesné, u termočlánku na povrchu vzorku se zavede oprava odchylky.

Křivky, vyjadřující předpokládaný ( $\Delta\theta_{a,l2,c}$ ) a měřený ( $\Delta\theta_{a,l2,r}$ ) rozdíl teplot mezi povrchem a jádrem ocelového vzorku, byly stanoveny postupnou aproximací pomocí tabulkového procesoru Excel. Na základě těchto křivek lze stanovit výslednou předpokládanou odchylku měření termočlánku na povrchu vzorku oceli  $\theta_{tc1,dev}$  a zavést opravu měřené hodnoty tohoto termočlánku:

$$\theta_{a,1} = \theta_{a,1,r}; \quad \theta_{a,2} = \theta_{a,2,r} + \Delta\theta_{TCL,dev} \quad (16); (17)$$

$$\Delta\theta_{TCL,dev} = \Delta\theta_{a,12,r} - \Delta\theta_{a,12,c} \quad (18)$$

- pro  $\theta_{a,2,r} < 43,2 \text{ } ^\circ\text{C}$  :

$$\Delta\theta_{a,12,r} \approx \Delta\theta_{a,12,c} \approx 0 \rightarrow \Delta\theta_{TCL,dev} = 0 \quad (19)$$

$$\theta_{a,2} = \theta_{a,2,r} \quad (20)$$

- pro  $\theta_{a,2,r} \geq 43,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ :

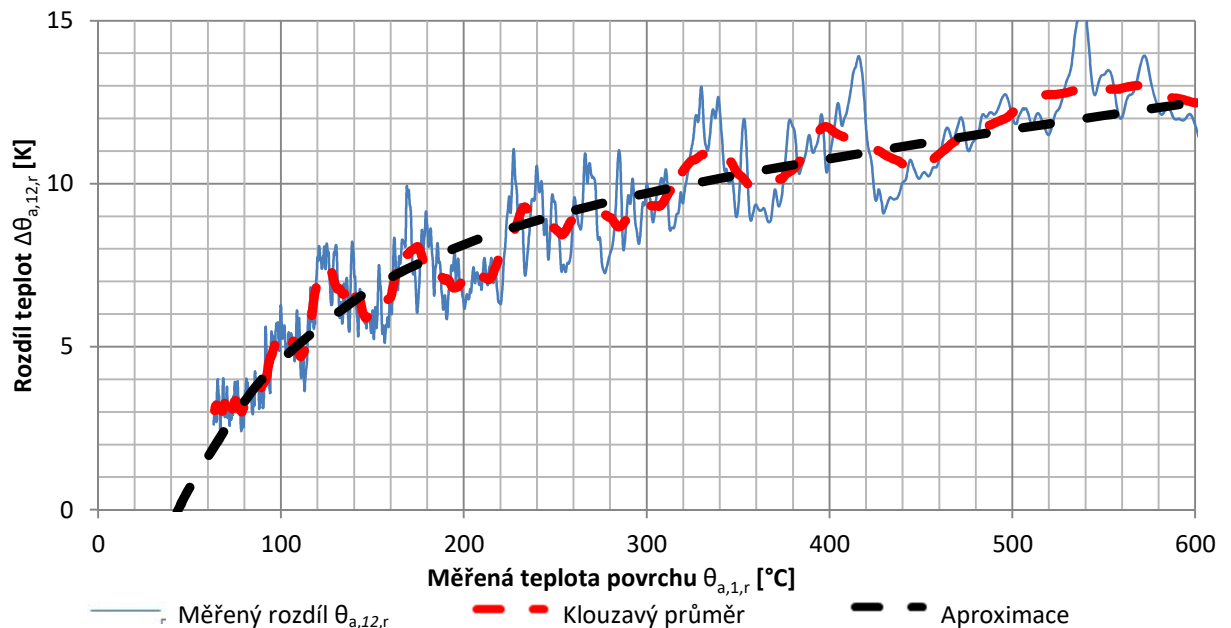
$$\Delta\theta_{a,12,r} = \theta_{a,1,r} - \theta_{a,2,r} \quad (21)$$

$$\Delta\theta_{a,12,r} \cong -\frac{2^{\left(12-\frac{\theta_{a,2,r}}{50}\right)}}{300} - 2 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_{a,2,r}^2 + 0,0104 \cdot \theta_{a,2,r} + 6,98 \quad (22)$$

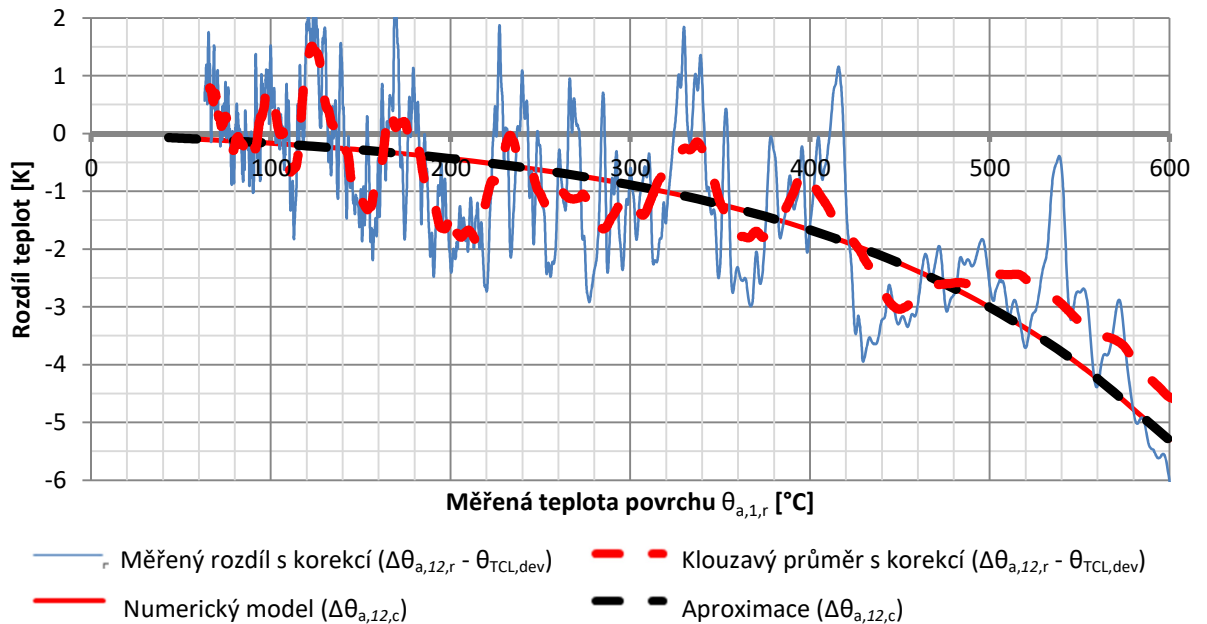
$$\Delta\theta_{a,12,c} = 0,2 - 0,37 \cdot e^{0,0054 \cdot (\theta_{a,1,r} - 100)} \quad (23)$$

$$\theta_{a,2} = \frac{111 \cdot e^{0,0054 \cdot (\theta_{a,1,r} - 100)} - 2^{\left(12-\frac{\theta_{a,2,r}}{50}\right)}}{300} - 2 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_{a,2,r}^2 + 1,0104 \cdot \theta_{a,2,r} + 6,78 \quad (24)$$

kde	$\Delta\theta_{a,12,c}$	je předpokládaný rozdíl teplot mezi povrchem a jádrem vzorku	[K]
	$\Delta\theta_{a,12,r}$	měřený rozdíl teplot mezi povrchem a jádrem vzorku	[K]
	$\Delta\theta_{TCL,dev}$	odchylka měření termočlánku	[K]
	$\theta_{a,1,r}$	měřená teplota povrchu vzorku	[ $^\circ\text{C}$ ]
	$\theta_{a,2}$	teplota jádra vzorku	[ $^\circ\text{C}$ ]
	$\theta_{a,2,r}$	měřená teplota jádra vzorku	[ $^\circ\text{C}$ ]



obr. 17: Zaznamenaný rozdíl teplot povrchu a jádra vzorku při volném ochlazování

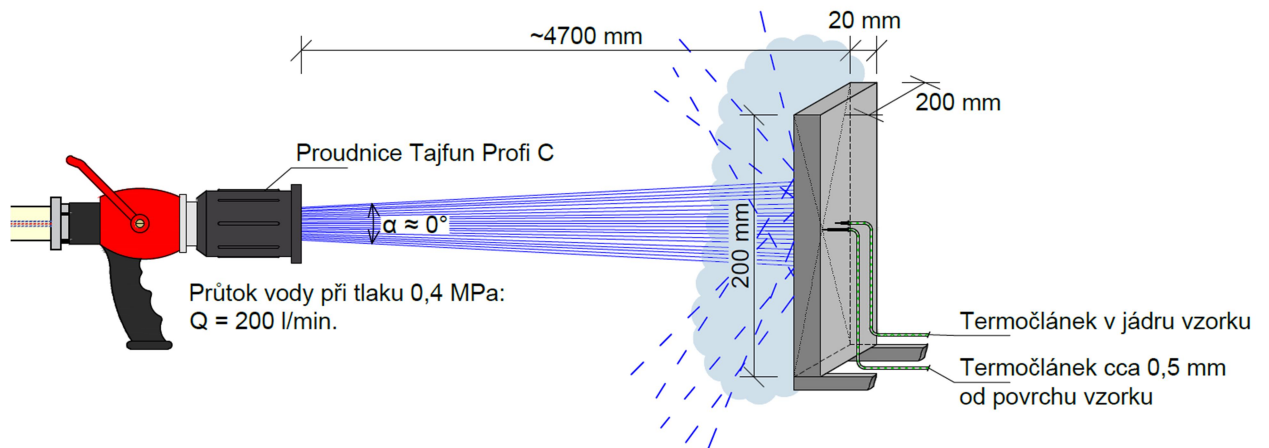


obr. 18: Zaznamenaný rozdíl teplot povrchu a jádra vzorku při volném ochlazování

Dále je do výsledků experimentů zavedena oprava teploty termočlánku na povrchu podle rovnice (17).

## 6.2 Plný proud

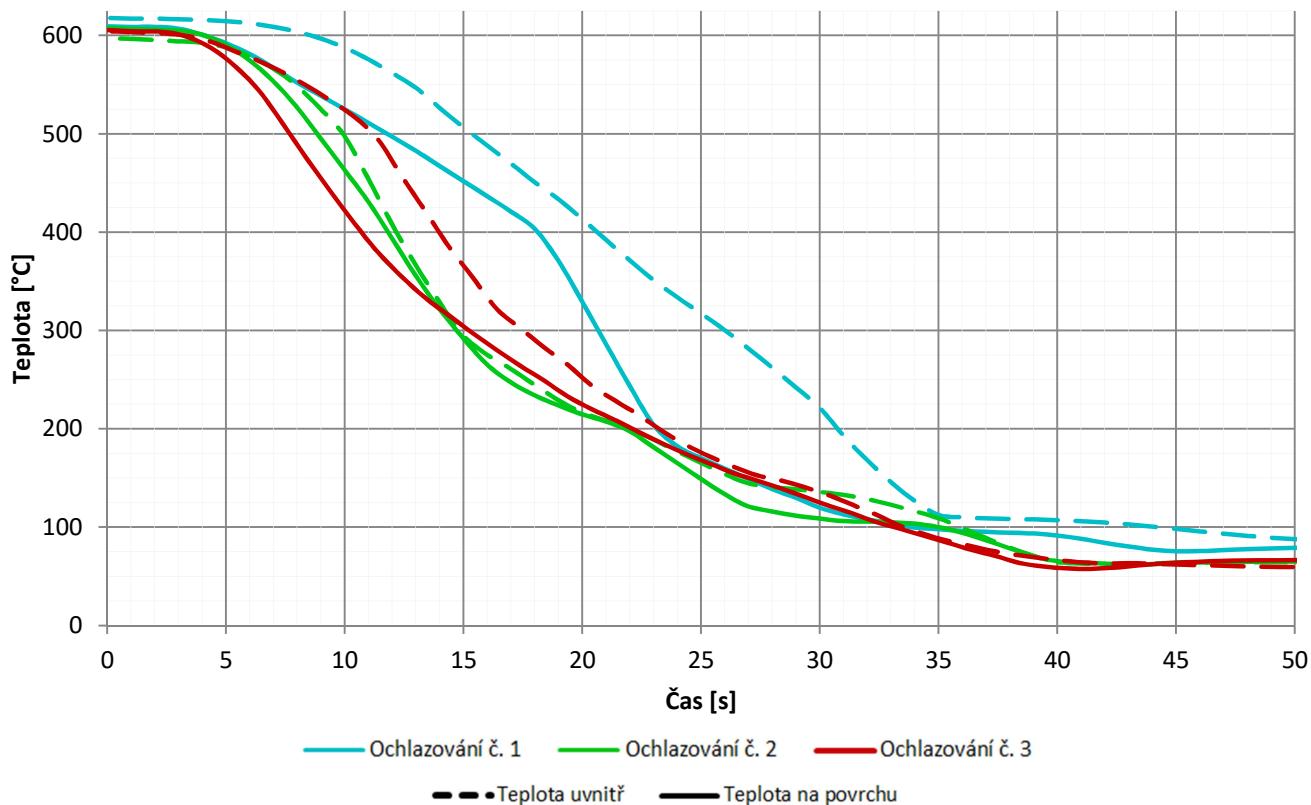
S plným proudem byly provedeny tři zkoušky. Vzorek byl ochlazovaný plným proudem ze vzdálenosti 4,7 m (obr. 19). Během otevírání kulového uzávěru proudnice byl proud namířen mimo vzorek do chvíle, kdy byla proudnice zcela otevřena, aby se vyloučila odchylka způsobená rozdílným průtokem vody. Poté byl proud namířen přímo na zahřátý vzorek. Úhel rozstříku plného proudu je minimální, okraje kužele vodního proudu jsou téměř rovnoběžné.



obr. 19: Schematické znázornění ochlazování plným vodním proudem

Během první zkoušky byl nastavený nižší výkon motoru CAS, proto byl nižší tlak a průtok vody proudnicí. Tím lze vysvětlit pomalejší pokles teploty během první zkoušky. Průběh teplot u dalších zkoušek byl srovnatelný. Poklesu teploty z 600 °C na 100 °C se při ochlazování plným proudem dosáhlo během zhruba 30 s, tedy přibližně 2,5krát pomaleji, než v případě ochlazování ve vodní lázni, kde bylo se stejného poklesu teploty dosáhlo během přibližně 13 s. Protože ochlazení ve vodní lázni nevyvolalo zásadní změny ve struktuře oceli, dá se předpokládat, že ani pomalejší ochlazení vodním proudem nevyvolá žádné významné změny ve struktuře.

Větším rizikem v tomto ohledu může být vznik nerovnoměrného rozložení teplot a tím vnesení napětí do stavební konstrukce. U štíhlých tlačených prvků by mohlo dojít k vybočení, a tím narušení stability.

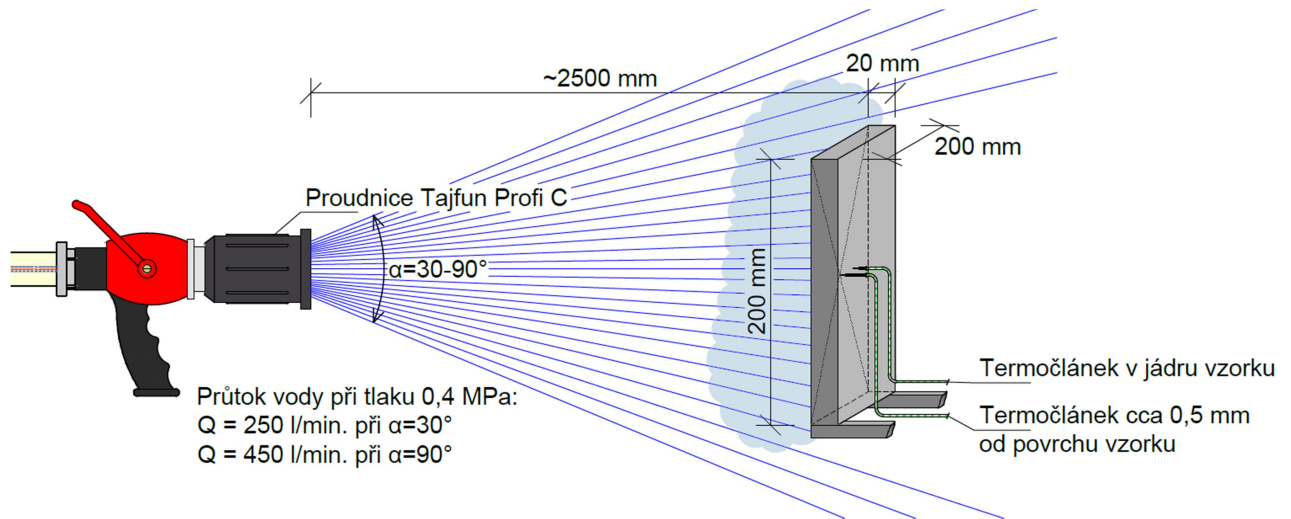


obr. 20: Plný proud - zaznamenaný průběh teplot uvnitř a na povrchu vzorku během ochlazování (po opravě odchylky termočlánku – průběh teplot bez opravy je v příloze této práce)

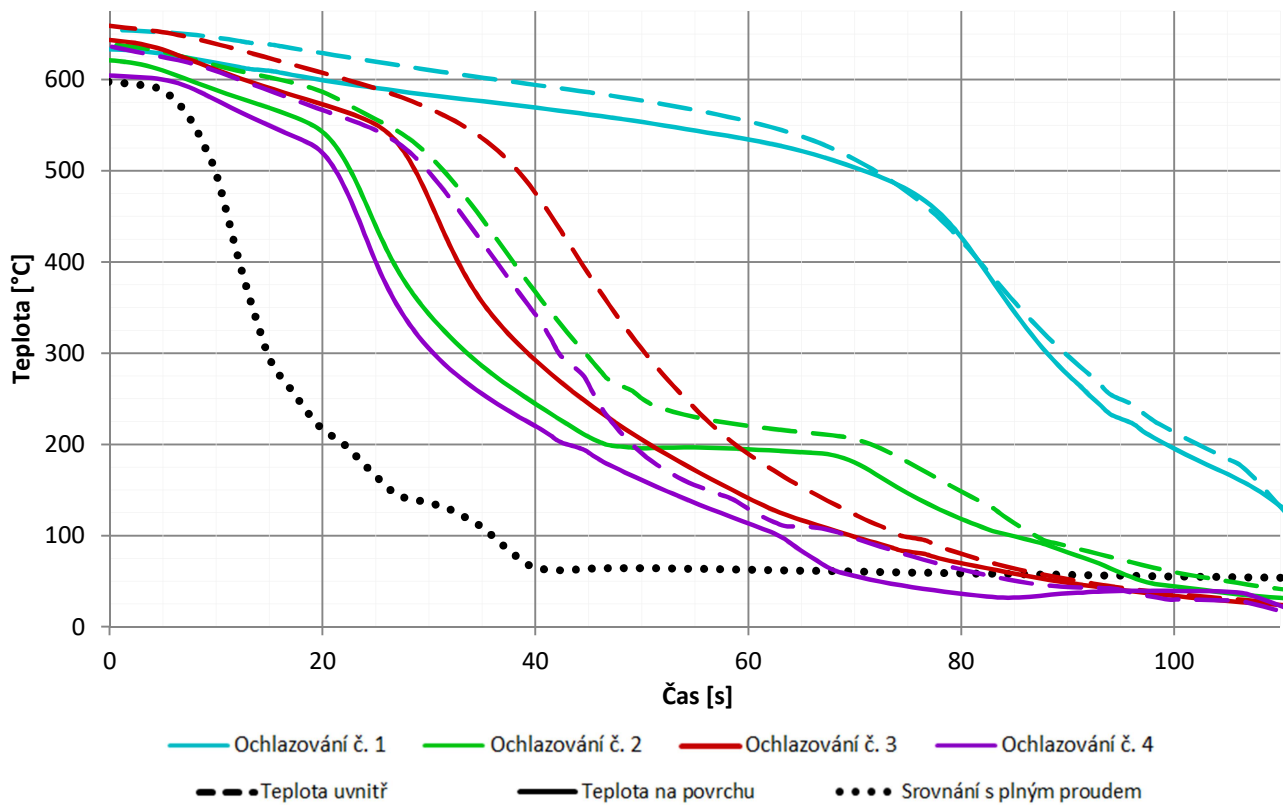
### 6.3 Sprchový proud

Při dalších zkouškách byl vzorek ochlazován sprchovým proudem ze vzdálenosti 2,5 m (obr. 21). Na počátku první zkoušky byl na proudnici nastaven sprchový proud s úhlem rozstříku 75°. Během první minuty byl pokles teploty vzorku pouze o cca 100 K. Pro potřeby této práce je takový pokles teploty zanedbatelný. Pro srovnání – stejného poklesu teploty se při volném ochlazování okolním prostředím dosáhlo za 2,5 min. Naopak při použití plného proudu byl stejný pokles teploty zaznamenán již během prvních 4 s.

Vliv širokého sprchového proudu s úhlem rozstříku 75° lze považovat, v porovnání s plným proudem, za zanedbatelný. Již během první zkoušky, po 60 s, se úhel rozstříku sprchového proudu zmenšil na 30°. Rozdíl v rychlosti poklesu teploty byl znatelný. Úhel rozstříku byl pro další zkoušky zachován.



obr. 21: Schematické znázornění ochlazování sprchovým proudem



obr. 22: Sprchový proud - zaznamenaný průběh teplot uvnitř a na povrchu vzorku během ochlazování (po opravě odchylky termočládku – průběh teplot bez opravy je v příloze této práce)

V průběhu druhé zkoušky se ochlazování přerušilo v okamžiku, kdy ustalo intenzivní vypařování vody z povrchu vzorku, a to při teplotě 200 °C. Vzorek byl ponechán v klidu na dobu 20 s. Poté bylo ochlazování vzorku dokončeno. Další dvě zkoušky, třetí a čtvrtá, byly provedeny za neměnných podmínek. Úhel rozstříku byl 30 stupňů, vzorek byl ochlazován nepřetržitě



z původní teploty až na cca 50 °C. Poklesu z 600°C na 100 °C se dosáhlo za 60 s, tedy přibližně 2krát pomaleji, než plným vodním proudem a 4krát pomaleji než ve vodní lázni.

## 6.4 Porovnání ochlazování

Nejefektivnějším ochlazováním z výše zmiňovaných je ochlazování oceli ve vodní lázni. Naopak nejpomalejšího poklesu teploty bylo v exteriéru dosaženo při ochlazování vzduchem při nulové nebo minimální rychlosti větru. Při použití různých druhů vodních proudů lze dosáhnout různých rychlostí ochlazování v rozmezí mezi těmito dvěma případy. Jednotlivé způsoby ochlazení jsou porovnány v tab. 9.

tab. 9: Srovnání různých způsobů ochlazování

Způsob ochlazování	Doba ochlazování [s]					
	600 °C →500 °C	500 °C →400 °C	600 °C →400 °C	600 °C →300 °C	600 °C →100 °C	600 °C →50 °C
Vodní lázeň <sup>*)</sup>	1,2	1,2	2,4	4,6	13	~28
Plný proud	4	2,5	6,5	10	30	36
Sprchový proud (30°)	16	4	20	26	57	68
Sprchový proud (75°)	51	-	-	-	-	-
Vzduch	155	222	377	723	2550	3600

<sup>\*)</sup> – Vzorek ochlazovaný ve vodní lázni měl menší rozměry, než v ostatních případech, čímž byla ovlivněna doba ochlazování

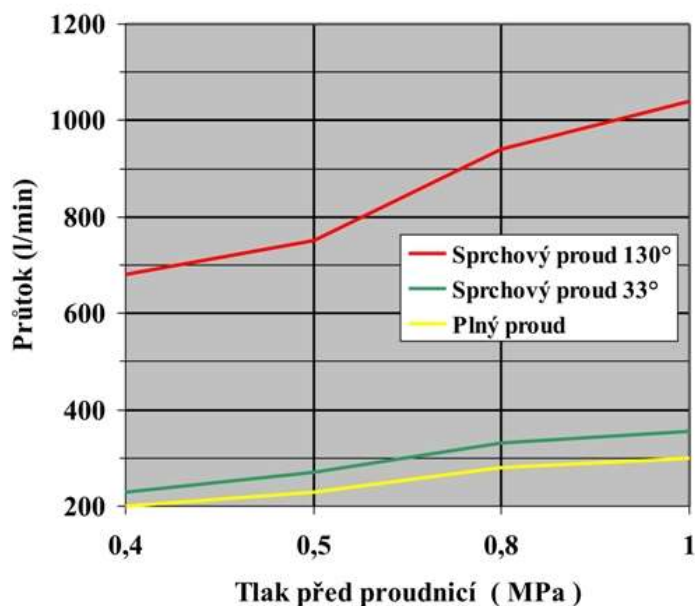
Experimentem bylo zjištěno, že ochlazením ve vodní lázni nedochází k zakalení konstrukčních ocelí. Vodní proudy nezpůsobí větší změny ve struktuře a vlastnostech oceli, protože způsobují pomalejší ochlazení, než vodní lázeň.

## 7 Analytický model ochlazování

### 7.1 Odhad účinnosti ochlazování vodou

Během experimentů byly získány data, na základě kterých je možné alespoň přibližně odhadnout hodnoty některých empiricky stanovovaných součinitelů. Průtok vody proudnicí v závislosti na tlaku a typu proudu lze stanovit z obr. 23. Další hodnoty vyjadřující vliv vodního proudu, které lze stanovit objektivně, se stanoví za těchto předpokladů:

- Počáteční teplota vody je  $\theta_{w,0} = 11$  °C.
- Ochlazovaná plocha vzorku je  $A_a = 0,04$  m<sup>2</sup>.
- U plného proudu se úhel rozstříku vodních kapek má blížit nule, naprostá většina objemu vody je proto namířena přímo na povrch ochlazovaného vzorku. ( $k_v = 1,0$ ) Průtok vody je přibližně  $Q_{v,w} = 200$  l/min. při tlaku 0,4 MPa na proudnici.
- Průtok vody při úhlu rozstříku 30° je  $Q_{v,w} = 250$  l/min. Ve vzdálenosti 2,5 m je průměr kužele vodního proudu  $l = 1,34$  m ( $A_w = 1,40$  m<sup>2</sup>), přibližně 2,86 % vody (~7 l/min.;  $k_v = 0,0286$ ) dopadá na povrch ochlazovaného vzorku.
- Průtok vody u sprchového proudu s úhlem 75° je cca  $Q_{v,w} = 450$  l/min., průměr kužele proudu je ale cca  $l = 3,84$  m ( $A_w = 11,56$  m<sup>2</sup>), proto na vzorek oceli dopadá pouze minimální množství vody – přibližně 0,35 % objemu (~1,56 l/min.;  $k_v = 0,0035$ ).
- Čas ochlazování  $\tau$  je stanoven podle tab. 9.



obr. 23: Objemový průtok proudnicí Tajfun – Profí C (výrobce Pavliš a Hartmann) [17]

Pro stanovení množství tepla, které je potřeba odebrat ze vzorku oceli, podle rovnice (2), je třeba stanovit hmotnost vzorku a jeho tepelnou kapacitu:

- Hmotnost vzorku oceli o rozměrech 200x200x20 mm je  $m_a = 6,12$  kg.
- Počáteční teplota oceli je  $\theta_{ini} = 600$  °C.
- Vzhledem k tomu, že účinnost ochlazování je z velké části ovlivněna přítomností výparu, bude uvažováno ochlazování při vyšších teplotách oceli (vysoko nad bodem varu vody), kdy se dá očekávat největší účinnost ochlazování vodou ( $\theta_{fin} = 300$  °C). Ze vzorku musí být odebráno teplo  $Q_a = 1180$  kJ.
- V případě sprchového proudu s úhlem rozstříku 75° bude, z důvodu absence dat z ochlazování na nižší teploty, uvažována teplota  $\theta_{fin} = 500$  °C. Ze vzorku musí být odebráno teplo  $Q_a = 434,5$  kJ.

Výše uvedené předpoklady jsou shrnuty v následující tabulce:

tab. 10: Shrnutí vstupních předpokladů pro stanovení teploty  $\theta_{w,1}$  a součinitele  $k_{vap}$

Typ proudu	$A_a$ [m <sup>2</sup> ]	$l$ [m]	$A_w$ [m <sup>2</sup> ]	$k_v$ [-]	$Q_{v,w}$ [l/min.]	$m_{w,eff}$ [kg/s]	$\theta_{w,0}$ [°C]	$\theta_{ini}$ [°C]	$\theta_{fin}$ [°C]	$Q_a$ [J·10 <sup>3</sup> ]	$\tau$ [s]
Plný proud	0,04	0,2	≤0,04	1,0	200	3,333	11	600	400	822,5	6,5
Sprchový (30°)		1,34	1,4	0,0286	250	0,119			400	822,5	20
Sprchový (75°)		3,84	11,56	0,0035	450	0,026			500	434,5	51

Jedinými neznámými jsou v tuto chvíli součinitel  $k_{vap}$  a teplota  $\theta_{w,1}$ , které jsou zahrnuty v rovnici pro výpočet účinné tepelné kapacity vody. Úpravou rovnic (12) a (15) získáme:

$$k_{vap} = \frac{\psi_2 - \psi_1}{\psi_3 - \psi_1} \quad (25)$$

$$\psi_1 = c_w \cdot \Delta\theta_w \quad (26)$$

$$\psi_2 = C_{w,eff} = \frac{Q_a}{m_{w,eff} \cdot \tau} \quad (27)$$

$$\psi_3 = l_v + c_w \cdot (\theta_{w,vap} - \theta_{w,0}) \quad (28)$$

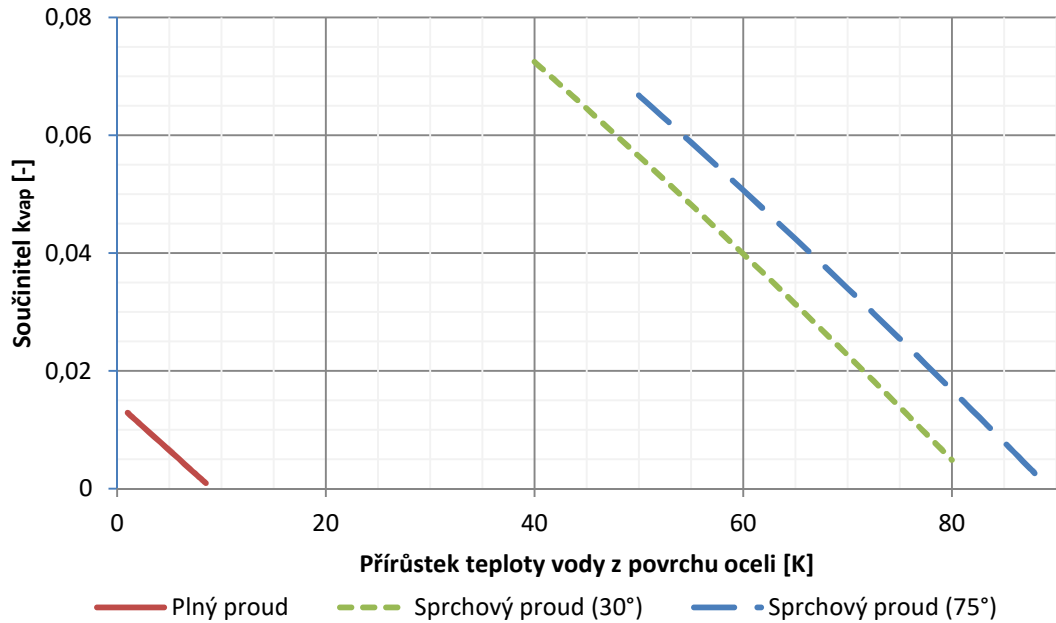
kde  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$  jsou pomocné součinitele [J/kg]

Po dosazení do výše uvedených vzorců lze pro jednotlivé typy proudů vyjádřit vztahy určující možné rozsahy a kombinace součinitele  $k_{vap}$  a teploty vody stékající z povrchu oceli  $\theta_{w,1}$ . (tab. 11) Rozsahy hodnot na obr. 24 jsou omezené podle subjektivního odhadu autora. Konkrétní kombinaci hodnot by bylo možné přesněji určit, pokud by během experimentu byla zaznamenávána teplota vody stékající z povrchu vzorku oceli.

Z grafu je patrné, že rozdíl mezi plným a sprchovým proudem je výrazný. Voda, která dopadne na povrch oceli, je mnohem efektivněji využita v případě sprchového proudu. To je způsobeno tím, že u plného proudu je voda na povrchu oceli rychle vytlačovaná další přitékající vodou. Tento rozdíl je kompenzován výrazně větším průtokem vody na povrchu oceli, čímž je ve výsledku dosaženo ještě rychlejšího ochlazování, než v případě sprchového proudu.

tab. 11: Předpokládané rozsahy přírůstu teploty vody a součinitele  $k_{vap}$  pro různé typy proudů

Typ proudu	$Q_{v,w}$ [kg/s]*	$\psi_1$ [J/kg]	$\psi_2$ [kJ/kg]	$C_{w,eff}$ [kJ/kg]	$\psi_3$ [J/kg]	$\Delta\theta_w$ [°C]	$k_{vap}$ [-]
Plný proud	3,333	(závislé na $\Delta\theta_w$ )	38,0	2 629 020	2 629 020	1÷9	0,001÷0,013
Sprchový (30°)	0,119		345,6			40÷80	0,005÷0,07
Sprchový (75°)	0,026		327,7			50÷88	0,003÷0,06

obr. 24: Možné kombinace hodnot  $k_{vap}$  a  $\Delta\theta_w$  na základě výsledků experimentu

Konkrétní kombinaci rozdílu teplot  $\Delta\theta_w$  a součinitele  $k_{vap}$  nelze z dostupných dat jednoznačně určit. Popsané vztahy poskytují prostor pro podrobnější experimentální ověření působení vodního proudu na ocelové konstrukce. Výše uvedené veličiny je možné nahradit souhrnnou hodnotou, a to efektivní tepelnou kapacitou vody  $C_{w,weff}$  podle rovnice (27) a tab. 11. V následujících kapitolách bude využíváno toto zjednodušení.

Z výsledků experimentu je zřejmé, že účinná tepelná kapacita je u obou sprchových proudů podobná. Naopak u plného proudu je velké množství objemu soustředěno do malé plochy. Voda je tak ihned po dopadu rychle vytlačena mimo ochlazovaný povrch a tepelná kapacita vody není využita stejně efektivně, jako u sprchového proudu. Větší hodnota  $C_{w,weff}$ , by se zjistila, pokud by se ochlazoval prvek větších rozměrů, kde by voda setrvala na povrchu oceli po delší dobu. Naopak menší hodnota by se zjistila u prvků, u kterých je alespoň jeden rozměr menší, než šířka plného prvku (například subtilní tyčové prvky).

## 7.2 Aplikace analytického výpočtu

Výše popsaný výpočet se aplikuje na následující vzorové situace:

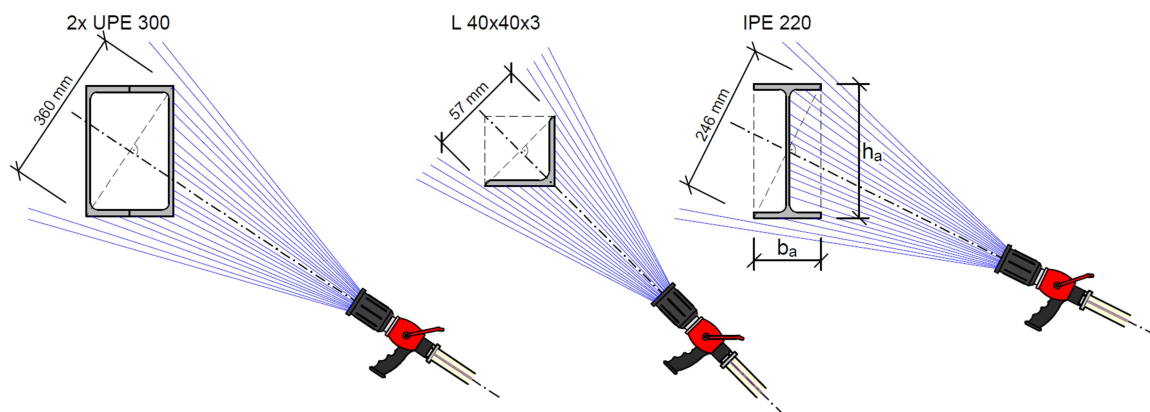
- blok oceli o rozměrech 200x200x20 mm (vzorek z experimentu v kapitole 6)
- destička o rozměrech 50x50x15 mm (vzorek z experimentu v kapitole 5)
- stropní nosník profilu IPE 220 (obr. 3)
- ocelové ztužidlo profilu L 40x40x3
- obdélníkový svařovaný ocelový sloup 2x UPE 300
- přípoj ocelového nosníku na sloup – plech tl. 8 mm s rozměry 150 x 120 mm

Pro tyto prvky se analyticky vypočítá doba ochlazování vodním proudem s využitím výsledků experimentu z přechodí kapitoly a vzorců z této kapitoly. Bude se uvažovat ochlazování ocelových prvků z původní teploty 850 °C na 400 °C, což se dá považovat za rozmezí teplot, které je rozhodující pro utváření struktury oceli. Oproti experimentu se v tomto případě jedná také o tyčové prvky, proto se hmotnost oceli vypočítá podle rovnice (4). Jako jednotkovou hmotnost ocelového prvku lze uvažovat tabulkovou hodnotu pro daný profil. Ochlazovaná délka  $l$  odpovídá průměru vodního proudu v dané vzdálenosti při daném úhlu rozstříku.

Uvažují se stejné typy vodních proudů a vzdálenosti, jako v případě experimentu, hodnoty  $l$ ;  $A_w$  a  $Q_{V,w}$  se mohou uvažovat podle tab. 10. U plného proudu se bude uvažovat šířka kužele proudu 0,15 m, ochlazovaná délka  $l = 0,3$  m. V případě plného proudu je kužel proudu úzký, ve skutečnosti ale bude v důsledku vedení tepla tyčovým prvkem ochlazovaná mnohem větší délka. U ocelového přípoje se zanedbá vedení tepla mezi plechem a nosníkem.

Při použití plného proudu se bude předpokládat, že veškerý objem dopadne na povrch oceli ( $k_v = 1,0$ ). Při použití jiných typů proudu součinitel  $k_v$  může u některých profilů do jisté míry záviset na směru, odkud je ocelový prvek ochlazovaný. Ocelový plech (přípoj) se bude uvažovat s ochlazováním ze směru kolmo k ploše plechu. Například u profilu IPE bude při ochlazování ze směru kolmo k pásnici ochlazována plocha rovná šířce pásnice. Naopak při aplikaci vodního proudu ze směru kolmo ke stojině, bude ochlazována plocha o šířce rovné výšce profilu. V případě profilů vybraných pro tento příklad, bude nejvhodnějším způsobem pro určení směru s nejnepříznivějším součinitelem  $k_v$ , konstrukce obdélníku ohraničujícího průřez profilu. Nejnepříznivější směr je pak kolmý k úhlopříčce tohoto obdélníku (obr. 25). Součinitel  $k_v$  se pak spočítá podle rovnice:

$$k_v = \frac{A_a}{A_w} = \frac{l \cdot \sqrt{b_a \cdot h_a}}{A_w} \quad (29)$$



obr. 25: Schématické znázornění stanovení nejneprůzračnějšího směru ochlazování

tab. 12: Geometricky odvozené vstupní hodnoty pro analytický výpočet

Typ proudu	Profil	$A_w$ [m <sup>2</sup> ]	$l$ [m]	$b_a$ [m]	$h_a$ [m]	$A_a$ [m <sup>2</sup> ]	$k_v$ [-]	$G$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$m_a$ [kg]
Plný	P 20x200x200	0,0177	(0,2)	0,02	0,2	0,0400	1,000	-	6,28
	P 15x50x50	0,0177	(0,05)	0,015	0,05	0,0025	0,142	-	0,153
	IPE 220	0,0177	0,3	0,11	0,22	0,0738	1,000	26,2	7,860
	L 40x40x3	0,0177	0,3	0,04	0,04	0,0170	0,961	1,97	0,591
	2x UPE 300	0,0177	0,3	0,20	0,30	0,1082	1,000	88,8	26,640
	P 8x120x150	0,0177	(0,12)	0,008	0,15	0,0180	1,000	-	1,102
Sprchový (30°)	P 20x200x200	1,4	(0,2)	0,02	0,2	0,0400	0,029	-	6,28
	IPE 220	1,4	1,34	0,11	0,22	0,3296	0,235	26,2	35,108
	L 40x40x3	1,4	1,34	0,04	0,04	0,0758	0,054	1,97	2,640
	2x UPE 300	1,4	1,34	0,20	0,30	0,4831	0,345	88,8	118,99
	P 8x120x150	1,4	(0,12)	0,008	0,15	0,0180	0,013	-	1,102
Sprchový (75°)	P 20x200x200	11,56	(0,2)	0,02	0,2	0,0400	0,003	-	6,28
	IPE 220	11,56	3,84	0,11	0,22	0,9445	0,082	26,2	100,6
	L 40x40x3	11,56	3,84	0,04	0,04	0,2172	0,019	1,97	7,565
	2x UPE 300	11,56	3,84	0,20	0,30	1,3845	0,120	88,8	341,0
	P 8x120x150	11,56	(0,12)	0,008	0,15	0,0180	0,002	-	1,102

**Poznámka:** Ocelové plechy jsou počítány jako blokové prvky (viz kapitola 7.1). Ostatní prvky jsou počítány jako tyčové prvky.

Z dat získaných během experimentu nelze stanovit konkrétní kombinaci teploty vody stékající z povrchu oceli a součinitele výparu tepla  $k_{vap}$ . Pro každý typ proudu bude místo toho použita souhrnná hodnota  $C_{w,eff}$  vyjadřující účinnou kapacitu vody.

tab. 13: Výpočet doby ochlazování ocelových prvků

Typ proudu	Profil	$\theta_{ini}$ [°C]	$\theta_{fin}$ [°C]	$k_v$ [-]	$Q_{v,w}$ [m <sup>3</sup> /s]	$C_{w,eff}$ [kJ/kg]	$m_a$ [kg]	$Q_a$ [J·10 <sup>6</sup> ]	$m_{w,eff}$ [kg/s]	$\tau$ [s]
Plný	P 20x200x200	850	400	1,000	0,2	38,0	6,280	2,494	3,333	20
	P 15x50x50			0,142			0,157	0,062	0,590	3
	IPE 220			1,000			7,860	3,122	3,333	25
	L 40x40x3			0,961			0,591	0,235	3,203	2
	2x UPE 300			1,000			26,640	10,582	3,333	84
	P 8x120x150			1,000			1,130	0,449	3,333	4
Sprchový (30°)	P 20x200x200	850	400	0,029	0,25	345,6	6,280	2,494	0,119	61
	IPE 220			0,235			35,108	13,946	0,981	41
	L 40x40x3			0,054			2,640	1,049	0,226	13
	2x UPE 300			0,345			118,99	47,266	1,438	95
	P 8x120x150			0,013			1,130	0,449	0,054	24
Sprchový (75°)	P 20x200x200	850	400	0,003	0,45	327,7	6,280	2,494	0,026	293
	IPE 220			0,082			100,6	39,963	0,613	199
	L 40x40x3			0,019			7,565	3,005	0,141	65
	2x UPE 300			0,120			341,0	135,45	0,898	460
	P 8x120x150			0,002			1,130	0,449	0,012	117

Vypočítané časy ochlazování jsou srovnané v následující tabulce:

tab. 14: Doba ochlazování jednotlivých ocelových prvků

Profil	Doba ochlazování [s] (850 °C → 400 °C)		
	Plný proud	Sprchový proud 30°	Sprchový proud 75°
P 20x200x200	20	61	293
P 15x50x50	3	-	-
IPE 220	25	41	199
L 40x40x3	2	13	65
2x UPE 300	84	95	460
P 8x120x150	4	24	114

Z tabulky je zřejmé, že rychlejšího ochlazení by se dosáhne u subtilnějších prvků s velkou plochou povrchu v poměru k objemu (profil IPE, L, tenké ploché prvky), u kterých je třeba kratší doba ochlazování. Naopak pomaleji se ochlazují masivní prvky (blok oceli) nebo prvky s minimální plochou vystavenou ochlazování (čtvercový obvod sloupu z 2x UPE).



V případě aplikace plného proudu na menších rozměřů (L, deska s plochou 50x50 mm) pravděpodobně přestává platit změřená hodnota  $C_{w,eff}$ , protože ochlazovaná plocha je u těchto prvků menší než plocha průřezu kuželem vodního proudu ( $k_v < 1$ ), u profilu „L“ se navíc uvažuje ochlazování šikmo k plochám profilu. Voda soustředěná do jednoho bodu může v těchto případech snadněji a rychleji odtékat z povrchu a podílí se tak na ochlazování po kratší dobu. Tomu nasvědčuje fakt, že podle tohoto výpočtu by měl být vzorek použitý v kapitole 5 ochlazený vodním proudem rychleji, než ve vodní lázni.

### 7.3 Vyhodnocení

V této kapitole byl navržen postup pro analytický výpočet doby ochlazování ocelových prvků pomocí různých typů vodního proudu. K tomu se využily výsledky z experimentu s ochlazováním bloku oceli. Ve výpočtu byly zahrnuté jak vlivy vycházející z geometrických předpokladů, tak hodnoty, které zjednodušeně popisují působení vodního proudu na povrch oceli s vysokou teplotou.

Výpočet může být do větší míry platný při použití sprchového proudu, kdy na povrch oceli dopadá přiměřené množství vody a vzniká pouze tenký film, který volně odtéká z povrchu oceli. Výrazně jinak se může chovat plný proud, kterým je soustředěno do malé plochy velké množství vody. Ta je z povrchu ihned po dopadu vytlačovaná nově přitékající vodou a dostupná tepelná kapacita vody je využita mnohem méně efektivně než u sprchového proudu. S rostoucí vzdáleností proudnice od ochlazovaného prvku pak plný vodní proud bude přecházet z hlediska výpočtu do charakteristiky sprchového proudu

Zjištěná hodnota  $C_{w,eff}$  je tak platná pouze v omezeném rozsahu. U plného proudu bude platná pouze v případech, kdy je ochlazována plocha o průměru alespoň cca 0,2 m.

## 8 Numerický model ochlazování

V analytickém modelu se uvažovalo s mnoho zjednodušujícími předpoklady a přesnost tohoto výpočtu je značně omezená. Jedním ze zjednodušení je konstantní využití tepelné kapacity dodávané vody. Ve skutečnosti je rychlost ochlazování oceli závislá na teplotě povrchu a teplotě tekutiny obklopující ocelový prvek. Při ohřevu, resp. ochlazování, ocelového prvku vzduchem je změna teplot pomalá a teplotní pole v průřezu je téměř vyrovnané (rozdíly teplot v řádu jednotek K). Lze tak uvažovat konstantní teplotu oceli v celém průřezu.

Při ochlazování vodním proudem je pokles teploty mnohem rychlejší a zejména u rozměrnějších prvků může ochlazování způsobit výrazně nerovnoměrné rozložení teplot s rozdíly teplot v řádu stovek K. Přesnější řešení úlohy vyžaduje numerický výpočet metodou konečných prvků. Pro stanovení okrajových podmínek se využijí výsledky experimentu. Vytvořený numerický model bude aplikován na průřezy ocelových prvků řešených v kapitole 7.

### 8.1 Použitý software

#### 8.1.1 Fire Dynamics Simulator (FDS)

Pro simulace dynamiky požárů existuje software FDS (Fire Dynamics Simulator) vyvíjený americkým Národním institutem standardů a technologie (NIST). FDS obsahuje modely pro numerický výpočet proudění plynů a pyrolýzy během požárů. Obsahuje modely pro simulaci částic pevných a kapalných látek. Umožňuje tak definovat zdroj vodních kapek s daným průtokem, úhlem rozstříku, průměrem částic, výstupní rychlostí, atd. Z toho důvodu by se tento software mohl nabízet jako jedna z možností pro vytvoření numerického modelu vodního proudu.

Částice jsou v modelu přestupu tepla z pevných objektů se uvažují jako jednotlivé částice nebo tenký film kapaliny, který volně stéká z povrchu pevného objektu. Sprchový proud by tak mohlo být možné v FDS vymodelovat. Při použití plného proudu již do přestupu tepla na povrchu oceli vstupují hydrodynamické děje, které FDS neumí simulovat a účinek plného vodního proudu vymodelovaného v FDS je výrazně menší, než ve skutečnosti. Alternativně by bylo možné stanovit pevný součinitel přestupu tepla, ale při takovémto řešení již ztrácí smysl použití CFD simulace [18].

### 8.1.2 FreeFEM

Modelování vlivu vodního proudu na teplotu pevného objektu lze lépe vymodelovat stanovením okrajových podmínek na hranicích průřezu ocelového prvku. Při stanovení pevného součinitele přestupu tepla je vhodnějším řešením výpočet metodou konečných prvků. V této práci se pro vytvoření modelu využije výpočetní software FreeFEM (verze 4.2).

FreeFEM je software šířený pod svobodnou licencí (LGPL), sloužící k řešení parciálních diferenciálních rovnic. FreeFEM obsahuje rychlý interpolační algoritmus a jazyk pro manipulaci s daty na více sítích, čímž je umožněno snadné řešení problémů zahrnujících parciální diferenciální rovnice, jako jsou interakce tekutin a struktur, metodou konečných prvků. Software FreeFEM je psán v jazyce C++. Jazyk pro zápis vstupních dat (FreeFEM++), rovněž vychází svou syntaxí z C++. Společně s verzí pro použití v příkazovém řádku, je instalováno integrované grafické prostředí FreeFEM++-cs, které obsahuje editor zdrojového kódu a okna pro grafický a textový výstup.

## 8.2 Definice modelu

Zdrojový kód numerického modelu je v příloze C. Jako základ numerického modelu se použil zdrojový kód z [19], ve kterém je definována rovnice vedení tepla v materiálu, přičemž uvažuje s relativní hodnotou tepelné vodivosti a tepelné kapacity materiálu. Pro potřeby výpočtu byl model rozšířen o funkce stanovující tyto veličiny v závislosti na teplotě materiálu v daném bodě. Hustota oceli se uvažuje konstantní  $7850 \text{ kg/m}^3$ . Tepelná kapacita oceli se uvažuje podle rovnic (5) až (8). Tepelná vodivost oceli se uvažuje podle [1]:

- pro  $20 \text{ °C} \leq \theta_a$ :

$$\lambda_a(\theta_a) = 54,0 \text{ W/m} \cdot \text{K} \quad (30)$$

- pro  $20 \text{ °C} \leq \theta_a \leq 800 \text{ °C}$ :

$$\lambda_a(\theta_a) = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \cdot \theta_a \text{ W/m} \cdot \text{K} \quad (31)$$

- pro  $800 \text{ °C} \leq \theta_a \leq 1200 \text{ °C}$ :

$$\lambda_a(\theta_a) = 27,3 \text{ W/m} \cdot \text{K} \quad (32)$$

kde  $\theta_a$  je teplota oceli  $[\text{°C}]$   
 $\lambda_a$  tepelná vodivost oceli  $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$

V modelu je definovaných několik variant okrajových podmínek, které jsou ve zdrojovém kódu označené názvy:

- `bINERT` – bez tepelného toku skrz hranici;
- `bTEMP` – pevná teplota hranice oblasti (`ufix`);
- `bAIR` – hranice ochlazovaná okolním vzduchem, přestup tepla se skládá ze dvou složek:
  - o proudění – přestup tepla závislý na součiniteli přestupu tepla (`aair`) a rozdílu teploty okolního vzduchu (`ue`) a teploty hranice;
  - o sálání – závislé na teplotě okolí (`ue`), emisivitě materiálu (`epsilonA`) a emisivitě okolí (`epsilonB`);
- `bWATER` – hranice ochlazovaná vodním proudem s teplotou `uw`; přestup tepla stanovený na základě experimentu v kapitole 6. Před začátkem ochlazování (`coolingStart`) se chová stejně jako `bAIR`.

tab. 15: Seznam vstupních hodnot numerického modelu

Název proměnné ve zdrojovém kódu	Popis proměnné	Jednotka	Ekvivalentní označení	Okrajová podmínka
<code>ufix</code>	Pevná teplota na hranici oblasti	°C	$\theta_{a,1}$	<code>bTEMP</code>
<code>aair</code>	Součinitel přestupu tepla	W/(m <sup>2</sup> ·K)	$\alpha_c$	<code>bAIR</code>
<code>ue</code>	Teplota okolního vzduchu	°C	$\theta_g$	<code>bAIR</code>
<code>uinit</code>	Rozložení teplot na začátku simulace	°C	$\theta_a$	–
<code>minvalue</code>	Nejnižší zobrazená teplota v grafickém výstupu	°C	–	–
<code>maxvalue</code>	Nejnižší zobrazená teplota v grafickém výstupu	°C	–	–
<code>dt</code>	Časový krok simulace	s	–	–
<code>timestep</code>	Časový krok vykreslení teplot (grafický výstup)	s	–	–
<code>coolingStart</code>	Čas začátku ochlazování vodou	s	–	<code>bWATER</code>
<code>tend</code>	Čas ukončení simulace	s	–	–
<code>epsilonA</code>	Emisivita materiálu	–	$\epsilon_m$	<code>bAIR</code>
<code>epsilonB</code>	Emisivita okolí	–	$\epsilon_g$	<code>bAIR</code>
<code>uw</code>	Teplota vody	°C	$\theta_{w,0}$	<code>bWATER</code>
<code>bAIR</code>	Označení okrajových podmínek	–	–	–
<code>bTEMP</code>		–	–	–
<code>bINERT</code>		–	–	–
<code>bWATER</code>		–	–	–

$t_{clX1}$ a $t_{clY1}$	Souřadnice prvního měřicího bodu	m	–	–
$t_{clX2}$ a $t_{clY2}$	Souřadnice druhého měřicího bodu	m	–	–

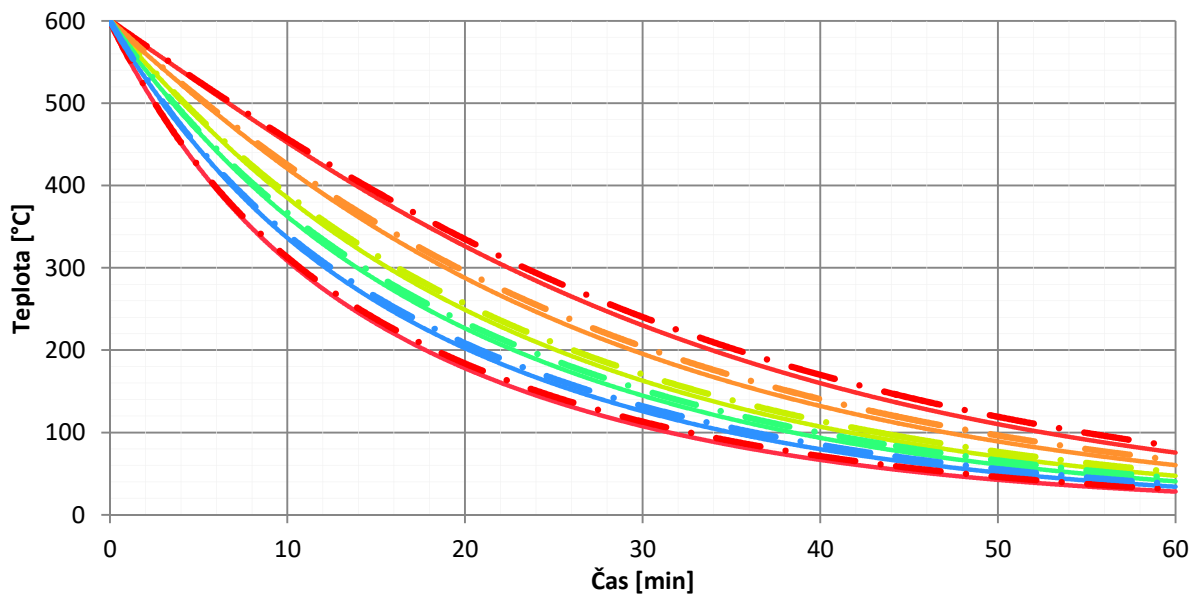
## 8.3 Verifikace a validace

### 8.3.1 Sálání a přestup tepla prouděním

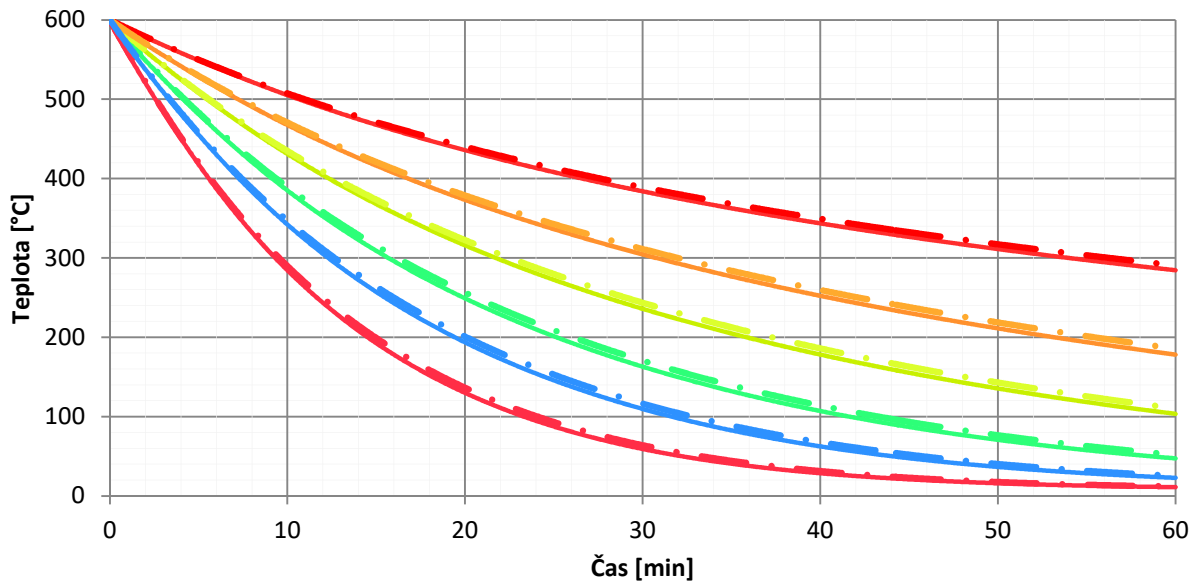
Model vedení tepla v materiálu, sálání a přestupu tepla do okolního vzduchu, je verifikován podle ČSN EN 1993-1-2. V numerickém modelu se vytvořil model vzorku z kapitoly 6, který byl zjednodušen jako 2D obdélníkový průřez tyčovým prvkem o rozměrech 200x20 mm. Všechny strany obdélníku jsou rozdělené po 4 mm s definovanou okrajovou podmínkou  $b_{AIR}$ . Původní teplota vzorku byla  $u_{init}=600$  a teplota vzduchu  $u_e=20$ . Provedla se série výpočtů s různými kombinacemi hodnot:

- $a_{air} \in \{ 0,0; 7,5; 15,0; 25,0; 35,0; 50,0 \}$
- $\epsilon_{m} \in \{ 0,95 \}$
- $\epsilon_{g} \in \{ 0,0; 0,15; 0,35; 0,5; 0,7; 0,95 \}$

Se stejnými vstupními údaji se provedly výpočty podle [1]. V první sérii výpočtů byly nastavené hodnoty  $a_{air}=25$  a  $\epsilon_{m}=0,95$ . Vstupní hodnota  $\epsilon_{g}$  se postupně měnila na hodnoty uvedené výše. (obr. 26) V druhé sérii výpočtů se ponechala konstantní hodnota  $\epsilon_{g}=0,35$  a měnila se hodnota  $a_{air}$ . (obr. 27)



obr. 26: Srovnání průběhu ochlazování vzduchem podle numerického modelu (plná) a ČSN EN 1993-1-2 (čerchovaná) při  $\alpha_c=25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,  $\epsilon_g=0,95$  a různé hodnotě  $\epsilon_m$



obr. 27: Srovnání průběhu ochlazování vzduchem podle numerického modelu (plná) a ČSN EN 1993-1-2 (čerkovaná) při  $\epsilon_m=0,35$ ,  $\epsilon_g=0,95$  a různém součiniteli přestupu tepla  $\alpha_c$

Oba způsoby výpočtu mají srovnatelné výsledky. Výpočet podle ČSN EN 1993-1-2 uvažuje v celém průřezu s konstantní (průměrnou) teplotou, zatímco teploty podle numerického výpočtu odpovídají teplotě 0,5 mm od povrchu vzorku. Z toho důvodu jsou teploty v prvním případě vždy mírně vyšší. Model přestupu tepla a sálání je možné v numerickém výpočtu považovat za funkční.

Aby bylo možné v numerickém modelu co nejpřesněji napodobit okrajové podmínky v experimentu, zjistily se nejprve vstupní hodnoty pro okrajovou podmínku  $b_{AIR}$ . Během experimentu byla teplota vzduchu  $\theta_g = 8 \text{ °C}$  ( $u_e=8$ ). Postupnou aproximací byla zjištěna shoda se skutečným průběhem teplot při hodnotách  $\epsilon_{A}=1.0$ ;  $\epsilon_{B}=1.0$ ;  $a_{air}=12.0$ . Výsledný průběh teplot je vyobrazený na obr. 16. Uvedené hodnoty se budou používat dále v této kapitole.

### 8.3.2 Ochlazování plným vodním proudem

Ochlazování plným vodním proudem se v modelu simuluje okrajovou podmínkou  $b_{WATER}$ . Přestup tepla do chladicí vody je daný součinitelem  $\alpha_w$ , který je obdobou součinitele  $\alpha_c$ . Rychlost přestupu tepla do vody nevzrůstá lineárně s teplotou povrchu, jako je tomu při přestupu tepla do proudícího plynu. Pokud je teplota povrchu o mnoho vyšší, než bod varu vody, vytvoří se na

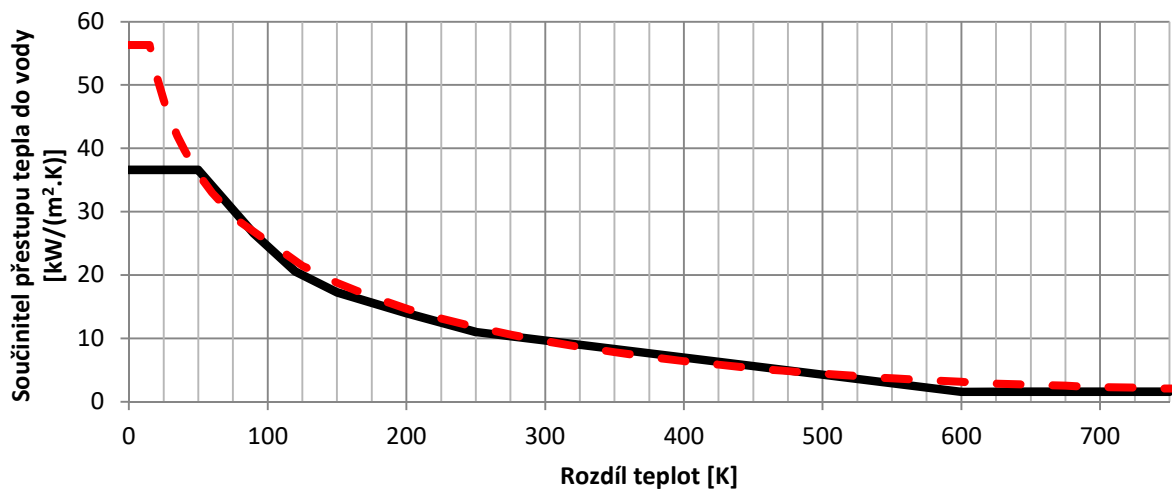
povrchu tělesa tenká vrstva vodní páry, která tvoří izolační vrstvu bránící přestupu tepla – tzv. Leidenfrostův efekt.

Pro účel odvození  $\alpha_w$  se nastavila okrajová podmínka `bWATER` na jednu z delších stran obdélníkového průřezu. Zároveň se tato strana rozdělila po 2 mm, čímž se zjemnila síť poblíž ochlazované plochy. Poloha měřícího bodu byla `t_c1X1=0.0185` a `t_c1Y1=0.1`. Při odvozování křivky určující závislost  $\alpha_w$  na teplotě povrchu se postupnou iterací vytvořila křivka rozdělená na několik částí s lineárním průběhem tak, aby výsledkem modelu byl co nejpřesnější průběh teplot odpovídající experimentu. Zjednodušeně lze průběh vyjádřit rovnicí:

$$\alpha_w = 66974 + 6,32 \cdot (\theta_{a,1} - \theta_{w,0}) \cdot \arctan(\theta_{a,1} - \theta_{w,0}) - 4579 \cdot \ln \left[ 16 \cdot (\theta_{a,1} - \theta_{w,0})^2 + 1 \right] \quad (33)$$

$$h_{net} = \alpha_w \cdot (\theta_{a,1} - \theta_{w,0}) \quad (34)$$

kde  $h_{net}$  je tepelný tok povrchem tělesa [W/m<sup>2</sup>]  
 $\alpha_w$  součinitel přestupu tepla do vody [J]  
 $\theta_{a,1}$  teplota povrchu oceli [°C]  
 $\theta_{w,0}$  teplota vody [°C]

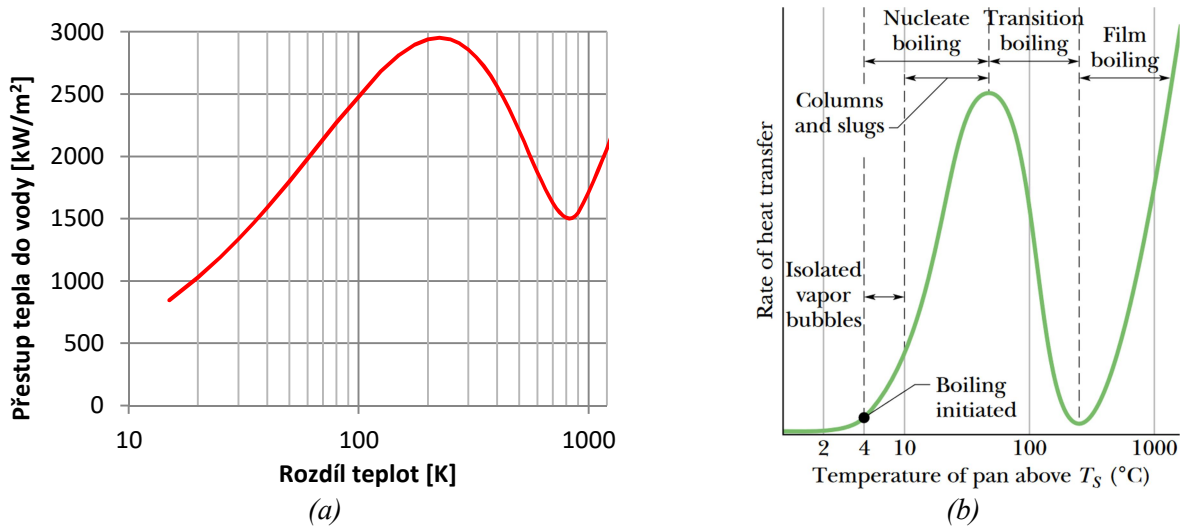


obr. 28: Součinitel přestupu tepla do vody v závislosti na rozdílu teplot; plně – průběh získaný iterací; čárkovaně – průběh podle rovnice (33)

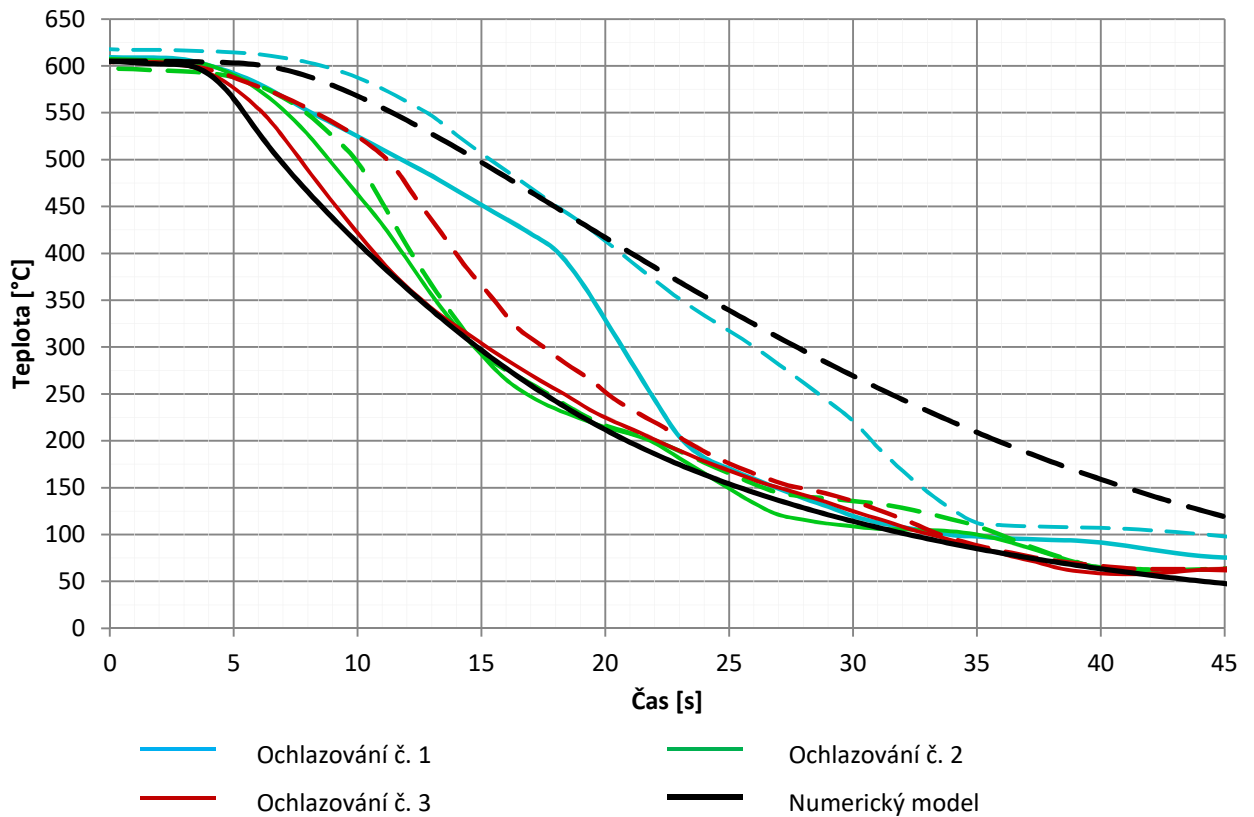
Závislost součinitele přestupu tepla do vody je znázorněná na obr. 28. Takovýto průběh je získaný postupnou iterací podle výsledků experimentu. Součinitel  $\alpha_w$  je při nízkých teplotách vysoký a zejména pod bodem varu vody s rostoucí teplotou povrchu výrazně klesá.

Vliv Leidenfrostova efektu je zřetelně rozpoznatelný v průběhu celkového tepelného toku  $h_{net}$ . (obr. 29) Tepelný tok má zpočátku s rostoucí teplotou povrchu rostoucí tendenci. Při teplotě

povrchu přibližně 200°C je tepelný tok největší. Při vyšších teplotách se vytváří souvislá tenká vrstva vodní páry, která brání přestupu tepla. [20]



obr. 29: (a) tepelný tok povrchem tělesa  $h_{\text{net}}$  podle numerického modelu při ochlazování plným proudem; (b) rychlost přestupu tepla do vodních kapek na vodorovném povrchu (převzato z [20])



obr. 30: Srovnání průběhů teplot podle numerického modelu s experimentem (plně – teplota na povrchu; čárkovaně – teplota uvnitř)



Průběh teplot na povrchu vzorku, při stanoveném průběhu přestupu tepla do vody, odpovídá průběhu teplot, který byl získáný během experimentu. (obr. 30) Teplota jádra podle numerického modelu je po celou dobu vyšší, než očekávaná podle experimentu. Nejpravděpodobněji je tato odchylka způsobena:

- **Zpožděním termočlánků** – termočlánky nereagují na změnu teploty okamžitě. Ve skutečnosti mohl být pokles teplot rychlejší, než je skutečně zaznamenaný. Výsledky experimentu mohou být zkreslené touto chybou. Možným opatřením je vynásobení hodnoty  $\alpha_w$  podle rovnice (33) pevným součinitelem větším než 1. Dalším řešením by bylo zkoumání způsobu reakce termočlánků a toto chování simulovat v rámci numerického modelu. Podle takto upraveného modelu by bylo možné přesněji odhadnout skutečný průběh součinitele  $\alpha_w$ .
- **Složitějšími okrajovými podmínkami** – numerický model uvažuje, že je ochlazovaná pouze jedna plocha vzorku. Ostatní plochy se uvažují stejně, jako při pomalém ochlazování vzduchem. Ve skutečnosti se mohou vlivem vodního proudu změnit okrajové podmínky i na ostatních plochách (jiná vlhkost a teplota vzduchu, rychlejší proudění). Pro přesnější stanovení okrajových podmínek by bylo třeba během experimentu přidat alespoň jeden další termočlánek na zadní (neochlazovanou) stranu vzorku.

## 8.4 Aplikace numerického modelu

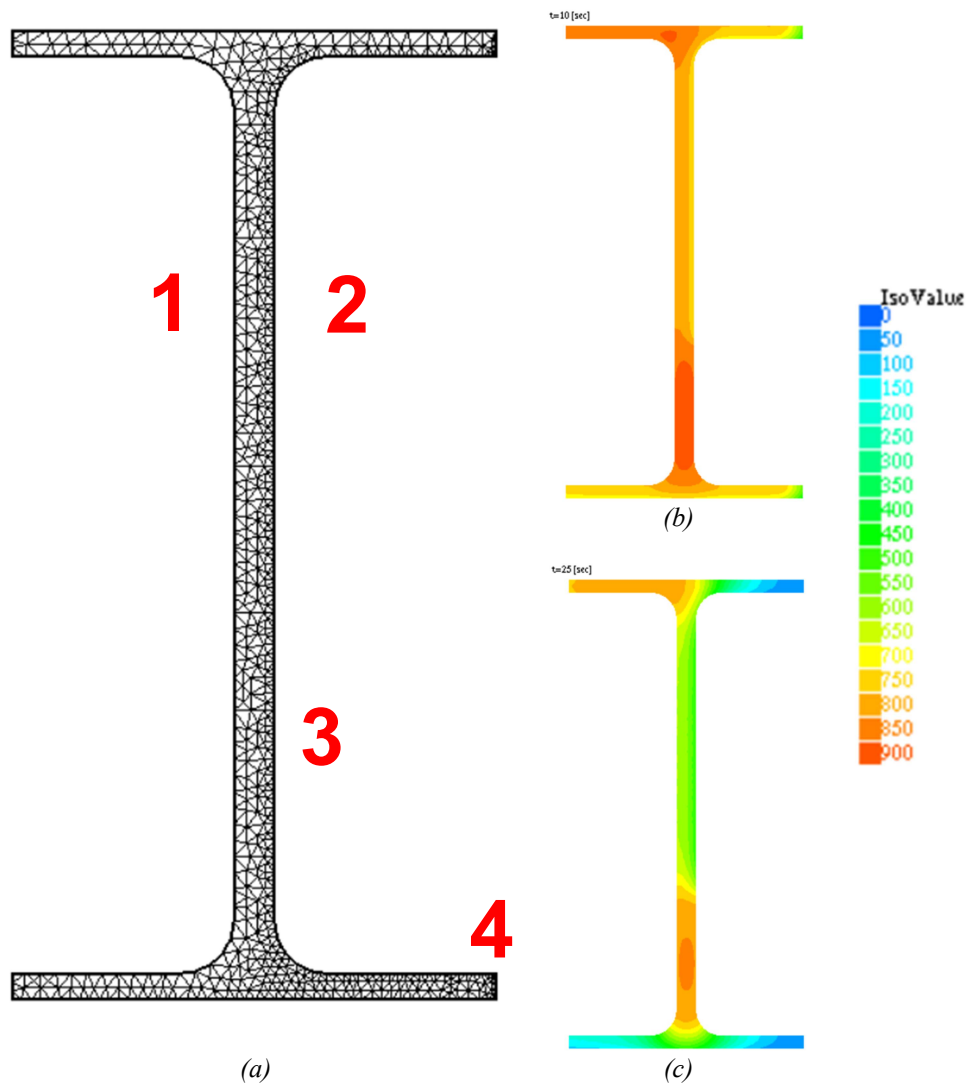
Vytvořený numerický model je možné aplikovat na vzorové konstrukce z kapitoly 7.2 a posoudit přesnost analytického odhadu. Numerický model navíc pracuje s nerovnoměrným rozložením teplot. Proto je možné odhadnout kromě rychlosti ochlazování i deformace, které ochlazování vodním proudem způsobí, případně je integrovat do statického výpočtu stavební konstrukce. Statické posouzení není součástí této práce, proto se pouze odhadne, jakým způsobem by mohlo dojít ke ztrátě stability konstrukce v důsledku ochlazování vodním proudem.

Počáteční teplota ocelových prvků bude nastavená `uinit=850`, aby bylo možné srovnání s výsledky analytického výpočtu.

### 8.4.1 Stropní nosník

Ochlazování stropního nosníku se v numerickém modelu uvažuje v úhlu cca 30° od svislé osy. Okrajová podmínka `bWATER` je nastavená u dolního okraje dolní pásnice, poloviny dolní strany

horní pásnice a jedné strany stojiny. Stojina je ochlazovaná pouze na horních 70 % výšky, dolní část stojiny se uvažuje, že je „zastíněná“ dolní pásnicí a neochlazuje se přímo. Ve skutečnosti by se ochlazovala stékající vodou i spodní, ale pravděpodobně pomaleji, než plochy vystavené vodnímu proudu přímo. Výpočetní síť je na neochlazené části profilu rozdělena přibližně po 4 mm, neochlazená strana je rozdělena jemněji, přibližně po 2 mm. (obr. 31) Časový krok výpočtu je  $\Delta t = 0.2$ . Měřicí body č. 1 a 2 jsou umístěné na protilehlých stranách stojiny ve 2/3 výšky profilu. Měřicí bod č. 3, který sleduje maximální teplotu v profilu, je v ose profilu v 1/4 výšky nad dolní hranou profilu. Měřicí bod č. 4, který sleduje nejnižší teplotu profilu, je na spodní ochlazené hraně dolní pásnice.

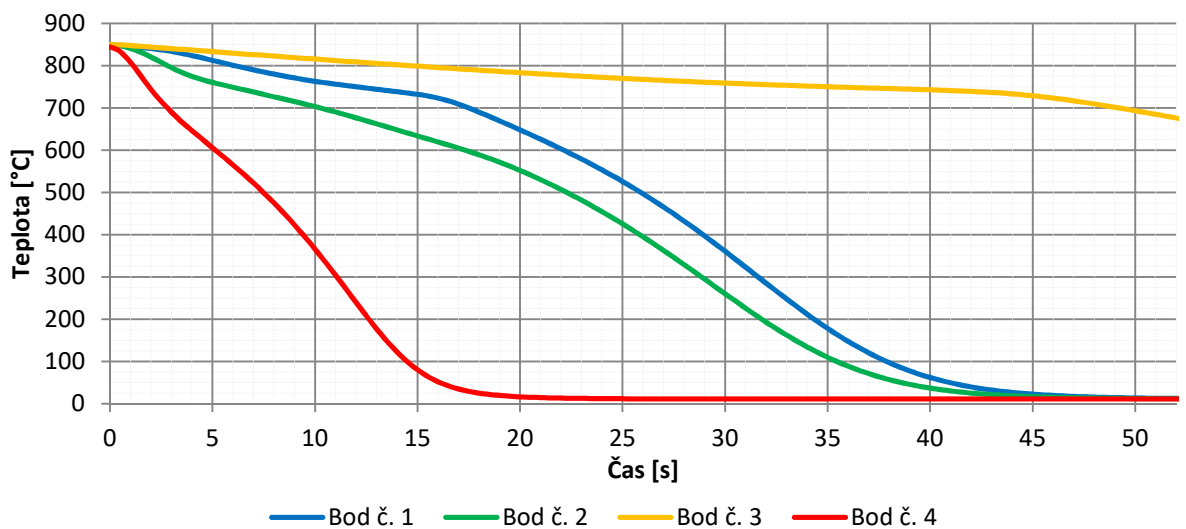


obr. 31: Stropní nosník IPE 220 – (a) výpočetní síť a měřicí body; (b) rozložení teplot po 10 s; (c) rozložení teplot po 25 s.

Při ochlazování profilu IPE 220 plným vodním proudem vznikne výrazně nerovnoměrné rozložení teplot, které způsobí deformaci profilu. Rozdíly teplot se projevují již po 10 s na

ochlazovaných koncích pásnic. Po 25 s jsou konce pásnic již téměř ochlazené na běžnou teplotu, zatímco část horní pásnice, chráněná před působením vodního proudu, má stále teplotu blízkou původní teplotě. Rozdíl teplot v různých částech profilu dosahuje až 770 K. (obr. 32) Deformací profilu dojde k pootočení průřezu a přispěje ke kolapsu vlivem klopení průřezu.

U ohýbaného stropního nosníku s profilem IPE dochází v simulovaném případě k nerovnoměrnému rozložení teplot napříč tloušťkou horní (tlačené) části stojiny. Rozdíl teplot na obou stranách stojiny je až 105 K. V důsledku toho může dojít k vyboulení stěny stojiny a narušení stability části průřezu.

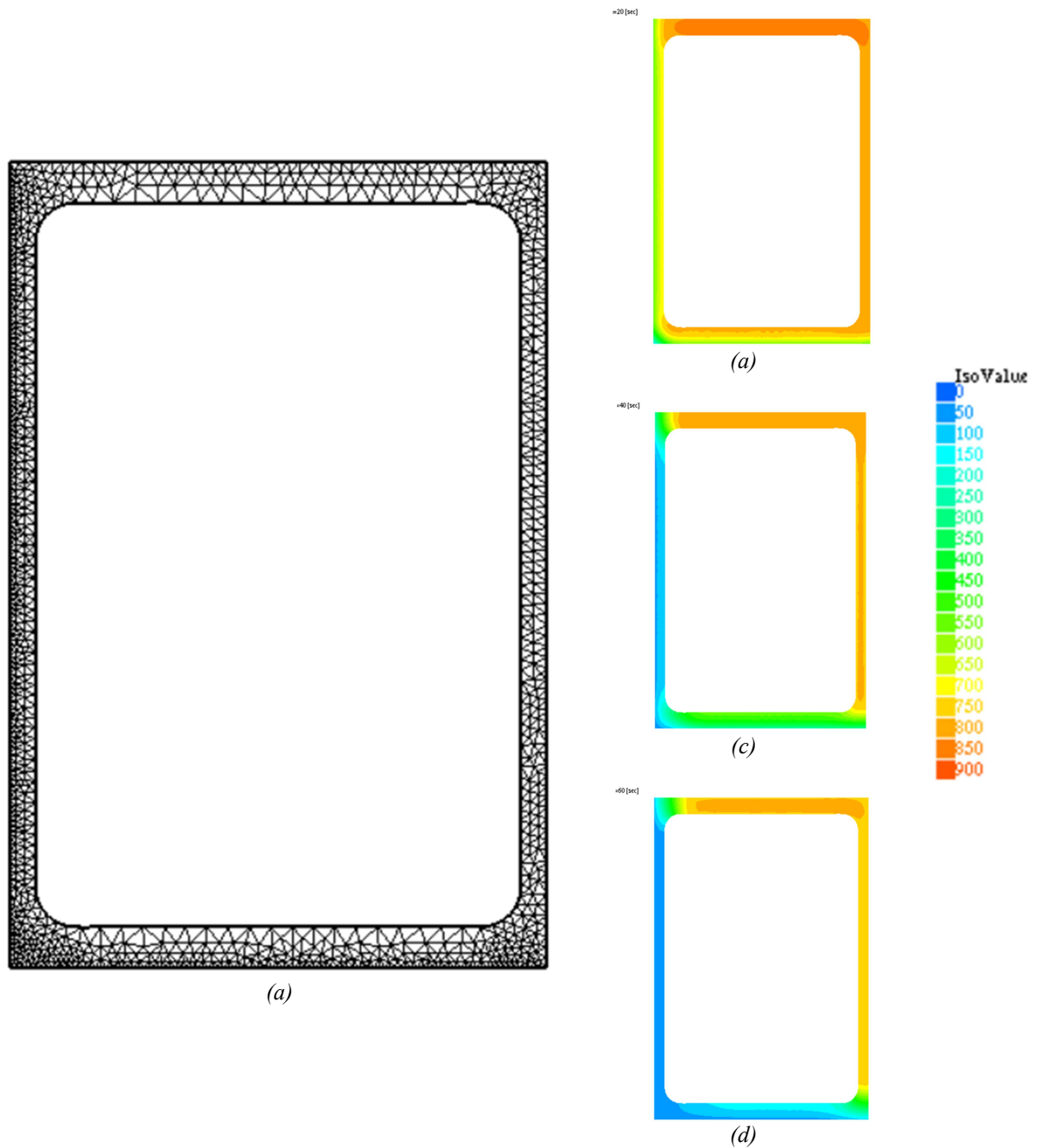


obr. 32: Srovnání průběhů teplot podle numerického modelu s experimentem (plně – teplota na povrchu; čárkovaně – teplota uvnitř)

### 8.4.2 Ocelový sloup

Ocelový sloup je z profilů 2x UPE 300, které vytváří dutý obdélníkový sloup. V numerickém modelu je sloup ochlazovaný na dvou sousedících vnějších stranách, kde je výpočetní síť rozdělena cca po 2 mm. Výpočetní síť v neochlazovaných částech profilu je rozdělena cca po 4 mm. Časový krok výpočtu je  $\Delta t = 0.2$ . Vliv dutiny ve sloupu se zanedbává, uvažuje se působení vzduchu ( $b_{AIR}$ ) s teplotou  $u_e = 8.0$ .

První měřicí bod je ve středu tloušťky pásnice vzdálenější od vodního proudu. Od osy sloupu je vzdálený 1/3 šířky profilu UPE, kde se předpokládá největší teplota. Druhý měřicí bod je na hraně sloupu, která leží na styku obou ochlazovaných ploch.



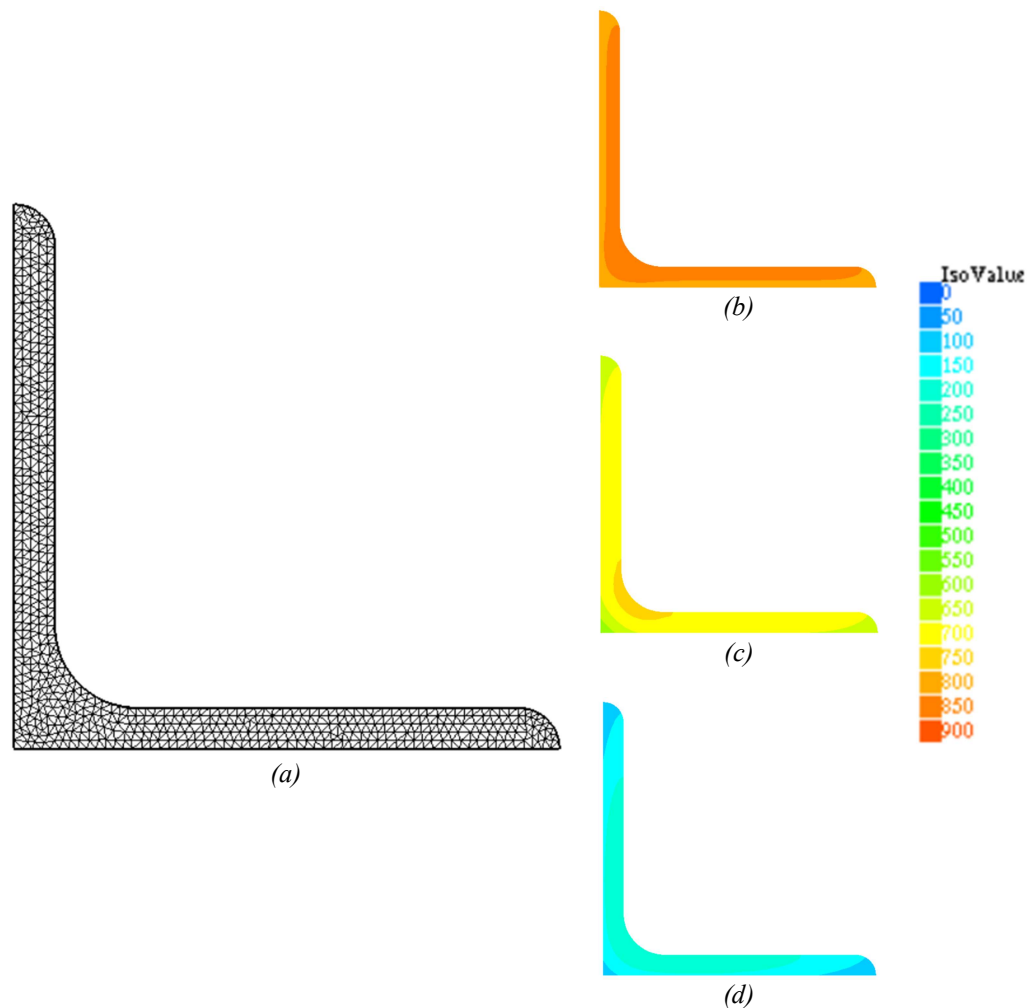
obr. 33: Ocelový sloup 2x UPE 300 – (a) výpočetní síť a měřící body; rozložení teplot po (b) 20 s; (c) 40 s; (d) 60 s

V případě obdélníkového profilu 2x UPE 300 rozložení teplot, které rozděluje profil na 2 části v místech, kde se stýkají ochlazované plochy s neochlazovanými. Ochlazovaná část profilu je po 60 s již ochlazená na běžnou teplotu, zatímco neochlazovaná část má stále teplotu blízkou teplotě před zahájením ochlazování. Pásnice se kvůli větší tloušťce ochlazují pomaleji, než stojiny. Nevzniká žádný významný gradient napříč tloušťkou stěn profilu, nepředpokládá se vznik lokálního boulení. Vzniklé rozložení teplot vyvolá podélné vybočení celého sloupu.

Případný kolaps konstrukce by byl pravděpodobně způsobený ztrátou stability v důsledku poklesu únosnosti ve vzpěrném tlaku.

### 8.4.3 Ocelové ztužidlo

Ztužidlo z ocelového profilu L 40x40x3 je v numerickém modelu ochlazované ze dvou vnějších stran profilu (ve směru osy souměrnosti). Profil je menších rozměrů a dají se očekávat rychlé změny teplot i na neochlazované části nosníku. Proto je rozlišení výpočetní sítě v celém průřezu přibližně 0,6 mm. Časový krok výpočtu je  $\Delta t = 0,05$ .



obr. 34: Ocelové ztužidlo L 40x40x3 – (a) výpočetní síť a měřicí body; rozložení teplot po (b) 2 s; (c) 6 s; (d) 12,5 s

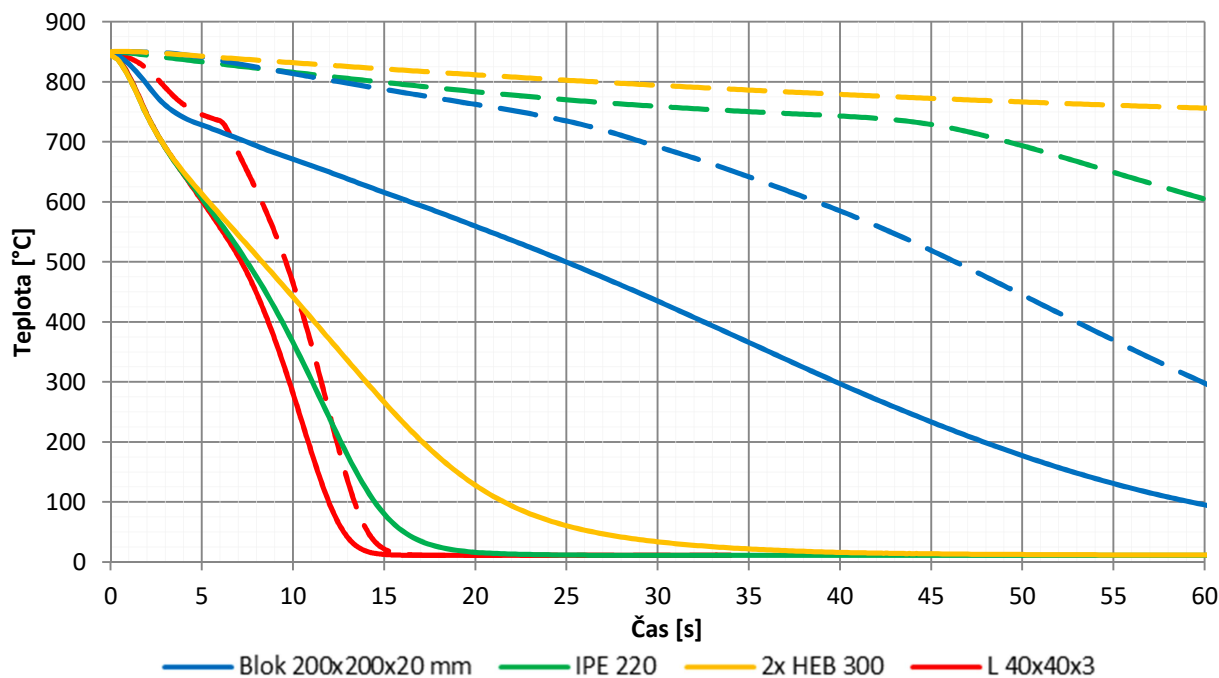
V případě profilu L není žádná část profilu „zastíněná“ před působením vodního proudu, nevzniká žádné výrazně nerovnoměrné rozložení teplot. Nejchladnějšími částmi profilu jsou konce ramen a nároží profilu. Jediný výrazný teplotní gradient vzniká na ose souměrnosti profilu. Největší rozdíl minimální a maximální teploty v průřezu je asi 80 K. Teplotní rozložení by pravděpodobně nezpůsobilo výraznou deformaci. Pokud by ztužidlo působilo v tlaku, snížila se

jeho únosnost vlivem vybočení štíhlého prutu. Nepředpokládá se, že štíhlé ocelové ztužidlo zajišťuje stabilitu objektu, k tuhosti konstrukce pouze přispívá. Při působení v tahu se nerovnoměrným rozložením teplot nesníží únosnost ztužidla.

#### 8.4.4 Vyhodnocení

Vytvořený numerický model simuluje působení plného vodního proudu na povrch ocelových prvků. Numerický model uvažuje vodní proud zjednodušeně. Působení se simuluje okrajovou podmínkou, která pevně stanovuje tepelný tok povrchem ocelového prvku v závislosti na jeho teplotě. Nesimulují se hydrodynamické jevy, např. stékání vody po povrchu.

Dle výsledků numerického modelu po aplikaci na vybrané konstrukce je možné zhodnotit, že riziko kolapsu konstrukce po aplikaci vodního proudu na ocelové konstrukce, spočívá zejména ve stabilitě tlačенých štíhlých prutů a stěn profilů. Vlivem rychlého ochlazování části povrchu prvku vzniká nerovnoměrné rozložení teplot v tenkých stěnách. Vznik imperfekcí přispívá ke ztrátě stability boulením stěn. V případě masivnějších prvků způsobí ochlazování vybočení podélné osy ocelových prvků a snížit únosnost prvku ve vzpěrném tlaku. Tažené ocelové konstrukce nejsou náchylné na přítomnost imperfekcí v konstrukci, nepředpokládá se riziko kolapsu při ochlazování vodním proudem.



obr. 35: Srovnání minimálních (plně) a maximálních (čárkovaně) teplot v různých profilech během ochlazování vodním proudem

Velké teplotní rozdíly vznikají především u profilů, kde je velká část povrchu chráněna před působením vodního proudu. U otevřených profilů s velkým povrchem v poměru k objemu, např. IPE nebo HEB, může být před vodním proudem chráněná celá jedna polovina pásnice. K ochlazování pak dochází pouze nepřímo, prostřednictvím vedení tepla do ochlazované části průřezu a v pásnici klesá teplota pomaleji, než ve zbývajících částech průřezu. Vzniká nerovnoměrné rozložení teplot, které způsobí kroucení nebo celkovou deformaci průřezu.

Plynulejší rozložení teplot vzniká u uzavřených průřezů, např. oválných, obdélníkových. Teplota profilu klesá směrem k proudnici, nepředpokládá se deformace a kroucení profilu. Přesnější působení teplotních změn na stabilitu konstrukce by bylo možné ověřit, pokud by se numerický model rozšířil o diferenciální rovnice zahrnující pružnost, pevnost a teplotní roztažnost materiálu. Téměř žádný teplotní rozdíl nevzniká u profilu L, jehož všechny stěny jsou ochlazovány alespoň z jedné strany. (obr. 35)

## 9 Závěr

V diplomové práci byly shrnuty poznatky týkající se požárního zásahu, struktury a vlastností oceli po požárním zásahu. Cílem práce bylo ověřit, jakým způsobem mohou být ovlivněny ocelové konstrukce po zasažení vodním proudem během požárního zásahu.

Konstrukční oceli zpravidla nemají vysoký obsah uhlíku a nejsou dobře kalitelné. V oceli S355 se původní feriticko-perlitická struktura přetvořila na feriticko-bainitickou. Vrubová houževnatost oceli se snížila přibližně na polovinu. Bainitická struktura oceli S700 zůstala bez výrazných změn, vrubová houževnatost byla rovněž nižší, než původní. Ve feritické struktuře oceli F36 byl částečně rozpuštěn perlit. Vrubová houževnatost oceli F36 byla po tepelné úpravě vyšší. Pevnost v tahu nebyla u ocelí zkoušena. Experimentem bylo ověřeno, že v ocelích, používaných ve stavebních konstrukcích, po prudkém ochlazení z vysoké teploty ve vodní lázni nevzniká křehká martenzitická struktura. Vlivem vzniku bainitu může být snížena houževnatost oceli.

Dalším experimentem bylo ověřeno, jak rychle jsou ocelové konstrukce ochlazované vodním proudem při požárním zásahu, v porovnání s tepelným zpracováním během prvního experimentu. Sprchový vodní proud způsobuje pomalejší pokles teploty oceli, než plný proud a z hlediska materiálových změn a deformací je šetrnější pro ocelové konstrukce. Žádný z vodních proudů neochlazuje konstrukce rychleji, než vodní lázeň, proto se nepředpokládají výrazné změny ve vlastnostech a struktuře materiálu.

Na základě výsledků experimentu s vodními proudy byl vytvořen numerický model ochlazování. Ten byl aplikován na vzorové typické ocelové konstrukce. Pomocí numerického modelu se sledoval možný vliv vodního proudu na stabilitu konstrukce. Ochlazováním konstrukce vodním proudem z jedné strany vzniká nerovnoměrné rozložení teplot v průřezu, čímž mohou vznikat imperfekce ocelové konstrukce. Únosnost tažených ocelových prvků není imperfekcemi ovlivněna. V případě tlačných prvků se deformací průřezu nebo vybočením podélné osy prvku ovlivňuje stabilita štíhlých prutů a stěn profilů.

Během ochlazování vznikají deformace materiálu vyvolané teplotní roztažností. Stabilita tlačných prvků závisí na štíhlosti konstrukce, která je daná i vzpěrnou délkou. Posouzení stability závisí na konkrétním případě. Numerický model z kapitoly 8 poskytuje nástroj, kterým lze vypočítat předpokládané deformace vyvolané vlivem teplotní roztažnosti při ochlazování vodním proudem. Získané deformace je možné využít při statickém posouzení konstrukce.



---

## Literatura

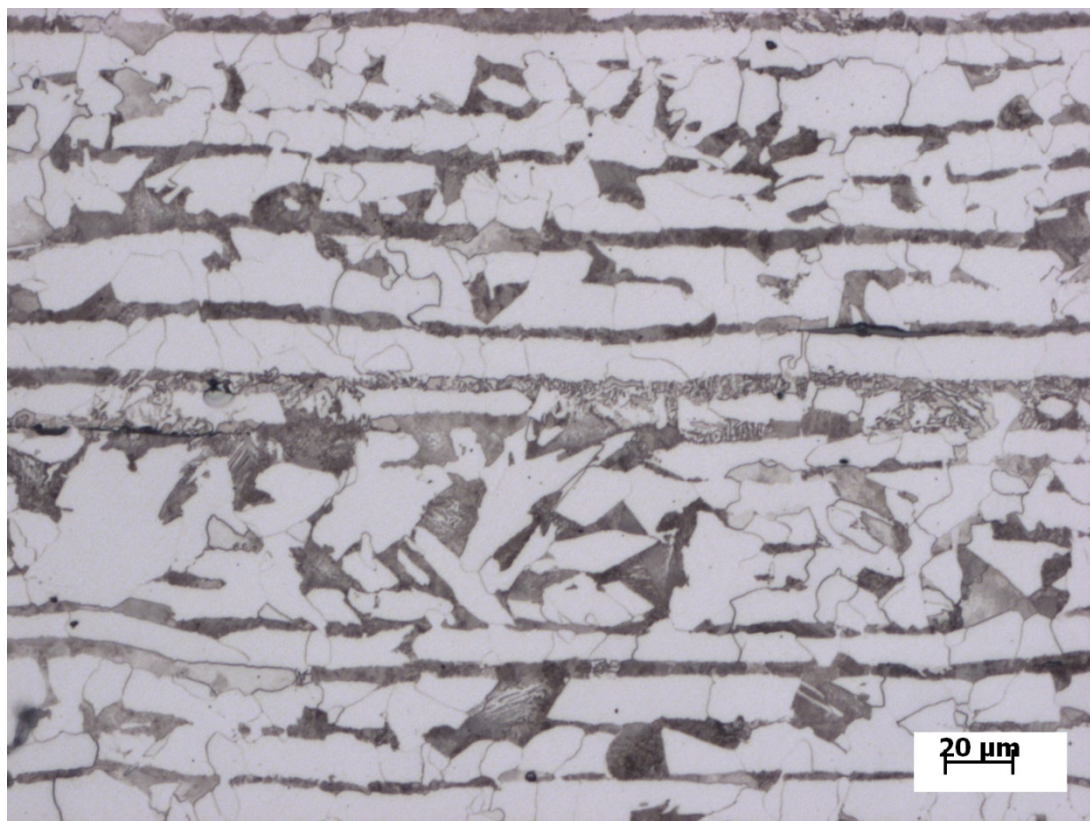
- [1] ČSN EN 1993-1-2 - Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [2] VILÍMEK, Miroslav. Konspekty odborné přípravy jednotek PO - požární taktika - základy požární taktiky. 2. aktualizované vydání. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2008. ISBN 978-80-86111-89-6.
- [3] SFPE handbook of fire protection engineering, Section 4, Chapter 6. 3rd ed. Quincy, Mass.: Bethesda, Md: National Fire Protection Association; Society of Fire Protection Engineers, 2002. ISBN 978-0-87765-451-3.
- [4] MACHT, Karel. Konspekty odborné přípravy jednotek PO - požární taktika - hasební prostředky. 2. aktualizované vydání. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2008. ISBN 978-80-86111-89-6.
- [5] MĚCHURA, František. Efektivní využití hasicích látek při požáru u bytových objektů (diplomová práce). Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013.
- [6] STUDNIČKA, Jiří. Ocelové konstrukce. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 978-80-01-02942-8.
- [7] ČSN EN 10025-2 - Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [8] ČSN EN 10149-2 - Ploché výrobky válcované za tepla z ocelí s vyšší mezí kluzu pro tváření za studena - Část 2: Technické dodací podmínky pro termomechanicky válcované oceli. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebni, 2013.
- [9] DURAND-CHARRE, Madeleine. The microstructure of steels and cast irons. Přel. James H. DAVIDSON. Berlin; New York: Springer, 2004. Engineering materials and processes. ISBN 978-3-540-20963-8.
- [10] Rovnovážený diagram metastabilní soustavy železo–uhlík [online]. [vid. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fe-C-graphite-cs.svg>
- [11] JECH, Jaroslav. Tepelné zpracování oceli - Metalografická příručka. 4. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983.
- [12] HLUCHÝ, Miroslav. Strojírenská technologie 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984.
- [13] FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. Konstrukční oceli. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996. ISBN 80-85867-95-8.

- 
- [14] ČSN EN ISO 148-1 - Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušební, 2017.
- [15] POLÍVKOVÁ, Tereza. Chlazení ocelových konstrukcí pomocí sprinklerů. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT v Praze.
- [16] WALD, František. Konstrukční ocel vystavená požáru a hašení. B.m.: ČVUT v Praze. 2018
- [17] Objemový průtok proudnicí Tajfun - Profi C [online]. B.m.: Pavliš a Hartmann. 3. červen 2019. Dostupné z: [https://www.php.cz/data/filecache/7e/@556x0/obrazek\\_388.jpg](https://www.php.cz/data/filecache/7e/@556x0/obrazek_388.jpg)
- [18] Solid to particle heat transfer in FDS. In: FDS and Smokeview Discussions [online]. Dostupné z: <https://groups.google.com/d/topic/fds-smv/z9j-VnsOBrw/discussion>
- [19] HECHT, Frédéric. Freefem++ Manual. Third Edition, Version 3.56-2. Paris: Laboratoire Jacques-Louis Lions, Université Pierre et, 2012.
- [20] WALKER, Jearl. Boiling and the Leidenfrost effect. Physics Education 29. 1994.

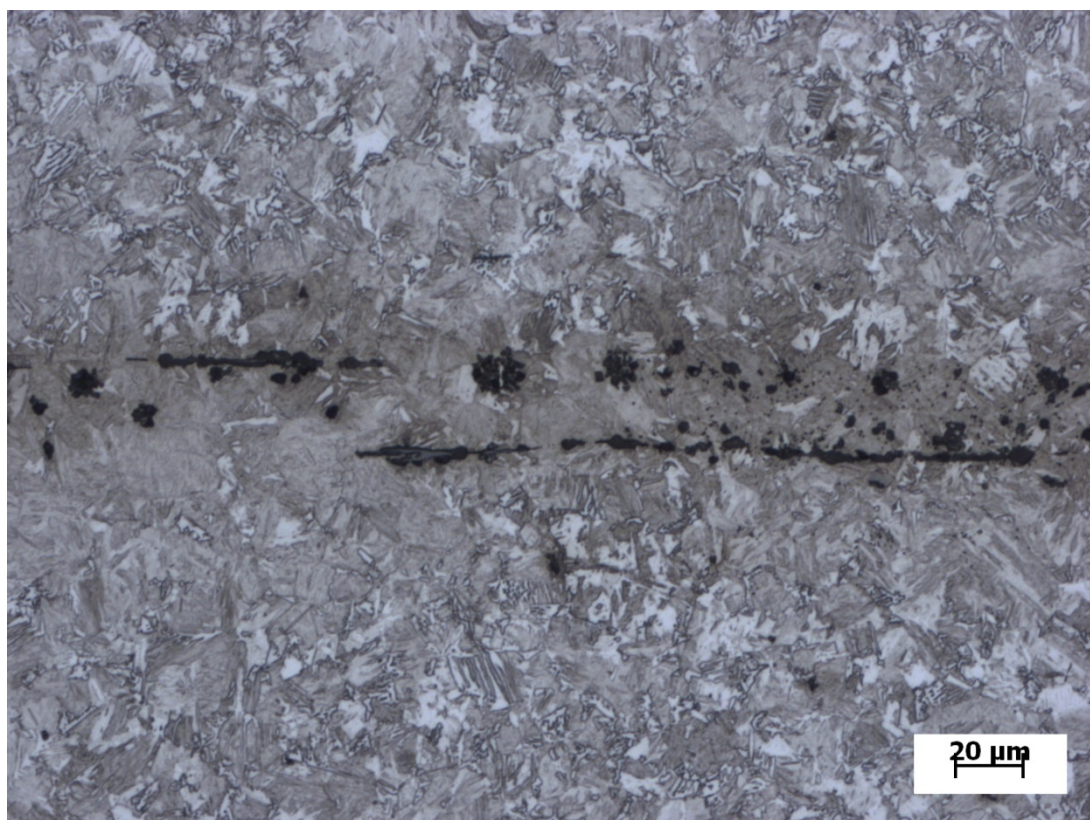
## Příloha A – metalografické snímky

### Ocel S355J2

Před tepelným zpracováním



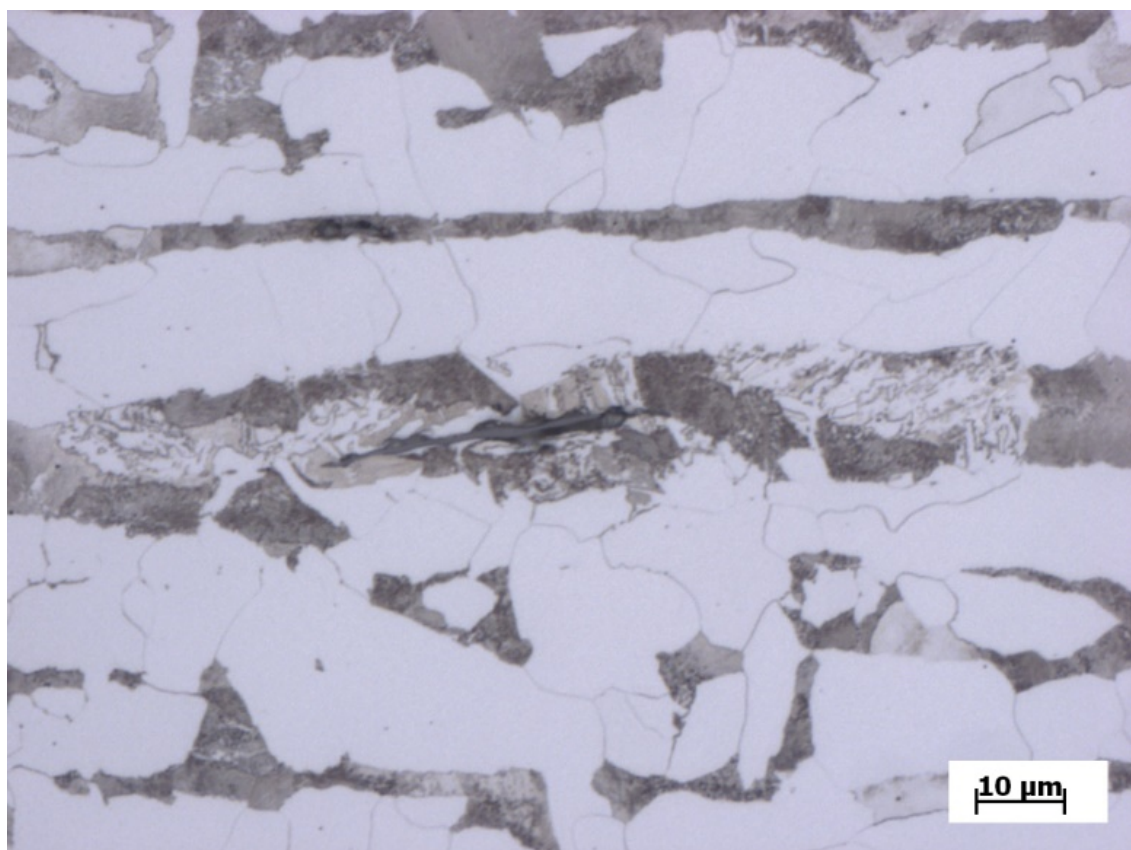
Po tepelném zpracování



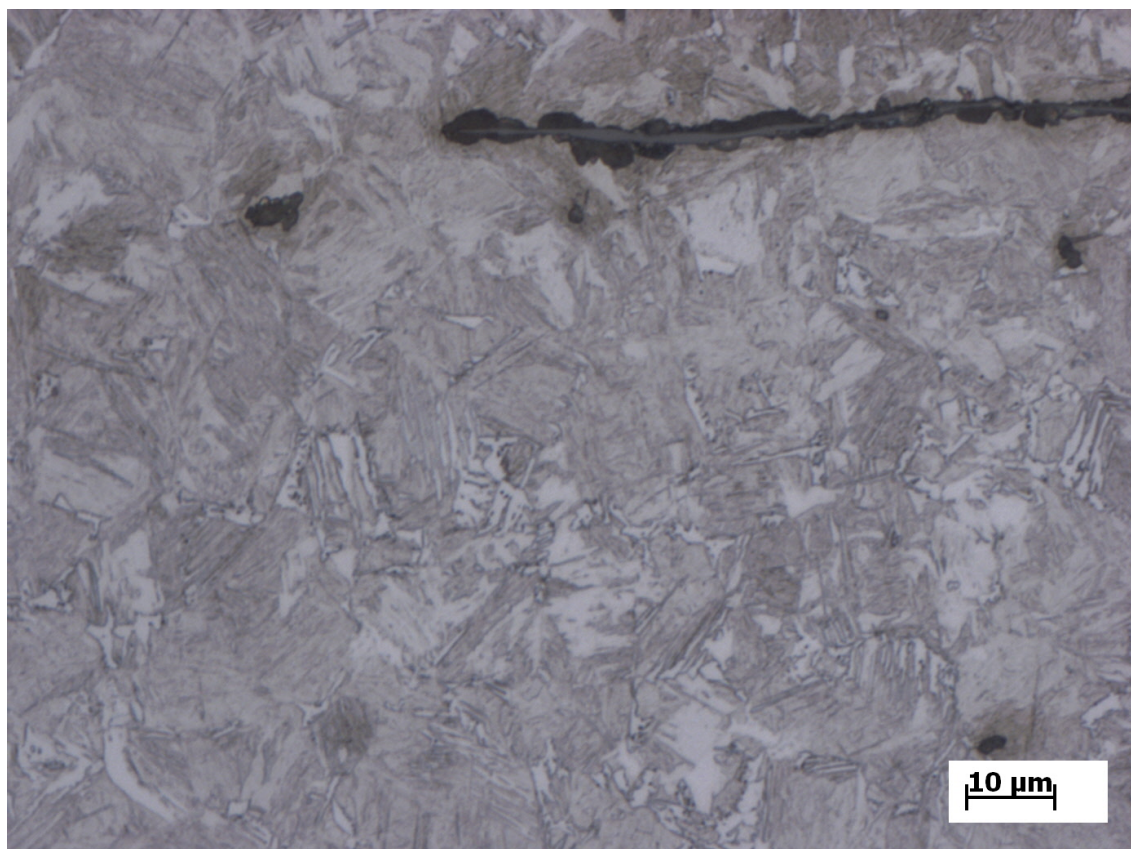


**Ocel S355J2**

Před tepelným zpracováním



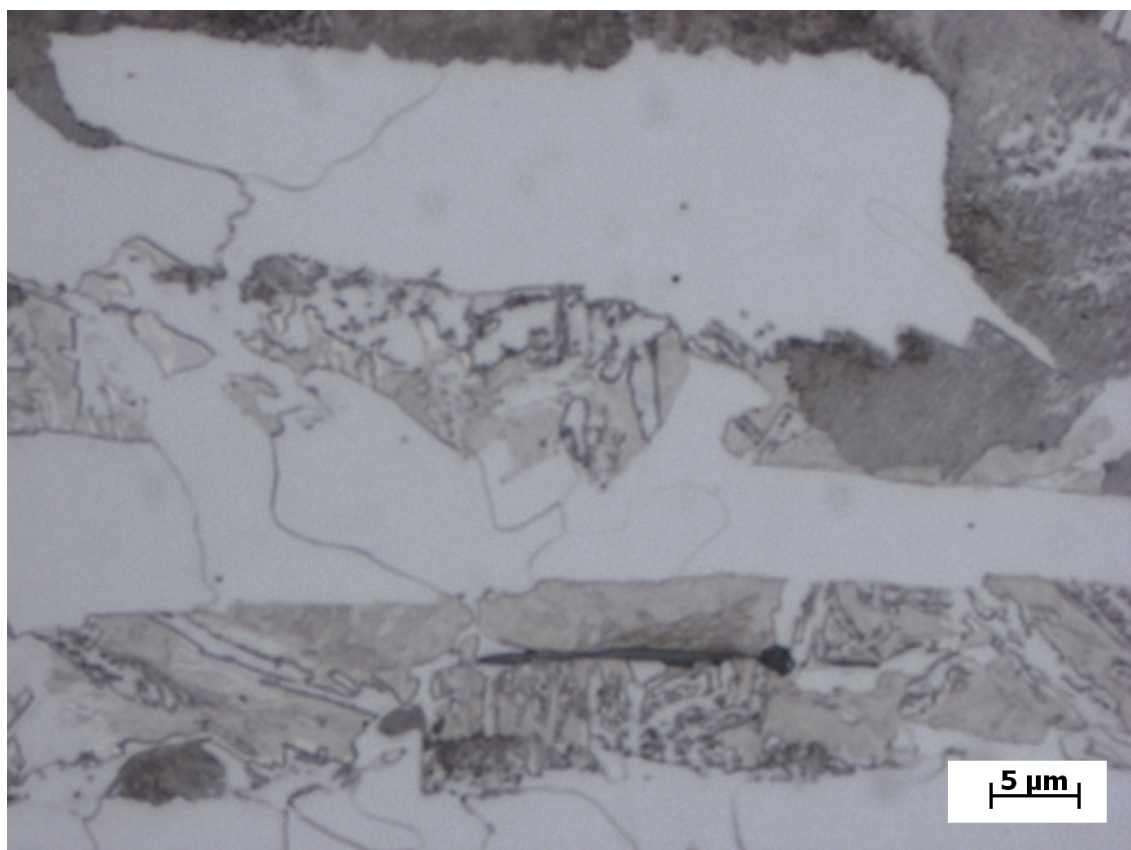
Po tepelném zpracování



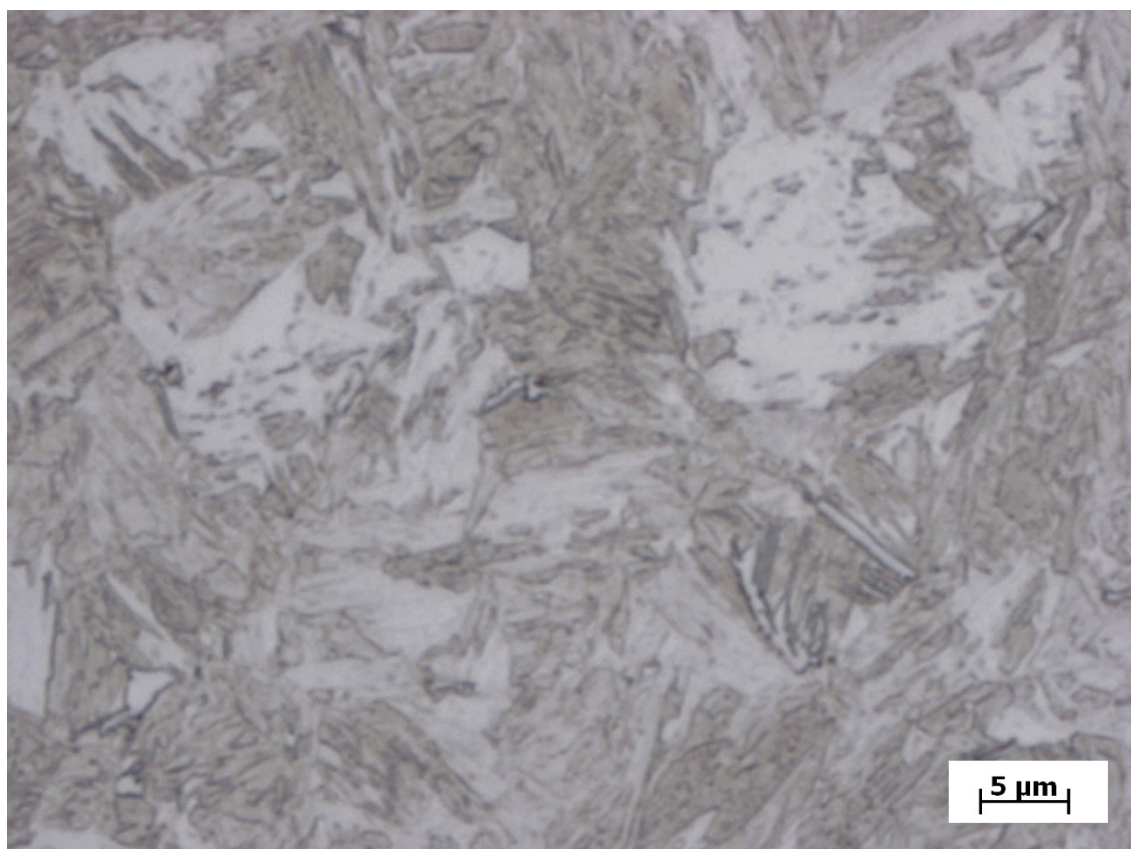


**Ocel S355J2**

Před tepelným zpracováním



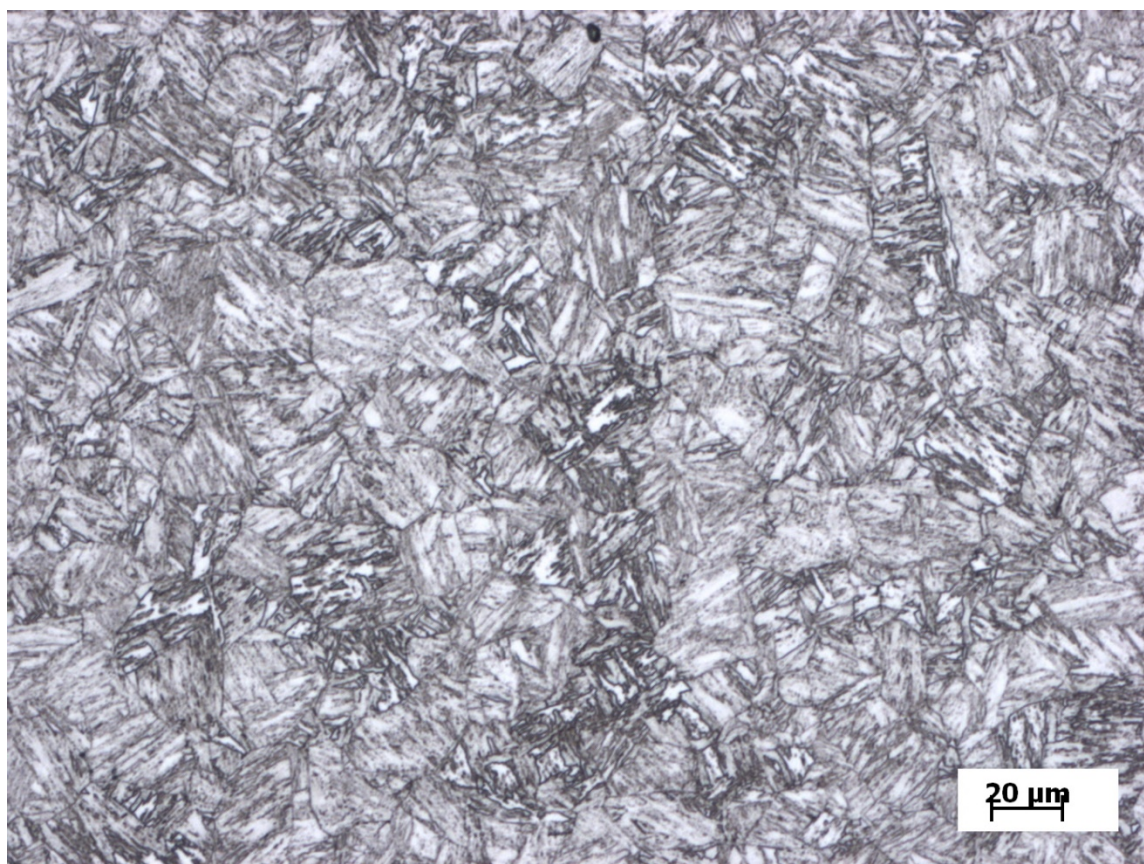
Po tepelném zpracování



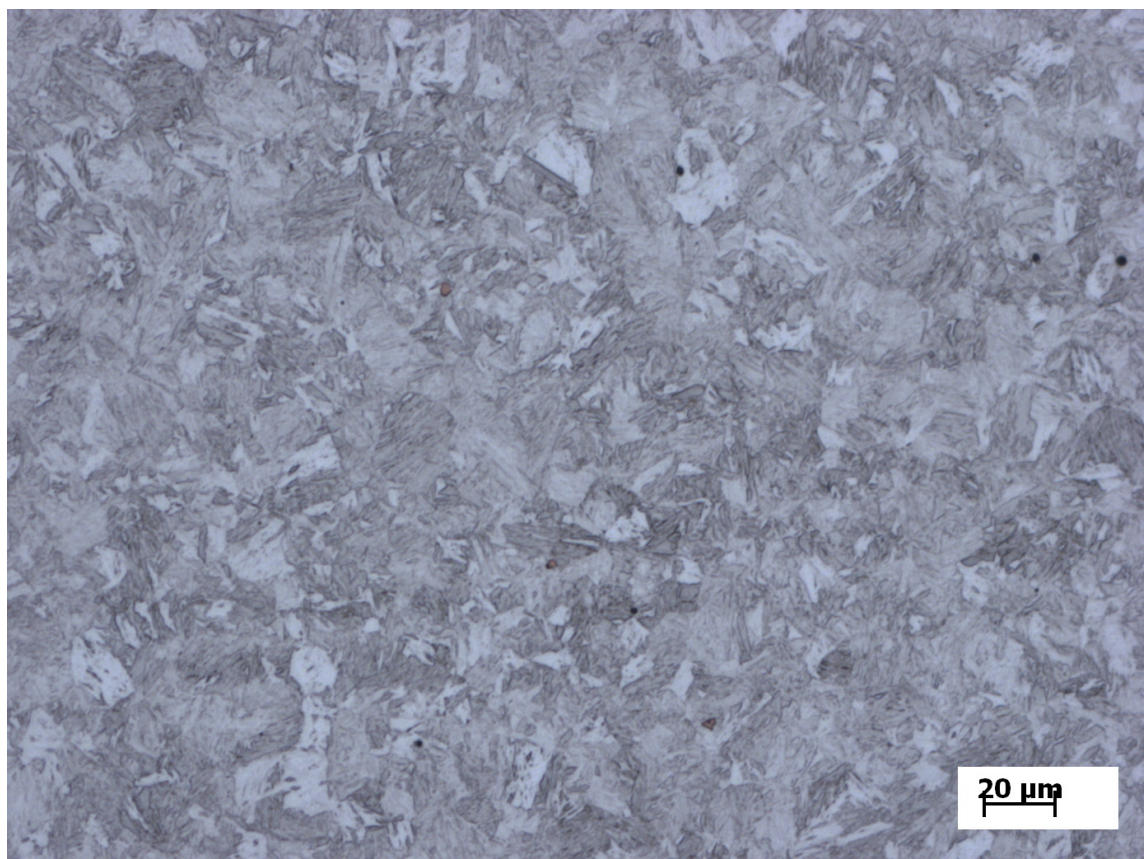


## Ocel S700

Před tepelným zpracováním



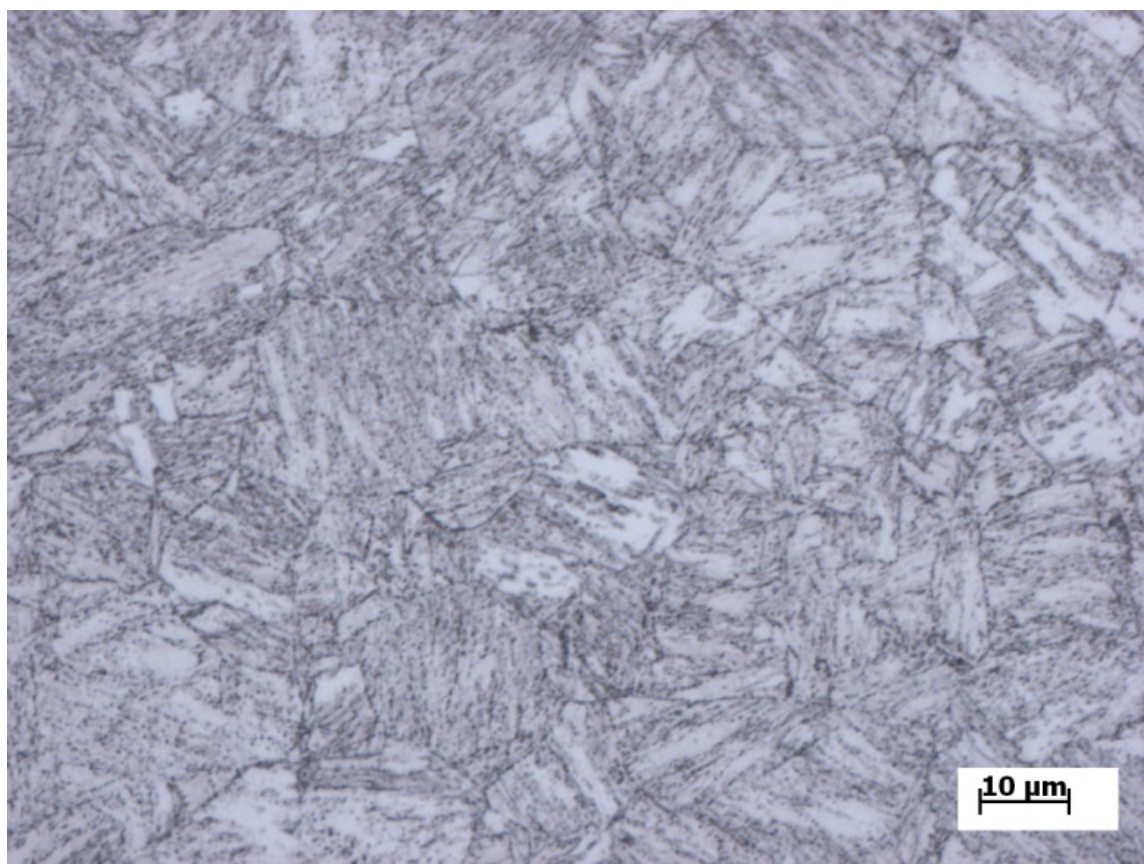
Po tepelném zpracování



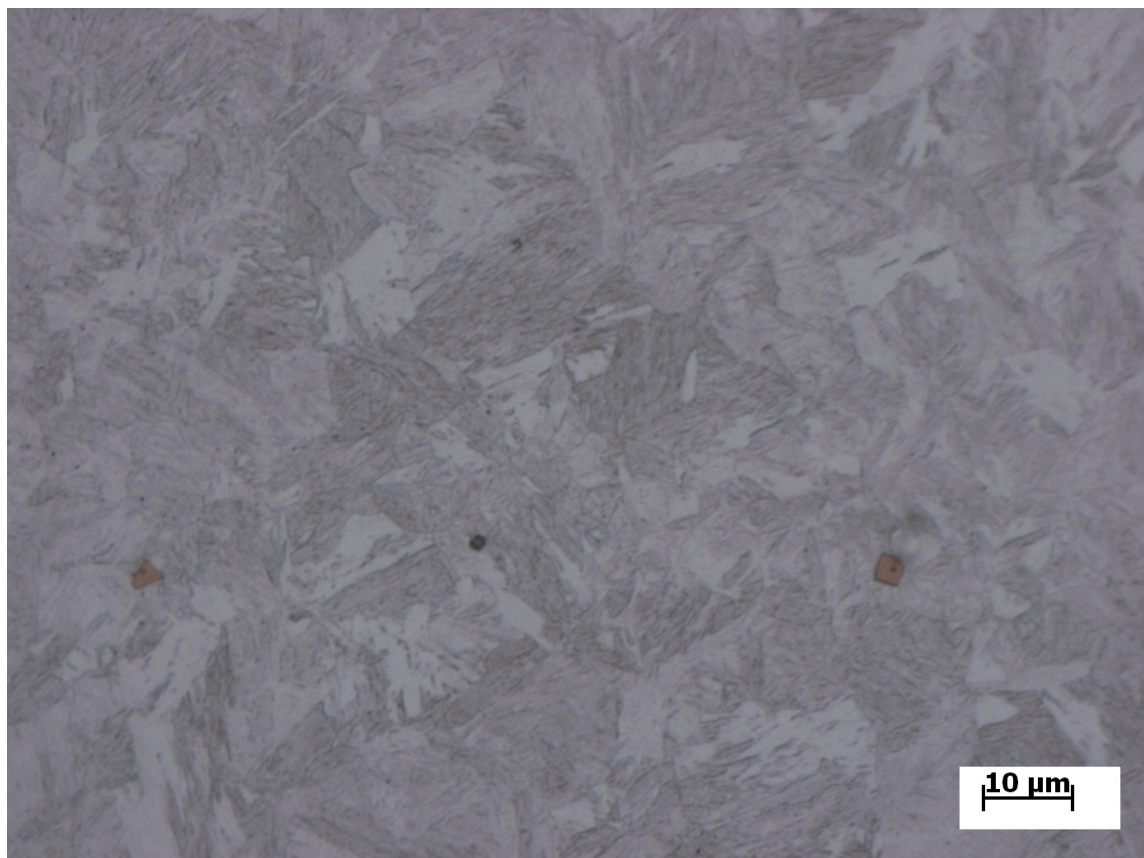


## Ocel S700

Před tepelným zpracováním



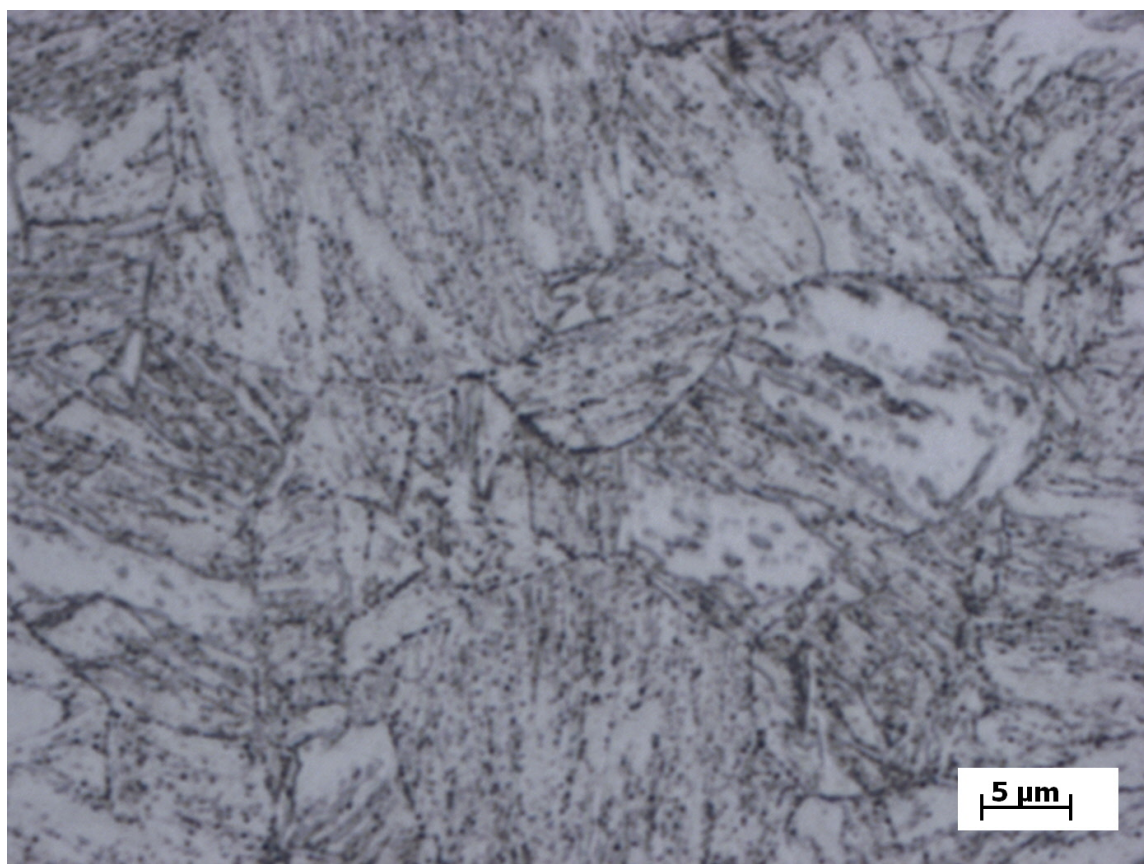
Po tepelném zpracování



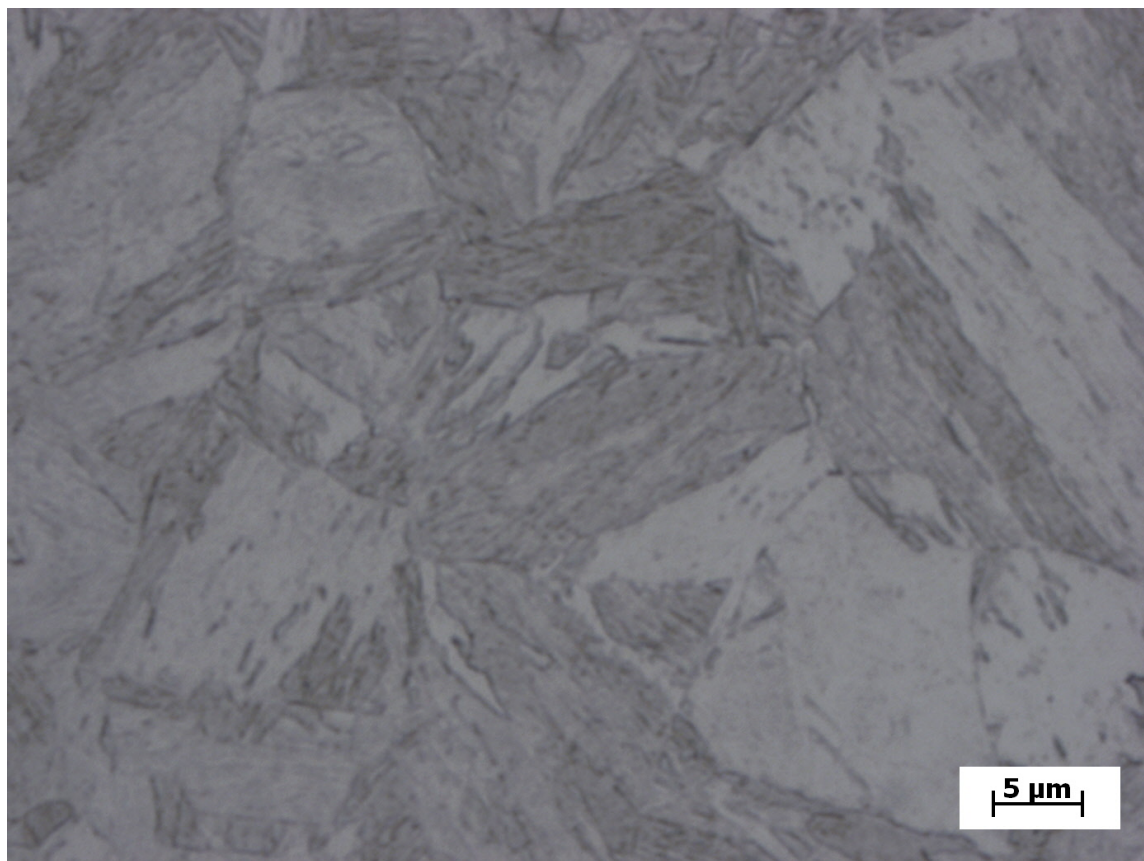


**Ocel S700**

Před tepelným zpracováním



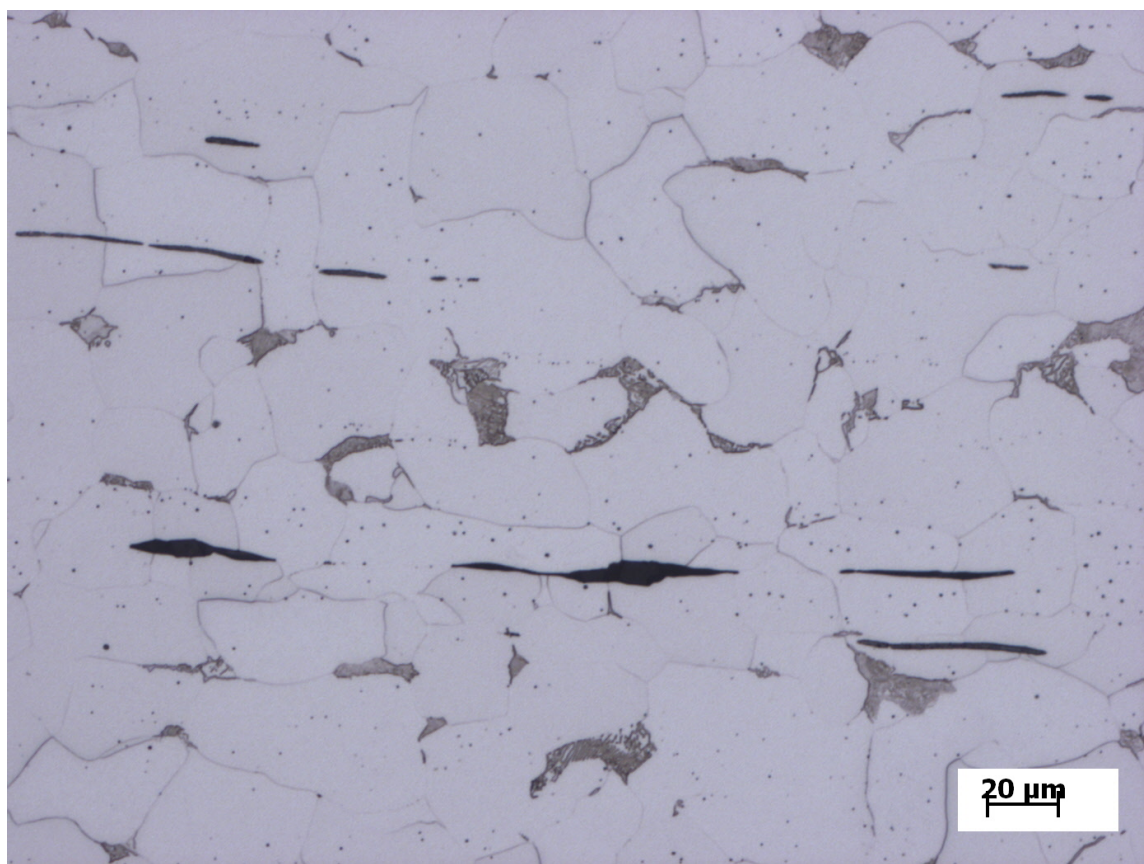
Po tepelném zpracování



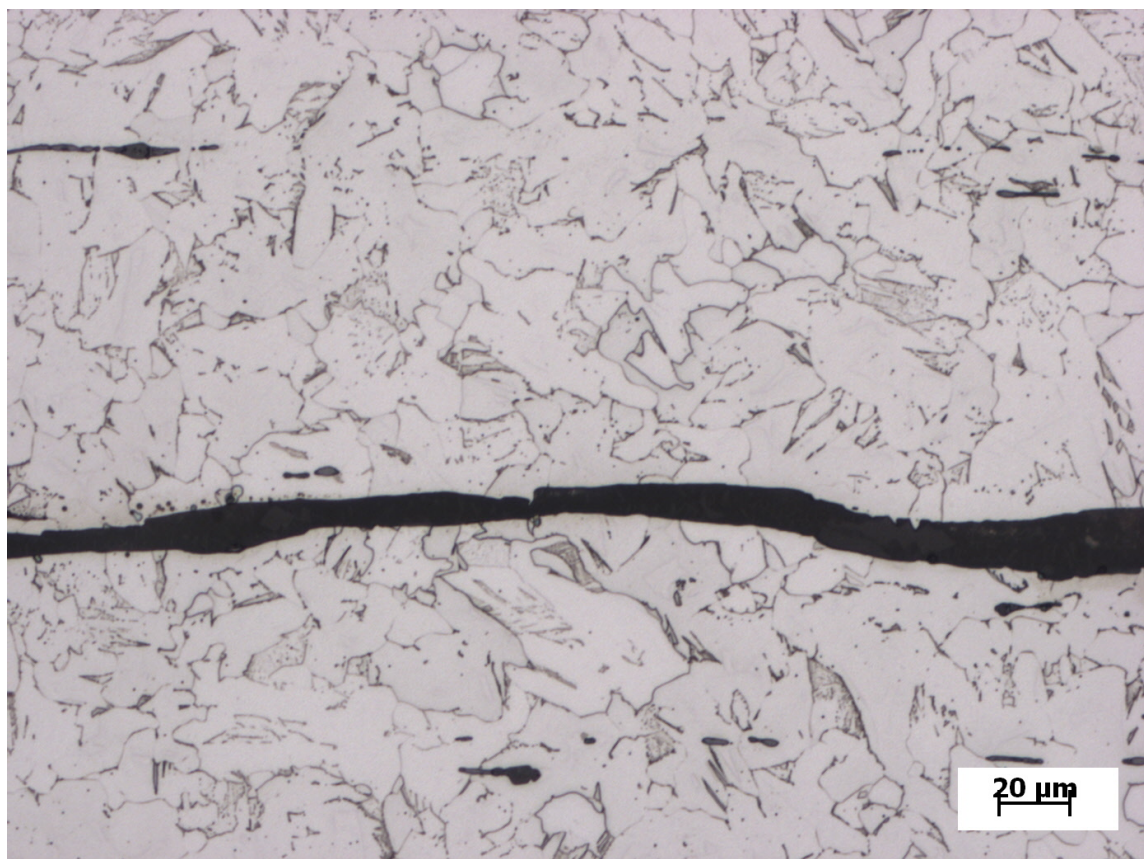


## Ocel F36

Před tepelným zpracováním



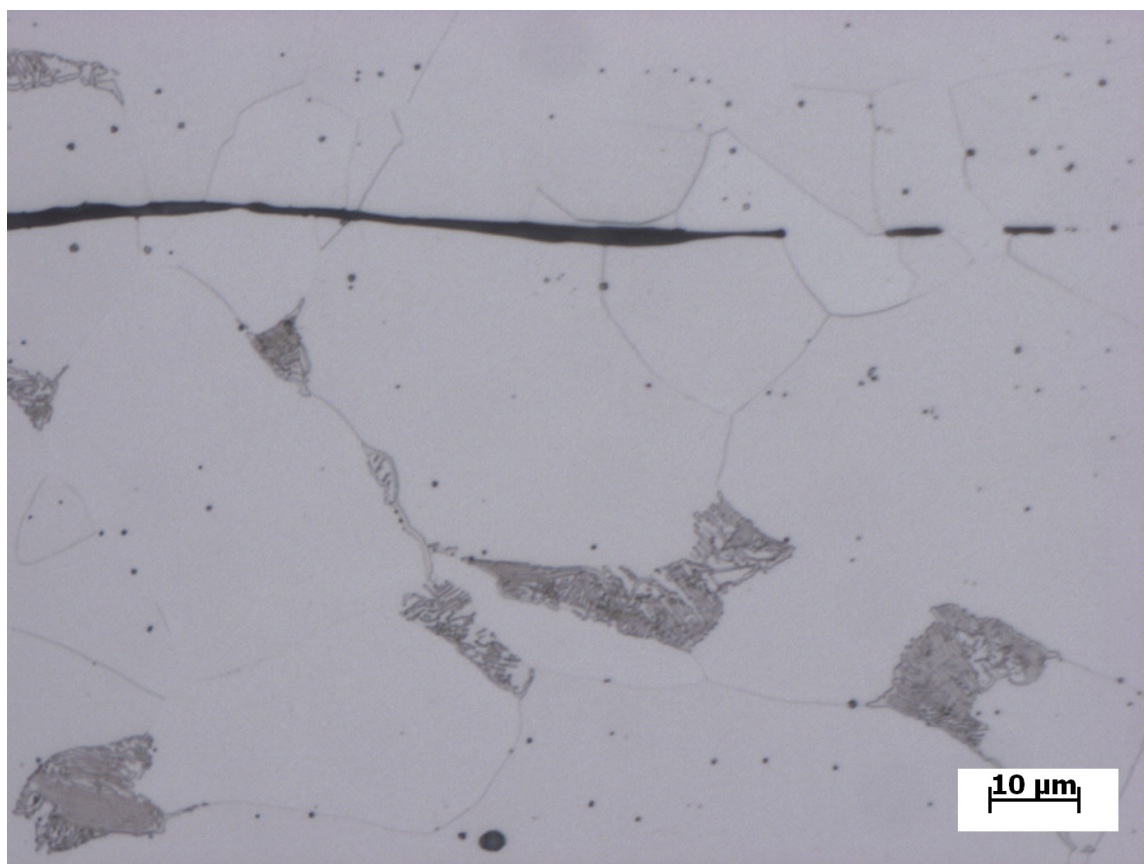
Po tepelném zpracování



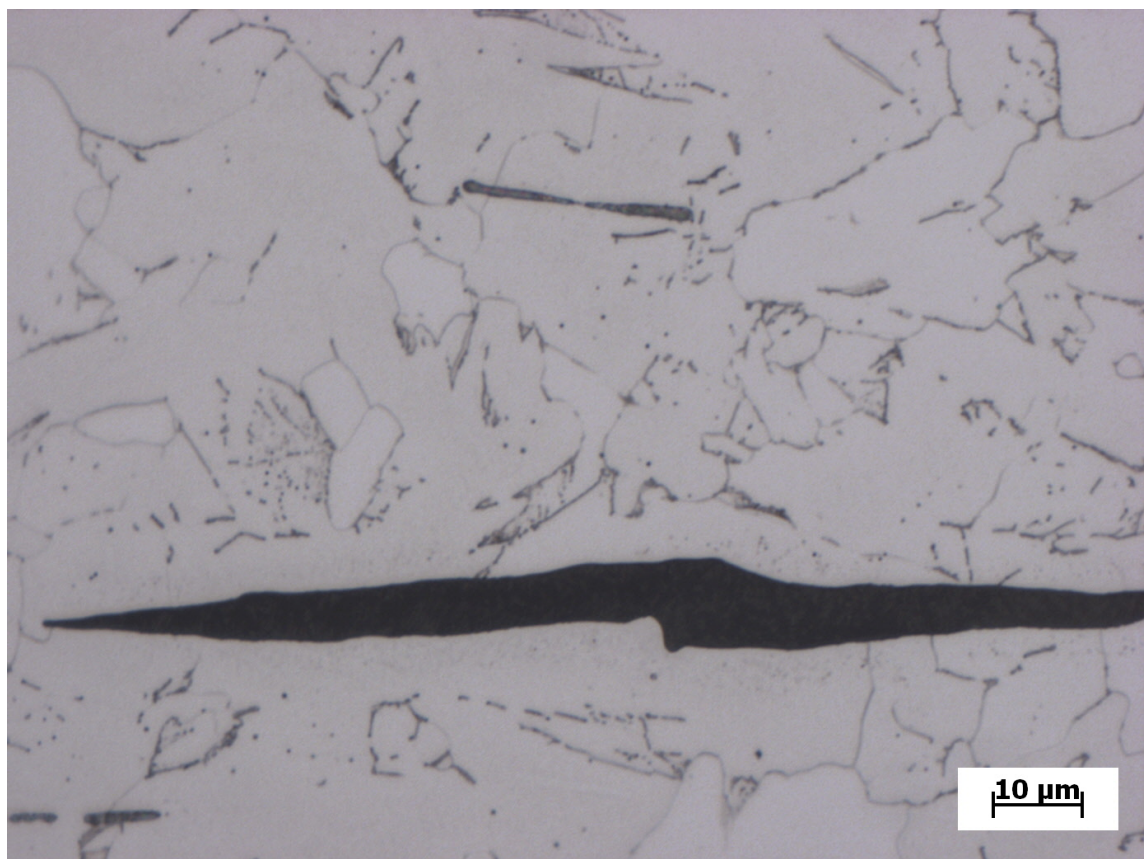


## Ocel F36

Před tepelným zpracováním



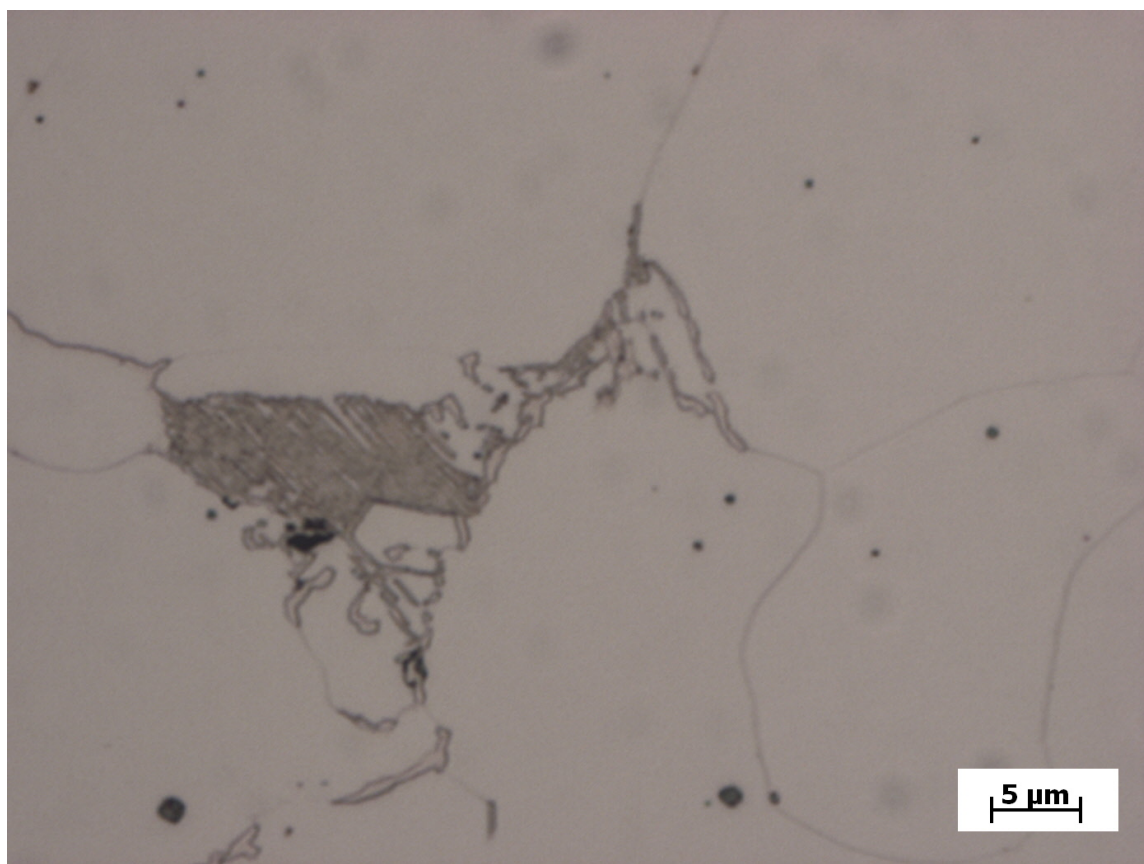
Po tepelném zpracování



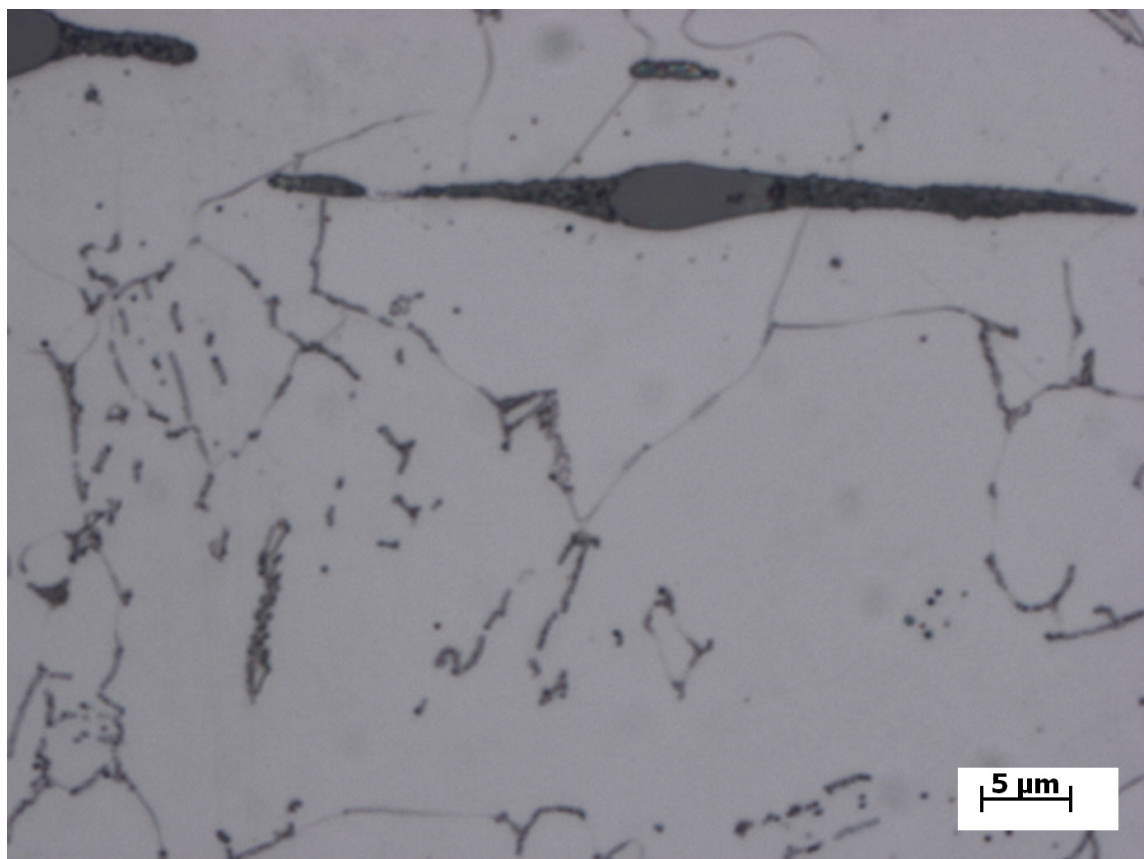


Ocel F36

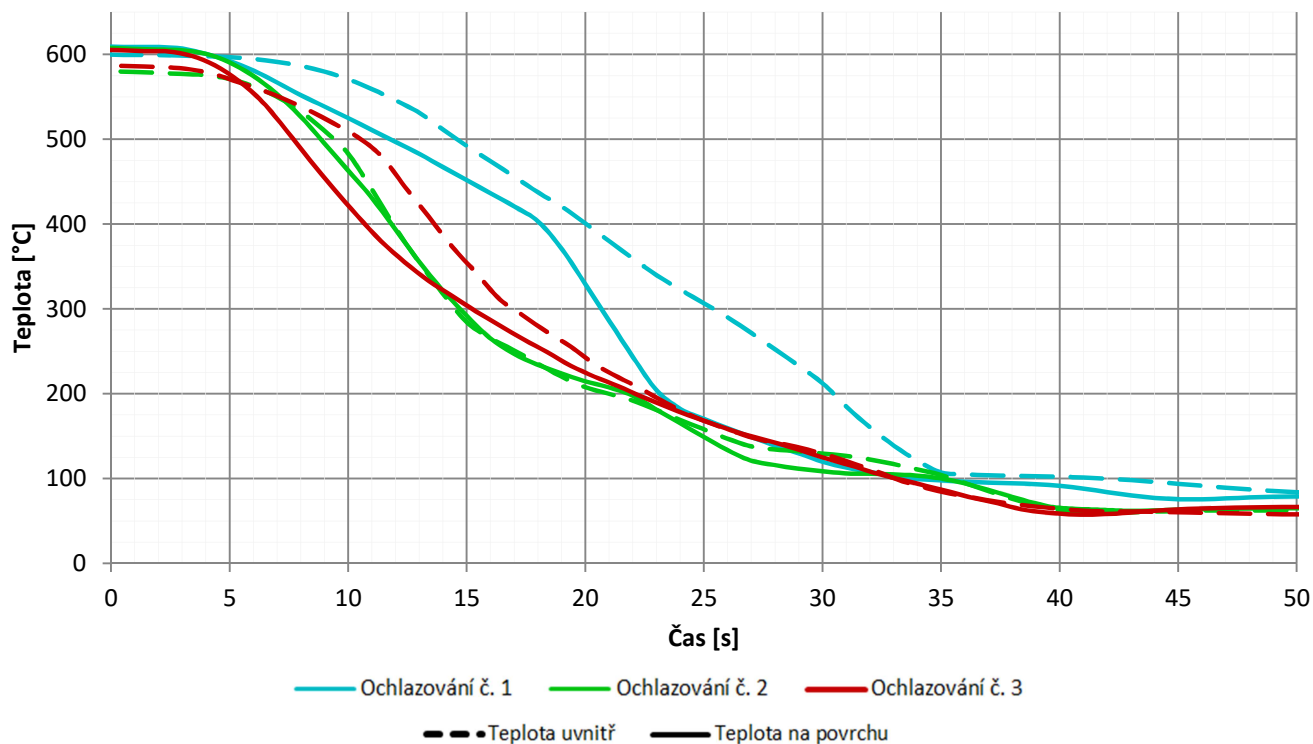
Před tepelným zpracováním



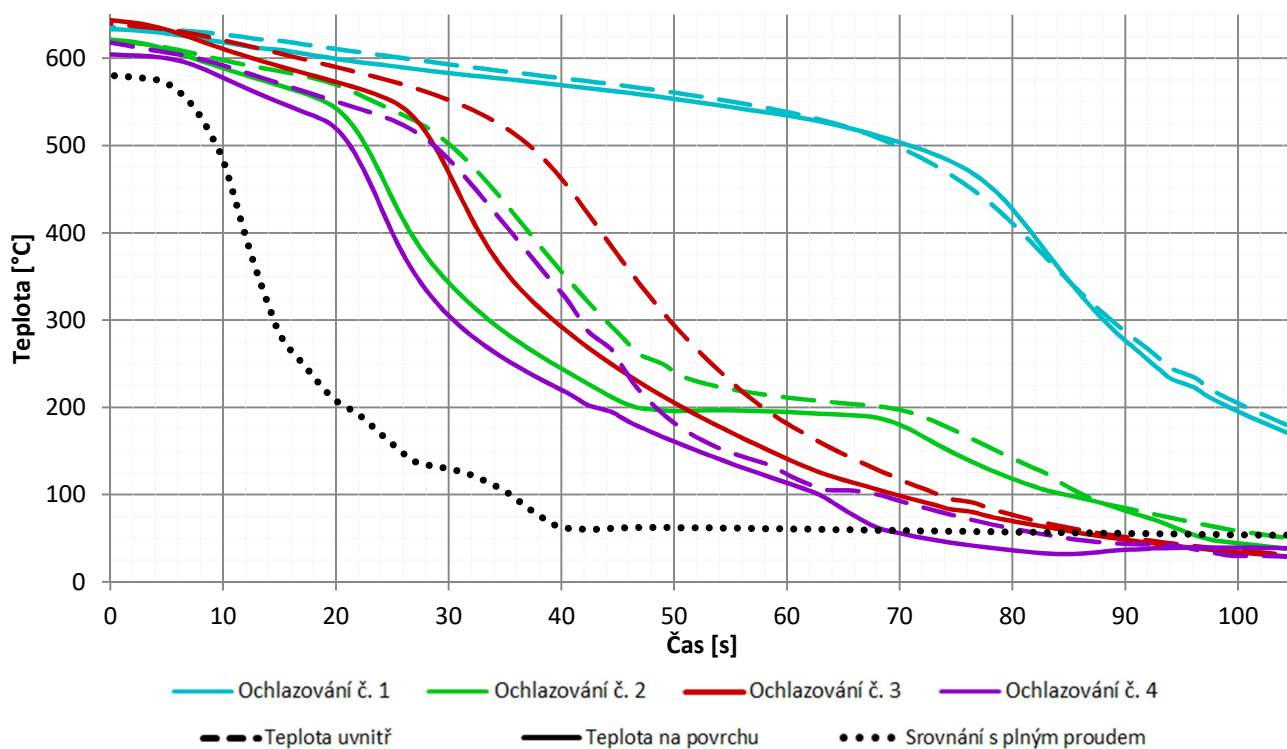
Po tepelném zpracování



## Příloha B – ochlazování vodním proudem



Zaznamenaný průběh teplot uvnitř a na povrchu vzorku během ochlazování plným proudem (bez opravy odchylky termočlánku)



Zaznamenaný průběh teplot uvnitř a na povrchu vzorku během ochlazování sprchovým proudem (bez opravy odchylky termočlánku)





*Ohřev vzorku oceli hořákem se směsí kyslíku a acetylenu*



*Ochlazování vzorku plným proudem*



*Ochlazování vzorku sprchovým proudem (úhel rozstříku cca 75°)*



*Ochlazování vzorku sprchovým proudem (úhel rozstříku cca 30°)*



*Ochlazování vzorku sprchovým proudem*



*Ochlazování vzorku sprchovým proudem*



## Příloha C – zdrojový kód numerického modelu

Přiložený zdrojový kód numerického modelu v programu FreeFEM++ je zjednodušený. Pro přehlednost je vymazána definice profilů IPE, UPE a L. Pro názornost je ponechána pouze definice zkušební vzorku, průřezu 200x20 mm. Postup pro definici výpočetní sítě je popsán v dokumentaci software [19]. Části kódu, které se týkají definice výpočetní sítě, jsou zvýrazněné. Výpočetní síť má být přiřazena do proměnné `Th`. K definici poloh měřících bodů slouží proměnné `tclX1`, `tclX2`, `tclY1` a `tclY2`.

```
real t;      mesh Th;
int pIPE=1; int pL=2; int pVzorek=3; int pUPE=4;
real tclX1; real tclX2; real tclY1; real tclY2;

// PARAMETRY SIMULACE //
real minvalue = 0.0;      real maxvalue = 850.0;
real dt=0.2;              real timestep=0.2;
real tend=80.20;         real coolingStart = 0.0;
func uinit = 850.0;      int profile = pVzorek;

// OKRAJOVE PODMINKY //
//-----//
int bINERT=99;    // inertní
int bAIR=98;     // v kontaktu s okolnim vzduchem
int bWATER=97;   // vodni proud
int bTEMP=96;    // pevná teplota

// VZDUCH //
real ue=8.0;      real aair=12.0;
real stephboltz = 0.0000000567;
real epsilonA = 1.0;          real epsilonB = 1.0;

// VODA //
real uw=11.0;

// PEVNA TEPLOTA //
real ufix=25.0;

//////////
// DEFINICE VYPOCETNI SITE //
//////////
if (profile==pL) {
    // tclX1 = ...; tclX2 = ...;
    // tclY1 = ...; tclY2 = ...;
    // border C311(t=0., 1.) {x= ...; y= ...; label=bWATER;}
    // border C312(t=0., 1.) {x= ...; y= ...; label=bAIR;}
    .
    //Th=buildmesh( C311(60) + C312(9) + ..... );
    cout << "Profil L 40x40x3 není definovaný!" << endl;
} else if (profile==pUPE) {
    cout << "Profil 2x UPE 300 není definovaný!" << endl;
} else if (profile==pIPE) {
    cout << "Profil IPE 220 není definovaný!" << endl;
} else {
    tclX1 = 0.0200;  tclX2 = 0.0100;
}
```

```

tclY1 = 0.1000;  tclY2 = 0.1000;
border C11(t=0., 1.){x= 0.00+0.02*t; y= 0.00+0.00*t; label=bAIR;}
border C12(t=0., 1.){x= 0.02+0.00*t; y= 0.00+0.20*t; label=bWATER;}
border C13(t=0., 1.){x= 0.02-0.02*t; y= 0.20+0.00*t; label=bAIR;}
border C14(t=0., 1.){x= 0.00+0.00*t; y= 0.20-0.20*t; label=bAIR;}
Th=buildmesh( C11(5) + C12(100) + C13(5) + C14(50) );
}
plot(Th,wait=1,boundary=true);

////////////////////////////////////
// VLASTNOSTI MATERIALU //
////////////////////////////////////
real dens = 7850.0; // Hustota
func real capacity(real t) { // Tepelna kapacita
  if (t <= 20.0) { return 425.0; }
  else if (t <= 600.0)
    { return 425.0+0.773*t-0.00169*(t^2)+0.00000222*(t^3); }
  else if (t <= 735.0) { return 666.0+13002.0/(738.0-t); }
  else if (t <= 900.0) { return 545.0+17820.0/(t-731.0); }
  else { return 650.0; }
};
func real conduct(real t) { // Tepelna vodivost
  if (t <= 20.0) { return 54.0; }
  else if (t <= 800.0) { return 54.0-0.0333*t; }
  else { return 27.3; }
};

////////////////////////////////////
// DEFINICE VEDENI TEPLA //
// A OKRAJOVYCH PODMINEK //
////////////////////////////////////
func bool cooling() {
  if (t > coolingStart){ return true; }
  else { return false; }
};

func real alphawater(real temp) {
  real alwat;
  if (temp < 15.0)
    { alwat = 26276.8; }
  else if (temp < 923.0)
    { alwat = 6.32 * temp * atan(temp) - 4579 * log(16 * temp ^ 2 + 1)
      + 66974; }
  else
    { alwat = 1713.9; }
  real delay = 2.5;
  real coef = max(min((t - coolingStart) / delay,1.0),0.0);
  return alwat * coef;
};

fespace Vh(Th,P1);
Vh u,v,u0,u00,s1,s2,b1,b2;
real uek = ue+273.; u0=uinit; u=u0;
func f=1.;
problem thermic(u, v) =
  int2d(Th) (capacity(u0)*dens*u*v/dt +
             conduct(u0)*(dx(u)*dx(v)+dy(u)*dy(v)))
  - int2d(Th) (capacity(u0)*dens*u0*v/dt + f*v)
  + int1d(Th,bAIR) (b1*s1*v)

```



```

+ intld(Th,bWATER)((!cooling()) *b1*s1*v)
+ intld(Th,bWATER)(( cooling()) *b2*s2*v)

+ on(bTEMP, u=ufix);

// DEFINICE BAREVNE SKALY //
////////////////////////////////////
real[int] colorhsv=[
    4./6.,1,1, // blue
    3./6.,1,1, // cyan
    2./6.,1,1, // green
    1./6.,1,1, // yellow
    0./6.,1,1  // red
];
real[int] viso(18);
real valstep = (maxvalue-minvalue) / (viso.n-1);
for (int i = 0; i < viso.n; i++)
    viso[i] = minvalue+i*valstep;

// INICIALIZACE VYPOCTU //
//-----//
int step=1;
int stinterval=timestep/dt;
ofstream out1("thermic.dat");
plot(u, cmm="t="+0+" [sec]", dim=2, wait=false,
     fill=true, value=true, boundary=false,
     ColorScheme=0, viso=viso(0:viso.n-1), hsv=colorhsv);
out1 << t << ", " << u(0.02, 0.1) << ", " << u(tclX2, 0.1) << endl;

for (t=dt;t<=tend;t+=dt) {
    u00 = u;
    for (int m=0; m<1; m++) {
        u00 = (u + u00)/2;
        s1 = u-ue;
        s2 = u-uw;
        b1 = aair + stepboltz * epsilonA * epsilonB * (s1+2*uek) * ((s1+uek)^2
+ uek^2);
        b2 = alphawater(u00);
        thermic;
    }
    u0=u;

    plot(u,
         cmm="t="+t+" [sec]",
         dim=2, wait=0,
         fill=true, value=true, boundary=false,
         ColorScheme=0, viso=viso(0:viso.n-1), hsv=colorhsv
    );

    // vypis do souboru
    out1 << t << ", " << u(tclX1, tclY1) << ", " << u(tclX2, tclY2) << endl;
    cout << " t=" << t << endl;
    step+=1;
}

```