

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

MINIMALIZACE ZBYTKOVÉHO NAPĚTÍ PŘI DOCHLAZOVÁNÍ  
VÁLCOVANÝCH PROFILŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. PETR KUBÍK

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A  
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND  
BIOMECHANICS

## MINIMALIZACE ZBYTKOVÉHO NAPĚTÍ PŘI DOCHLAZOVÁNÍ VÁLCOVANÝCH PROFILŮ

MINIMIZATION OF RESIDUAL STRESSES FOR ROLLED LONG PRODUCTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR KUBÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. JINDŘICH PETRUŠKA, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky  
Akademický rok: 2008/09

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Kubík Petr, Bc.

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

obor: **Inženýrská mechanika a biomechanika (3901T041)**

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

### **Minimalizace zbytkového napětí při dochlazování válcovaných profilů**

v anglickém jazyce:

#### **Minimization of residual stresses for rolled long products**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při válcování profilů jsou používány dochlazovací online systémy. Tyto systémy řídí intenzitu chlazení na povrchu tak, aby bylo dosaženo předepsané výsledné struktury materiálu. Při intenzivním a nehomogenním chlazení povrchu dochází ke vzniku velkých teplotních deformací a ke vzniku výrazných zbytkových napětí.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je optimalizovat rozložení chlazení pro snížení zbytkových napětí při válcování kolejnic. Úloha bude řešena na základě 3D matematického modelu zpracovaného v systému Ansys. Pro řešení budou využity okrajové podmínky získané experimentálně v Laboratoři přenosu tepla a proudění na Fakultě strojního inženýrství.

Seznam odborné literatury:

Janíček,P., Ondráček,E.: Mechanika těles – Pružnost a pevnost I, II, Skripta VUT v Brně, CERM, 2004, 2006

Elfmark J., a kol.: Tváření kovů, SNTL Praha, 1992

Pešina, E.: Základy užité teorie plasticity, SNTL Praha, 1966

Vedoucí diplomové práce:prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/09.

V Brně, dne 18.11.2008



prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## ANOTACE

V této práci je provedena simulace chlazení kolejnice při průjezdu chladícím zařízením, které navrhla laboratoř přenosu tepla a proudění. Ve výpočtovém modelování jsou nastaveny vstupy do algoritmu řešení problému tak, aby se výstupy co nejlépe shodovaly s výsledky z experimentálního měření. V první části řešení je provedena simulace na modelu materiálu s vlastnostmi austenitické nerezové oceli. Poté je jako model materiálu použita uhlíková ocel, u které dochází k uvolnění latentního tepla při fázové přeměně. V další části je na tomto modelu vyhodnoceno reziduální napěťové pole pro různé režimy, kde se mění intenzita a doba chlazení.

Klíčová slova: chlazení kolejnice, chladící zařízení, uvolňování latentního tepla, vyhodnocení reziduálního napětí

## ANNOTATION

This thesis deals with simulation of cooling of rail during its passing through cooling device which has been designed by the heat transfer and fluid flow laboratory. Inputs of the computational model have been set up to get best possible correspondence between outputs of the computational model and results of experimental measurement. The solution with using of model of austenitic stainless steel is provided in first part of the thesis. The solution with considering model of carbon steel is performed in next part. Using of model of carbon steel allows including evolution of latent heat during phase changing. A fields of residual stress has been calculated for different cooling conditions in the last part of this thesis.

Keywords: rail cooling, cooling device, latent heat evolution, residual stress calculation

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KUBÍK, P. *Minimalizace zbytkového napětí při dochlazování válcovaných profilů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 59 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi v průběhu zhotovování práce pomáhali. Především děkuji vedoucímu mé práce prof. Ing. Jindřichovi Petruškovi, CSc. za cenné rady, připomínky, ochotu a čas, který mi věnoval. Dále děkuji doc. Ing. Jaroslavu Horskému, CSc. za rady v oblasti termomechaniky a Ing. Laszlovi Ivánovi, Ph.D. za pomoc s programem ANSYS. Děkuji také mým rodičům za všestrannou podporu v dosavadním průběhu mého studia.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Minimalizace zbytkového napětí při dochlazování válcovaných profilů“ vypracoval samostatně po konzultacích s vedoucím diplomové práce a výše uvedenými odborníky. Vycházel jsem při tom ze svých znalostí a čerpal z internetových a literárních zdrojů.

V Brně dne 26.05.2009

.....  
Bc. Petr Kubík

**OBSAH**

1. Úvod.....	7
2. Popis problémové situace.....	8
2.1. Stávající řešení.....	8
2.2. Řízené dochlazování.....	8
3. Formulace problému a cílů řešení.....	9
4. Analýza problému.....	10
4.1. Typ problému.....	10
4.2. Překážky a bariéry v řešení problému.....	10
5. Řešení problému.....	10
5.1. Systém podstatných veličin.....	10
5.2. Experimentální měření za pohybu vzorku.....	15
5.2.1. Příprava a popis experimentu.....	15
5.2.2. Výsledky a zhodnocení.....	19
5.3. Volba metody řešení.....	22
5.3.1. Teorie přenosu tepla.....	22
5.4. Simulace chlazení nerezového vzorku.....	24
5.4.1. Model geometrie kolejnice.....	24
5.4.2. Počáteční a okrajové podmínky teplotního výpočtu.....	26
5.4.3. Model materiálu.....	29
5.4.4. Typ analýzy a nastavení řešiče.....	29
5.4.5. Prezentace výsledků a jejich analýza.....	31
5.4.6. Změna okrajových podmínek.....	33
5.4.7. Prezentace výsledků a jejich analýza.....	34
5.5. Výpočet pole napětí v průběhu procesu chlazení vzorku z uhlíkové oceli...37	
5.5.1. Simulace procesu chlazení.....	38
5.5.1.1. Model geometrie.....	38
5.5.1.2. Počáteční a okrajové podmínky teplotního výpočtu.....	38

---

5.5.1.3. Model materiálu.....	38
5.5.1.4. Prezentace výsledků a jejich analýza.....	38
5.5.1.5. Uvolnění latentního tepla.....	40
5.5.1.6. Prezentace výsledků a jejich analýza.....	41
5.5.1.7. Změna okrajových podmínek.....	42
5.5.1.8. Prezentace výsledků a jejich analýza.....	42
5.5.2. Výpočtové stanovení pole napjatosti vzorku z uhlíkové oceli.....	45
5.5.2.1. Model geometrie.....	45
5.5.2.2. Okrajové podmínky.....	45
5.5.2.3. Model materiálu.....	47
5.5.2.4. Prezentace výsledků a jejich analýza.....	47
5.6. Analýza vlivu doby a intenzity chlazení.....	50
6. Závěr.....	53
7. Seznam použité literatury.....	54
8. Seznam použitých zkratk a symbolů.....	55
9. Příloha.....	56

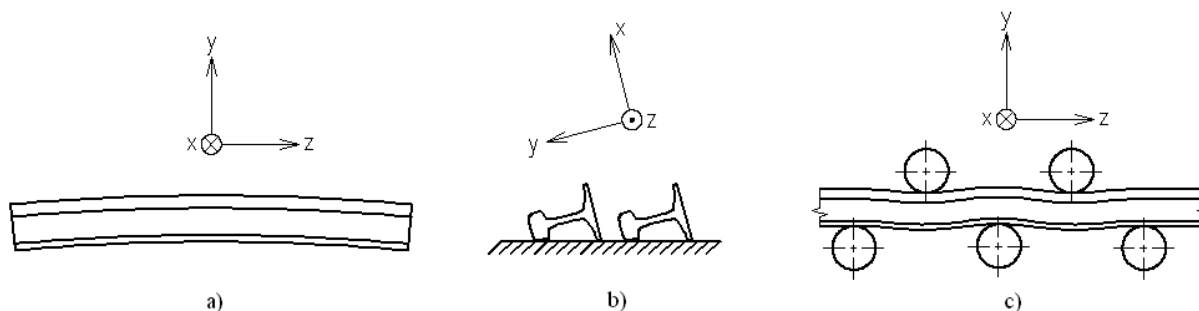
## 1. ÚVOD

Tato diplomová práce vznikla na základě projektu „Vývoj a výroba železničních kolejnic s vyššími užitnými parametry pro export“. Nynější výroba spočívá v tom, že se kolejnice bezprostředně po válcování odloží na chladicí lože, kde samovolně chladne ve vzdušné atmosféře. Jelikož se požadavky na vlakovou dopravu neustále zvyšují - větší zatížení na nápravy, větší rychlost vlakové soupravy, zvyšování hustoty dopravy aj., hledá se způsob jak zlepšit kvalitu materiálu kolejnice. Jako možnost se nabízí řízené dochlazování, kterým se dosáhne vyšší tvrdosti, životnosti a odolnosti vůči opotřebení. Laboratoř přenosu tepla a proudění se touto problematikou dlouhodobě zabývá. Uskutečnila laboratorní testy k získání poznatků pro návrh poloprovozního zařízení, které bude splňovat podmínky na dosažení výsledné jakosti produktu – jemné perlitické struktury s definovaným gradientem tvrdosti dle norem ČSN EN 13674-1 a CN 12-16D [1]. V této práci je provedena simulace procesu chlazení na tomto zařízení, přičemž se zaměřuje na analýzu vlivu doby chlazení a velikosti součinitelů přestupu tepla na velikost a rozložení zbytkového napětí po průřezu kolejnice.

## 2. POPIS PROBLÉMOVÉ SITUACE

### 2.1. Stávající řešení

Výrobní proces kolejnice zahrnuje tři kroky: válcování za tepla, chlazení a rovnání pomocí válců. Při každém z těchto tří kroků, vzniká zbytkové napětí. Válcování za tepla začíná na teplotě 1000°C. Předvalek prodělá několik tvářecích operací, které utvoří správný tvar kolejnice. Hotový profil má přibližně teplotu 900°C. Po válcování se kolejnice mírně ohýbají kolem osy x (obr.1.a) a odkládají na uniformní chladicí lože, chráněné před venkovními podmínkami (obr.1.b). Z důvodu nerovnoměrného chladnutí průřezu se zakřivení kolejnice zmenšuje. Když je kolejnice ochlazena na pokojovou teplotu, je rovnána pomocí válců, které jsou střídavě uloženy a přesazeny (obr.1.c) [5].



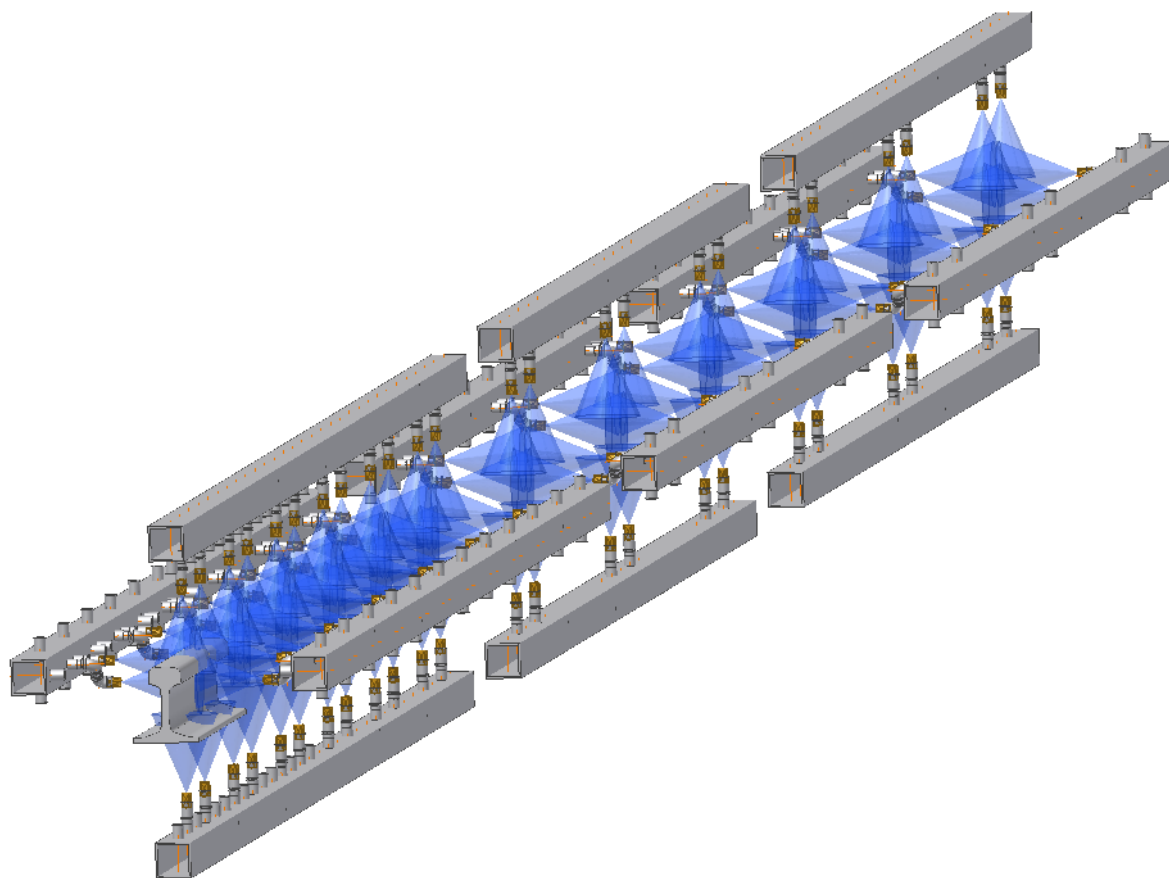
Obr.1: Výroba kolejnice a) předohyb b) chladicí lože c) rovnání

### 2.2. Řízené dochlazování

Zlepšení odolnosti proti opotřebení a zvýšení tvrdosti, vede k modernímu tepelnému zpracování kolejnice z doválcovacích teplot. Jedna z možností je přerušovaný ostřík povrchu kolejnice vodou. Hlavní prioritou je struktura vyrobené kolejnice – jemný lamelární perlit. Průběh teplot v celém průřezu musí být takový, aby nedošlo k nežádoucí martenzitické a bainitické transformaci.

### 3. FORMULACE PROBLÉMU A CÍLŮ JEHO ŘEŠENÍ

Snahou je provést simulaci chlazení kolejnice při průjezdu chladícím zařízením (obr.2), které navrhla Laboratoř přenosu tepla [3]. Simulace bude provedena v několika různých režimech, přičemž je zaměřena na analýzu vlivu rychlosti posuvu kolejnice a hodnoty součinitelů přestupu tepla na rozložení a velikost zbytkového napětí v průřezu kolejnice. Pro nastavení parametrů chladícího zařízení bude použita krátká kolejnice vyrobená z nerezové austenitické oceli, která neprodělavá fázové přeměny. Nejprve je snaha ve výpočtovém modelu, který má vlastnosti nerezové oceli nastavit součinitele přestupu tepla na jeho povrch tak, aby průběh teplot v určitých místech byl co nejvíce shodný s průběhem teplot získaným experimentem. Poté budou aplikovány stejné okrajové podmínky na model s vlastnostmi materiálu uhlíkové oceli a bude zahrnuto uvolnění latentního tepla při fázové přeměně z austenitu na perlit. Jeho hodnota bude volena tak, aby se průběh vypočtených teplot opět co nejvíce přiblížil k experimentu.



*Obr.2: Chladící zařízení*

## 4. ANALÝZA PROBLÉMU

### 4.1. Typ problému

Vstupem do algoritmu řešení problému jsou veličiny popisující:

- Okolí objektu
- Geometrii a topologii
- Vazby s okolím
- Aktivaci objektu z okolí
- Ovlivnění objektu z okolí
- Vlastnosti struktury objektu

Výstupem z algoritmu jsou veličiny popisující projevy objektu. Úkolem bude vypočítat průběh teplot a vyhodnotit napěťové pole v průřezu kolejnice. Jedná se tedy o problém přímý, jehož součástí - stanovení koeficientu přestupu tepla - je problém nepřímý.

### 4.2. Překážky a bariéry v řešení problému

- Při ostřiku kolejnice se voda od povrchu různě odráží, dochází ke vzniku vodní páry a během chladícího procesu není smáčivost povrchu kolejnice ustálená. Je tedy obtížné určit součinitel přestupu tepla na celém povrchu kolejnice.
- Při fázové přeměně z austenitu na perlit dojde k uvolnění latentního tepla. V této oblasti mám malé zkušenosti jak tuto přeměnu zahrnout do výpočtu.

## 5. ŘEŠENÍ PROBLÉMU

### 5.1. Systém podstatných veličin

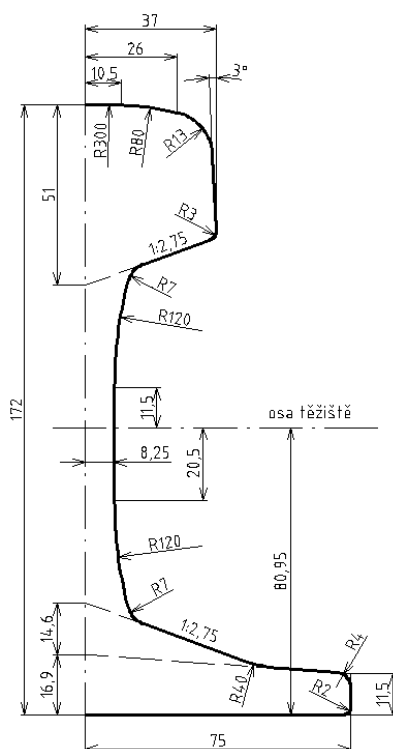
#### Veličiny popisující okolí objektu

Experimenty byly prováděny v laboratoři při pokojové teplotě 20°C. Teplota vody byla také 20°C. V průběhu chlazení kolejnice vodou vzniká vodní pára, po průjezdu zařízením se nachází ve vzdušné atmosféře.

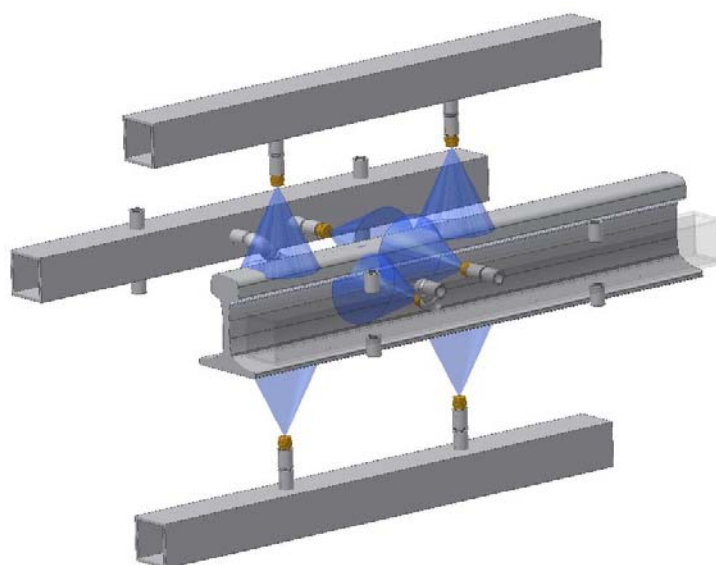
#### Veličiny popisující geometrii a topologii

Jedná se o kolejnici jejíž tvar a rozměry jsou uvedeny na obrázku 3. Skupina trysek na části chladícího zařízení viz.(obr.4) se opakuje nejprve šestkrát s menšími rozestupy a poté sedmkrát s většími rozestupy. Rozmístění trysek je patrné z obrázku 5. Vrcholový úhel

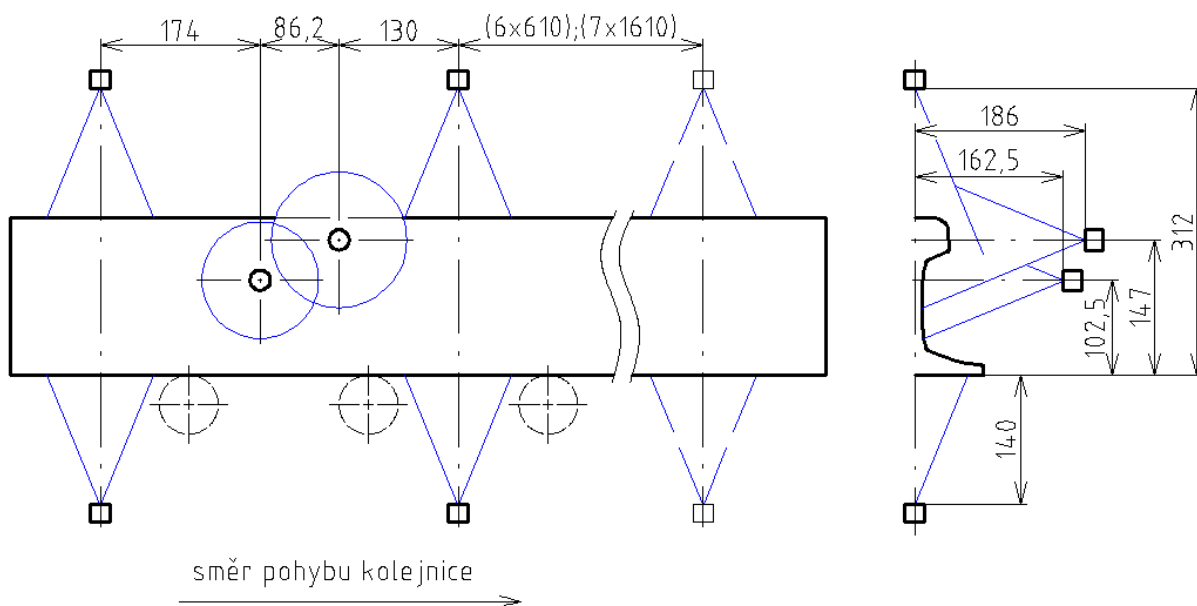
vodního paprsku je  $45^\circ$ . Ostřík je symetrický vzhledem k rovině symetrie kolejnice, bude tedy tato rovina využita při výpočtovém modelování. Kolejnice se pohybuje po válečkové trati. Velikost a rozmístění válečků neznám. Ve výpočtovém modelování budou okrajové podmínky symetrické po celou dobu chlazení až na pokojovou teplotu. Tento předpoklad nejlépe odpovídá situaci, kdy kolejnice zůstane po průjezdu chladícím zařízením na válečkové trati a neodkládá se na chladící lože.



Obr.3: Rozměry kolejnice



Obr.4: Část chladícího zařízení



Obr.5: Rozmístění trysek

### Veličiny popisující vazby s okolím

Kolejnice je v průběhu chlazení v kontaktu s válečky, po kterých se odvaluje. Další vazby s okolím se zde nevyskytují

### Veličiny popisující aktivaci objektu

Aktivaci způsobuje tepelný tok. Při průjezdu chladícím zařízením voda dopadá na rozehrátý povrch kolejnice a tím se uskutečňuje přenos tepla. Jedná se o nucenou konvekci. Před vstupem a po výjezdu ze zařízení se kolejnice nachází ve vzdušné atmosféře, kde dochází k přirozené konvekci. Hodnotu tepelného toku určuje koeficient přestupu tepla, teplota povrchu obtékaného objektu a teplota tekutiny, která povrch obtéká. Jak již bylo uvedeno hodnota koeficientu přestupu tepla bude volena, teplota vody je 20°C a teplota kolejnice je okolo 900°C, což je teplota bezprostředně po válcování. V průběhu celého procesu dochází také k přenosu tepla zářením. Pro zjednodušení výpočtu je tento mechanismus převeden na konvekci.

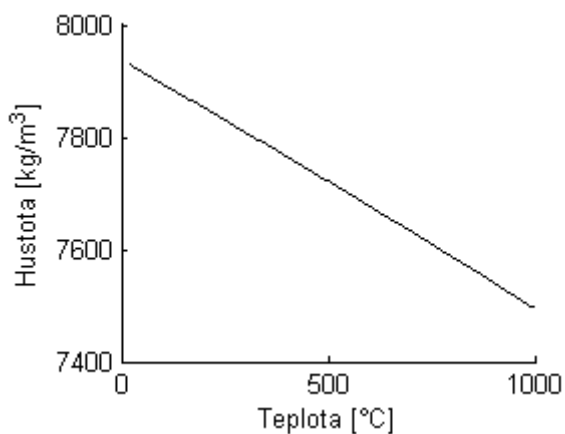
### Veličiny popisující ovlivnění objektu s okolím

Ovlivňující veličinou je především rychlost pohybu kolejnice chladícím zařízením, která určuje dobu chlazení. Koeficient přestupu tepla závisí na mnoha různých vlivech. V tomto případě zejména na teplotě kolejnice, na smáčivosti jejího povrchu, vzdálenosti trysek od povrchu a na tlaku vody v kolektorech zařízení. Doba a intenzita chlazení má vliv na teplotní pole v průřezu kolejnice a tím i na zbytková napětí.

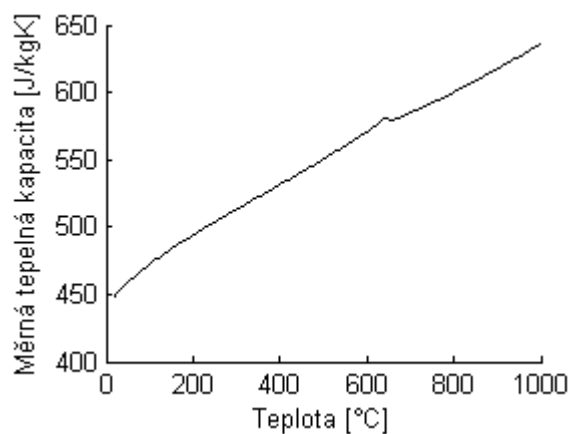
### Veličiny popisující vlastnosti struktury objektu

Uvedené veličiny byly obdrženy z laboratoře přenosu tepla a proudění.

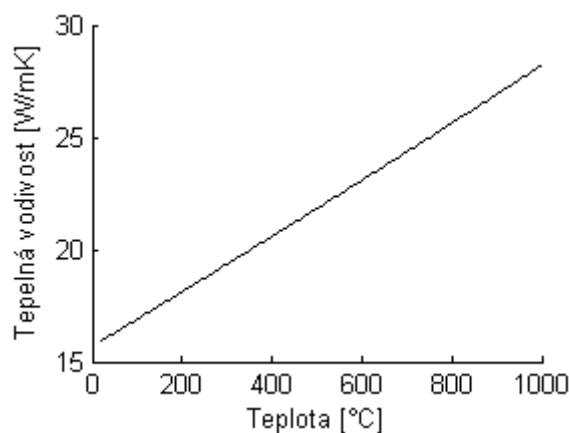
a) Termofyzikální vlastnosti nerezové austenitické oceli v závislosti na teplotě:



Obr.7: Hustota



Obr.8: Měrná tepelná kapacita

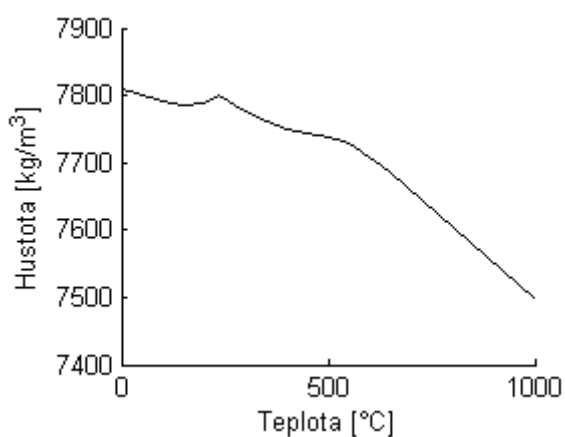


Obr.9: Tepelná vodivost

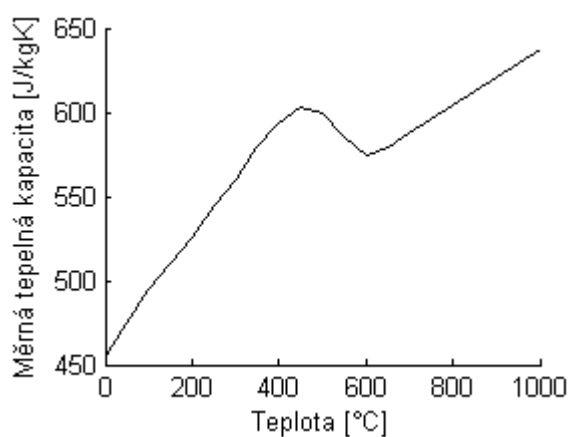
b) Termofyzikální a mechanické vlastnosti uhlíkové oceli v závislosti na teplotě:

Chemické složení:

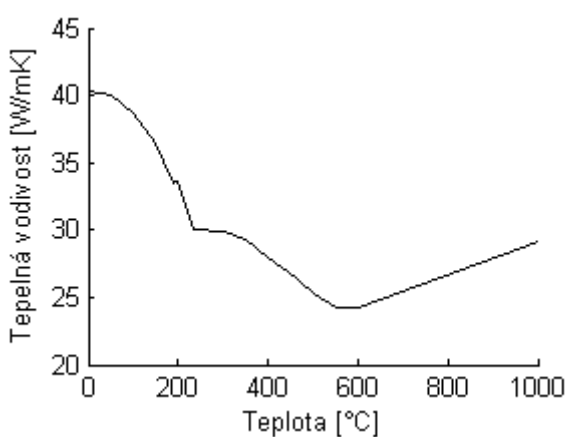
Fe:97,7% Al:0,06% Cr:0,03% Cu:0,02% Mn:1,07% Ni:0,02% Si:0,39% C:0,68 %  
P:0,015% S:0,015%



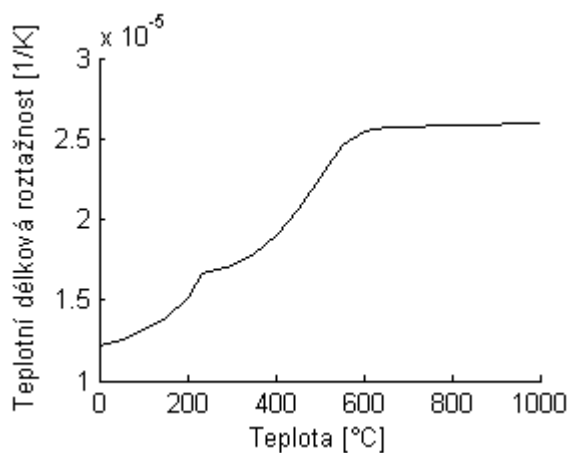
Obr.10: Hustota



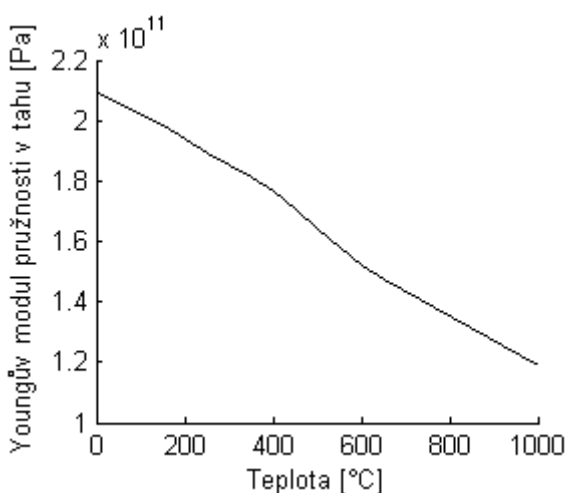
Obr.11: Měrná tepelná kapacita



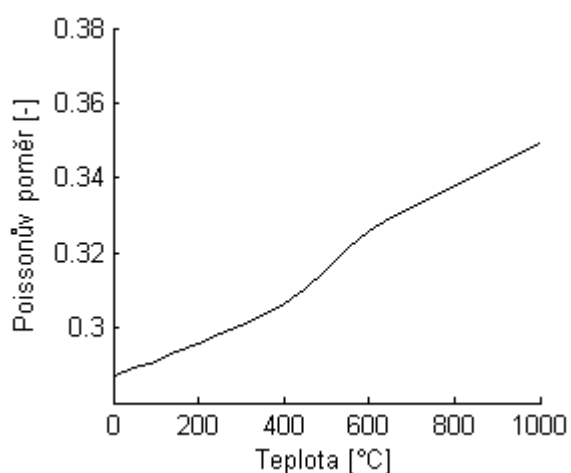
Obr.12: Tepelná vodivost



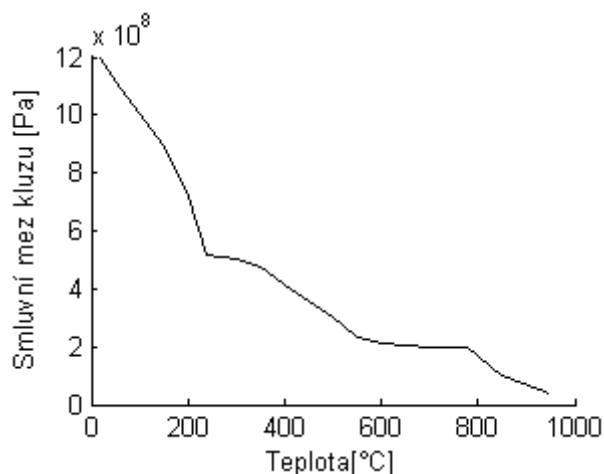
Obr.13: Teplotní délková roztažnost



Obr.14: Youngův modul pružnosti v tahu



Obr.15: Poissonův poměr



Obr.16: Smluvní mez kluzu

### Veličiny popisující projevy objektu

Projev objektu je jeho odezva na aktivaci. Je to rozložení teplot v jeho objemu, teplotní gradient, tepelný tok, deformace a napjatost.

### Veličiny popisující důsledky projevů objektu

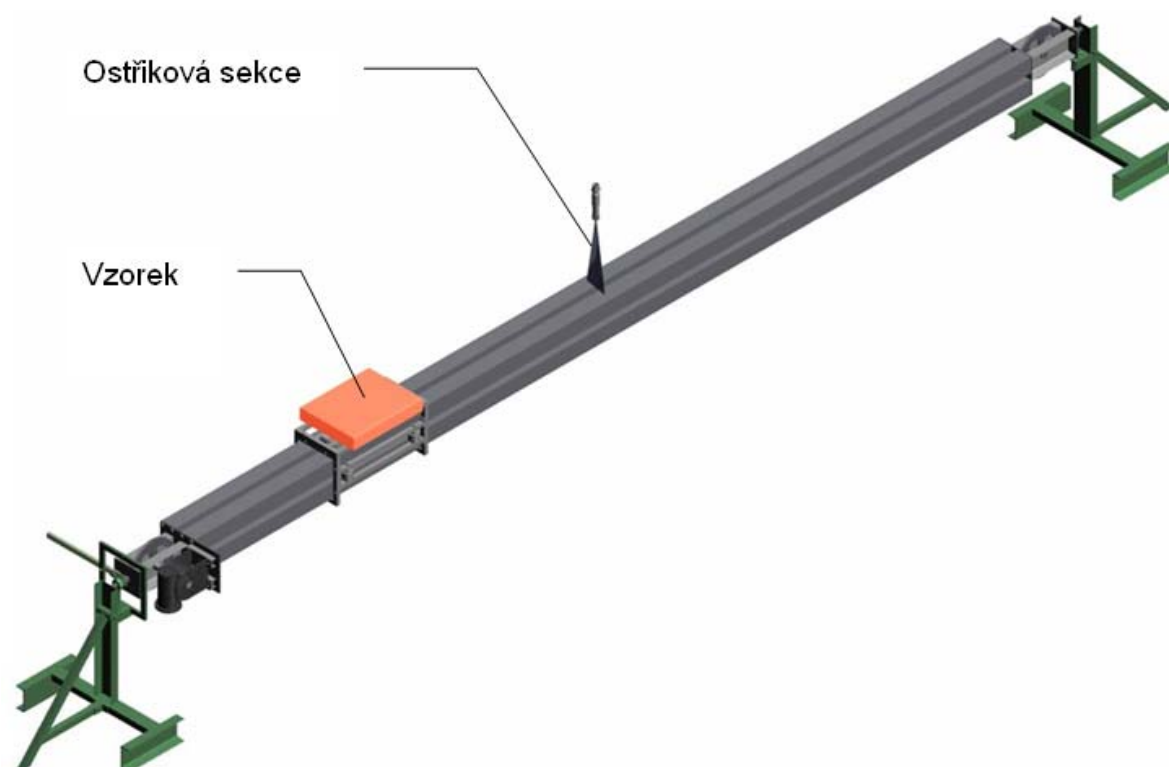
Příliš velké zakřivení kolejnice může způsobit, že se kolejnice na válečkové trati zasekne, nebo z ní spadne. Jestliže se kolejnice ochladí velmi rychle dojde k nežádoucí fázové přeměně.

## 5.2. Experimentální měření za pohybu vzorku

Měření probíhalo v laboratoři přenosu tepla a proudění. Bylo provedeno a vyhodnoceno více jak 70 experimentů, na základě kterých byl vybrán materiál a parametry ostříku s nejlepšími výsledky. Některých měření jsem se zúčastnil. Následující text je převzán z literatury [2]

### 5.2.1. Příprava a popis experimentu

Laboratorní lineární stand, vhodný pro tyto účely byl vyvinut v Laboratoři přenosu tepla a proudění. Umožňuje ohřev vzorku na požadovanou počáteční teplotu, pohyb vzorku předepsanou rychlostí v ostříkové sekci a vytvoření požadované sekvence průjezdů. Principiální schéma standu je na obr. 17.

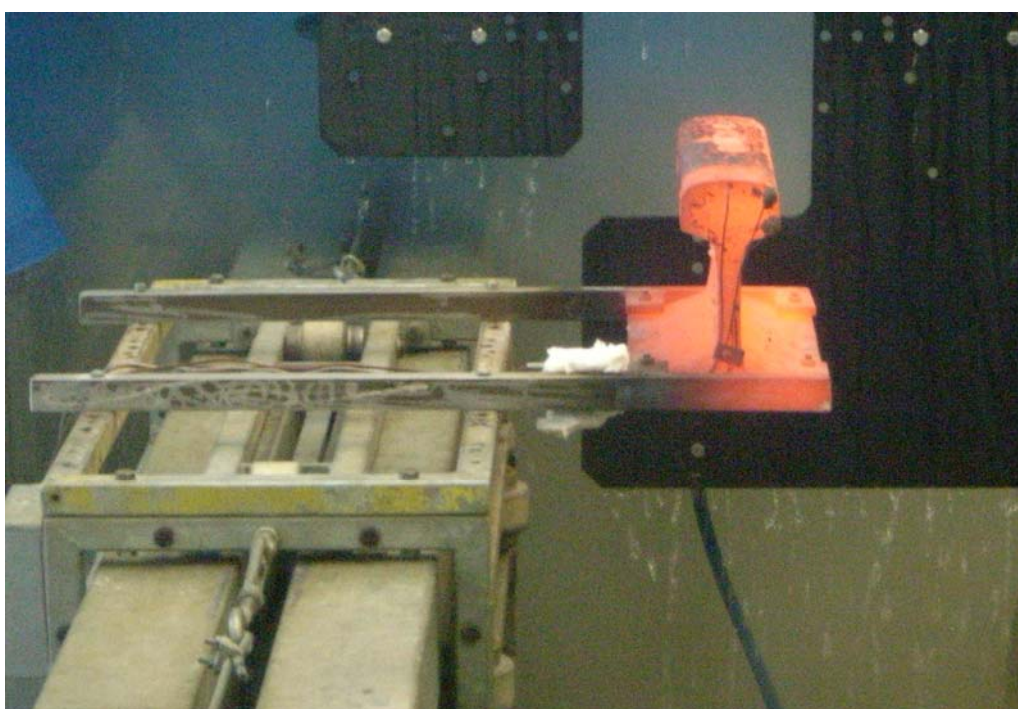


*Obr.17: Principiální schéma lineárního standu*

Ostřiková sekce v délce 3 m je vytvořena ze čtyř kolektorů – horní, dolní, levý a pravý. Všechny kolektory jsou osazeny kuželovými tryskami. Vzdálenost trysek od povrchu kolejnice, případně i pozici lze modifikovat tak, aby bylo dosaženo optimálních ostřikových poměrů. Kolektory jsou napájeny z rozvodné komory přes regulační ventily, takže lze nastavovat libovolné tlaky vody. Na obr. 18 je fotografie ostřikové sekce bez krycích stěn a na obr. 19 je fotografie kolejnice po vyjmutí z pece, těsně před průjezdem ostřikovou sekcí.

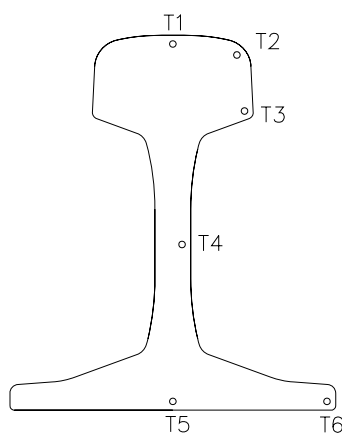


*Obr.18: Fotografie ostřikové sekce*



*Obr.19: Ohřátá kolejnice před vstupem do chladicí sekce*

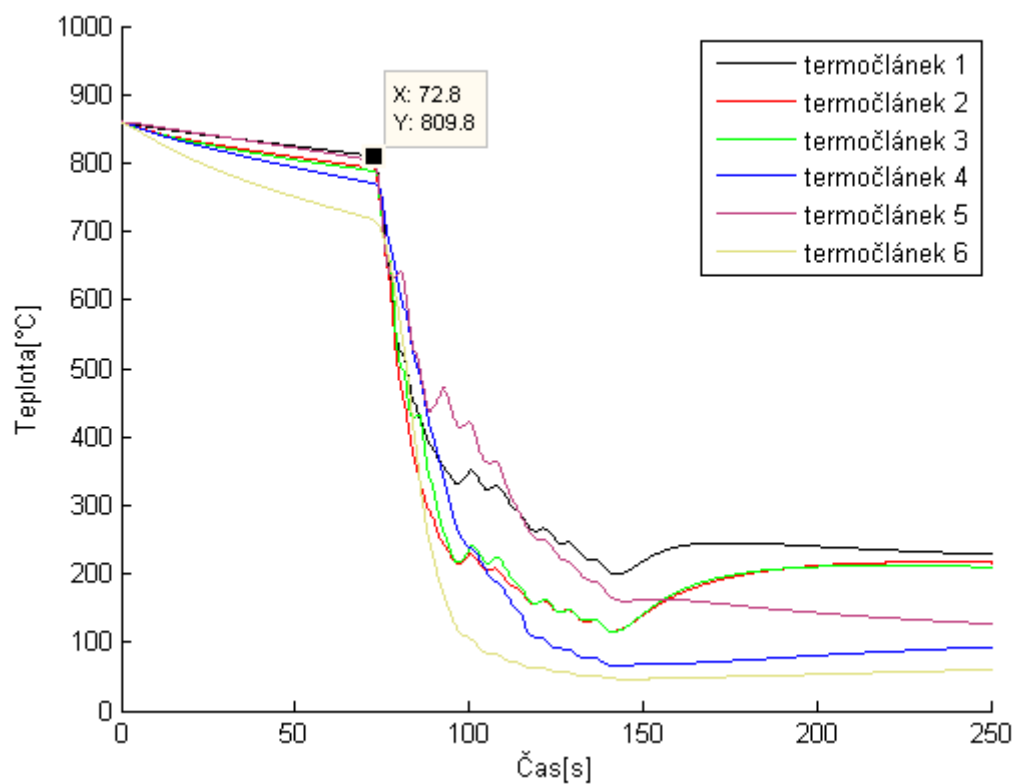
Na následujícím obrázku 20 jsou na průřezu kolejnice znázorněny polohy měřících termočlánků. Jsou umístěny 4 mm pod povrchem a indikují teploty v uvedených místech. Vzhledem k tomu, že ostřiková sekce je navržena symetricky podél svislé osy, lze očekávat i teplotní symetrii během ochlazování.



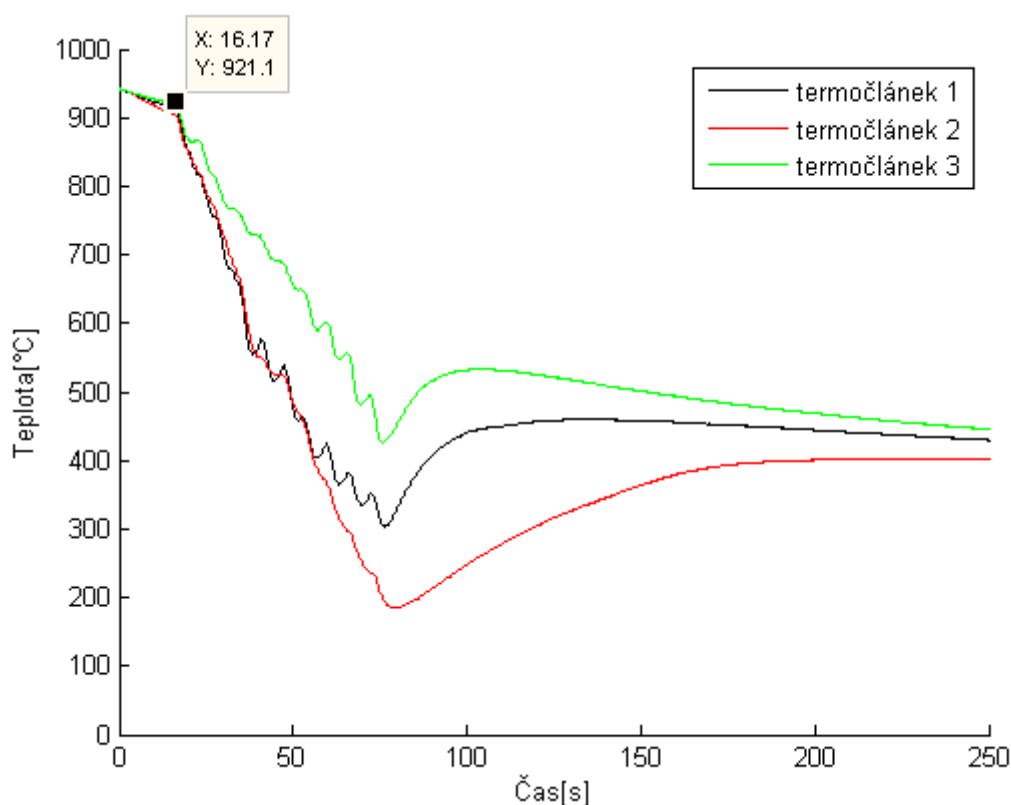
Obr.20: Schéma rozmístění termočlánků v průřezu kolejnice

### 5.2.2. Výsledky a zhodnocení

Výsledkem měření jsou průběhy teplot na vzorku vyrobeném z austenitické nerezové oceli (obr.21) a na vzorku z uhlíkové oceli (obr.22).



Obr.21: Průběh teplot na vzorku z nerezové oceli



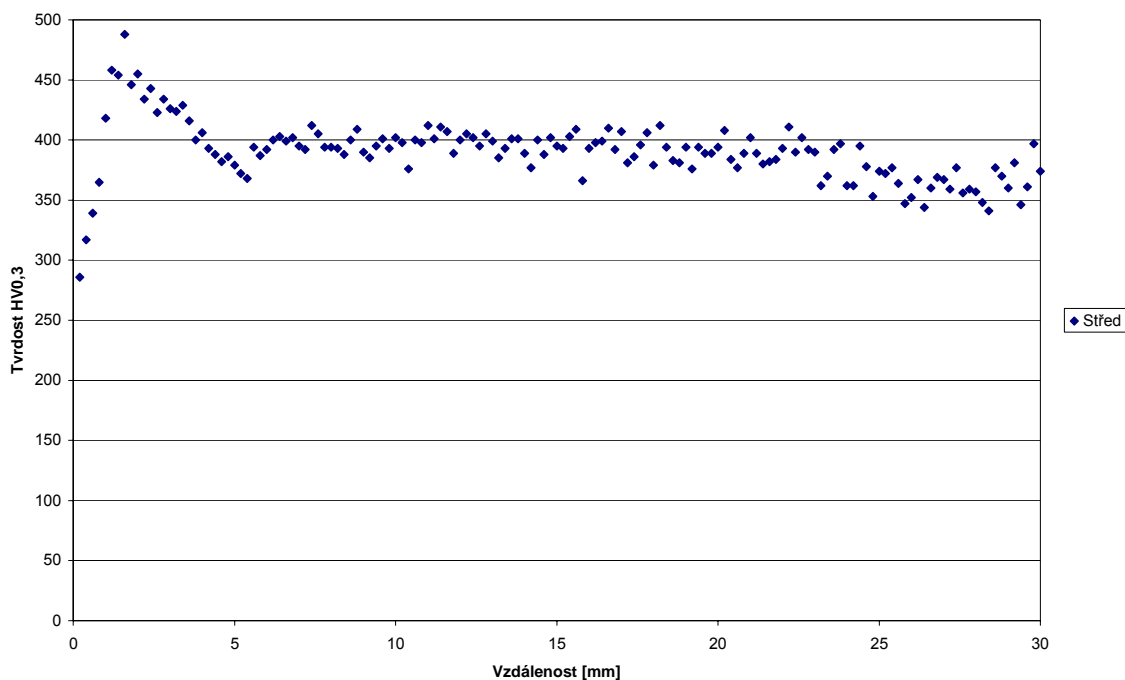
Obr.22: Průběh teplot na vzorku z uhlíkové oceli

Po vyjmutí vzorků z pece nebylo jejich teplotní pole homogenní, což způsobil nerovnoměrný ohřev v peci. Teplotní záznamy byly upraveny tak, aby v počátečním čase byla stejná teplota. Hodnota je určena jako průměr z teplot na jednotlivých termočláncích bezprostředně po vyjmutí z pece. U měření nerezového vzorku byla jeho počáteční teplota 860°C a u uhlíkové oceli 942°C. Parametry ostříku u obou měření byly stejné. Z obrázků je patrné, že manipulace s nerezovým vzorkem před vjezdem do ostříkové sekce trvala déle jak u vzorku z uhlíkové oceli. Dále je vidět, že teploty těsně po výjezdu ze sekce, při ochlazování kolejnice z uhlíkové oceli jsou vyšší než teploty u vzorku z nerezové oceli. Také opětovný nárůst povrchových teplot po ukončení ostříku uhlíkového materiálu je mnohem větší než u materiálu nerezového. Velký vliv na tuto skutečnost má fázová přeměna z austenitu na perlit. Rychlost pohybu kolejnice byla u obou měření 0,3 m/s.

Bezprostředně po ukončení experimentu byla na horním povrchu orientačně změřena tvrdost kolejnice. Na obr. 23 je metalografický výbrus hlavy vzorku kolejnice z uhlíkové oceli a na obr. 24 je průběh tvrdosti podél vzdálenosti, měřené od povrchu hlavy.



Obr.23: Metalografický výbrus hlavy



Obr.24: Tvrdość HV0,3 kolejnice z uhlíkové oceli

#### Orientační určení meze kluzu:

V literatuře [6] je uveden empirický vztah mezi tvrdostí materiálu a mezí kluzu pro svařitelné uhlíkové a uhlíko-manganové oceli:

$$\text{Smluvní mez kluzu pro materiály s HV 160 až 495: } R_{p0,2} = 3,28 \cdot HV - 221 \quad [1]$$

Z obr.24 je patrné, že se tvrdost pohybuje okolo 400 HV. Dosazením do vztahu:

$$R_{p0,2} = 3,28 \cdot 400 - 221$$

$$\underline{R_{p0,2} = 1091 \text{ MPa}}$$

### 5.3. Volba metody řešení

Problém bude řešen výpočtovým modelováním, konkrétně metodou konečných prvků (dále jen MKP). Je to dominantní numerická metoda v oblasti inženýrských výpočtů, založená na variační formulaci a využívá ve většině případů deformačního přístupu. Mluvíme tedy o deformační variantě MKP, kde primární neznámou jsou posuvy. S touto metodou pracuje, mezi mnoha jinými, programový systém ANSYS, který je při řešení problému použit. Všechny výpočty byly řešeny na dvouprocesorové stanici s operační pamětí 2GB RAM, s procesorem Intel Core Duo inside s frekvencí 2GHz, s harddiskem 300 GB a operačním systémem Windows XP 32bit.

#### 5.3.1. Teorie přenosu tepla

##### Konvekce

Přenos tepla konvekcí je složen ze dvou mechanismů [4]:

- Základní je náhodný pohyb molekul – difúze (jako u vedení tepla v tekutinách) – KONdukce
- Druhý mechanismus je objemový, makroskopický pohyb tekutiny – adVEKCE

Protože molekuly si v tomto proudícím objemu ponechávají svůj náhodný pohyb, je přenos energie důsledkem superpozice těchto dvou mechanismů. To se projevuje i v pojmu KONVEKCE.

Při konvektivním přenosu tepla první mechanismus (difúzní) dominuje v blízkosti povrchu, kde je rychlost tekutiny nízká, přímo na povrchu klesá na nulu. Druhý mechanismus se uplatní tak, že tekutina je strhávána z volného proudu do mezní vrstvy kde odebírá teplo a pak je jakoby „smetána“ unášena dolů po proudu.

Konvekce může být klasifikována podle povahy proudění:

- a) nucená
- b) přirozená (volná)
- c) kombinovaná

Bez ohledu na povahu konvekce platí pro přenášený měrný tepelný tok vztah nazývaný někdy Newtonův ochlazovací zákon:

$$\dot{q} = \alpha(T_w - T_\infty) \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad [2]$$

kde:  $\alpha$  - součinitel přestupu tepla zahrnující všechny parametry ovlivňující

$$\text{konvekci.} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

$T_w$  - teplota povrchu obtékaného tělesa.  $[K]$

$T_\infty$  - teplota tekutiny v dostatečné vzdálenosti od povrchu.  $[K]$

### Záření

Z každého povrchu, který má nějakou konečnou teplotu, je emitována energie – tomuto procesu říkáme tepelné záření. Tepelné záření se může také objevit u plynů a kapalin. Zatímco přenos tepla vedením a konvekcí vyžaduje přítomnost hmotné látky, záření je procesem, který může probíhat i v absolutním vakuu.

Maximální tepelný tok, který může být z povrchu emitován je dán tzv. Stefan-Boltzmannovým zákonem:

$$\dot{q} \equiv E_0 = \sigma T_w^4 \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad [3]$$

kde:  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right]$  je Stefan-Boltzmannova konstanta

$T_w$  - teplota povrchu

Dolní index „0“ označuje tzv. absolutně černé těleso, tj. ideální zářič, který vyzařuje maximální možnou energii. Pro každý reálný povrch platí:

$$E = \varepsilon \sigma T_w^4 \quad [4]$$

kde:  $\varepsilon$  - je poměrná zářivost (emisivita), která je v rozmezí  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  a říká nám, jak efektivní je záření z povrchu v porovnání s ideálním zářičem.

Určení tepelné energie výsledně vyměřované mezi povrchy je poměrně obtížné (všechny povrchy na sebe vzájemně vyzařují energii, odrážejí a pohlcují ji). Nicméně v jednom zvláštním případě, který se vyskytuje poměrně často, to není tak složité: je to případ malého povrchu zcela obklopeného velkým povrchem. Pak lze psát pro měrný tepelný tok:

$$\dot{q} = \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_\infty^4) \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad [5]$$

V tomto zvláštním případě velikost a poměrná zářivost povrchu okolí neovlivňují výslednou výměnu tepla – důležité jsou pouze vlastnosti „malého“ povrchu.

Často je výhodné vyjádřit výsledný tepelný tok pomocí podobného vztahu jako je Newtonův ochlazovací zákon zavedením ekvivalentního součinitele přestupu tepla zářením:

$$\dot{q} = \alpha_z (T_w - T_\infty) = \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_\infty^4) \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad [6]$$

Odtud pak plyne, že součinitel přestupu tepla zářením:

$$\alpha_z = \varepsilon \sigma (T_w + T_\infty) (T_w^2 + T_\infty^2) \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad [7]$$

Je třeba mít na zřeteli, že součinitel  $\alpha_z$  je silnou funkcí teplotního rozdílu, což je u konvekce obecně velmi slabé.

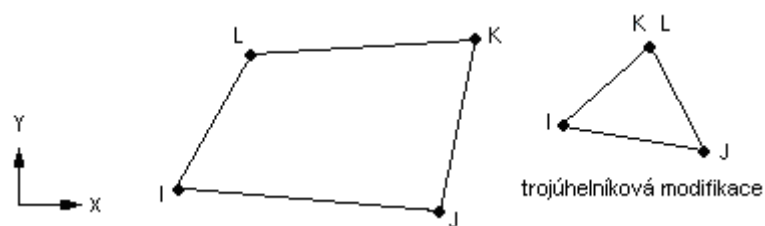
## 5.4. Simulace chlazení nerezového vzorku

Za předpokladu, že významné teplotní gradienty jsou v příčném průřezu a ve směru axiálním jsou zanedbatelné, bylo by možno řešit teplotní problém jako rovinnou úlohu 2D prvky. Navazující deformačně napěťový problém je však nutno již řešit jako prostorovou úlohu, protože není možno zanedbat nenulovou axiální teplotní dilataci. Kompromisem je výpočtový model, tvořený pro teplotní i deformační analýzu jen dvěma vrstvami prostorových prvků dle obr. 28 se speciálně předepsanými okrajovými podmínkami na příčných řezech, popsány dále. Tyto okrajové podmínky zajišťují rovinný charakter teplotního pole i po průřezu konstantní axiální teplotní dilataci kolejnice.

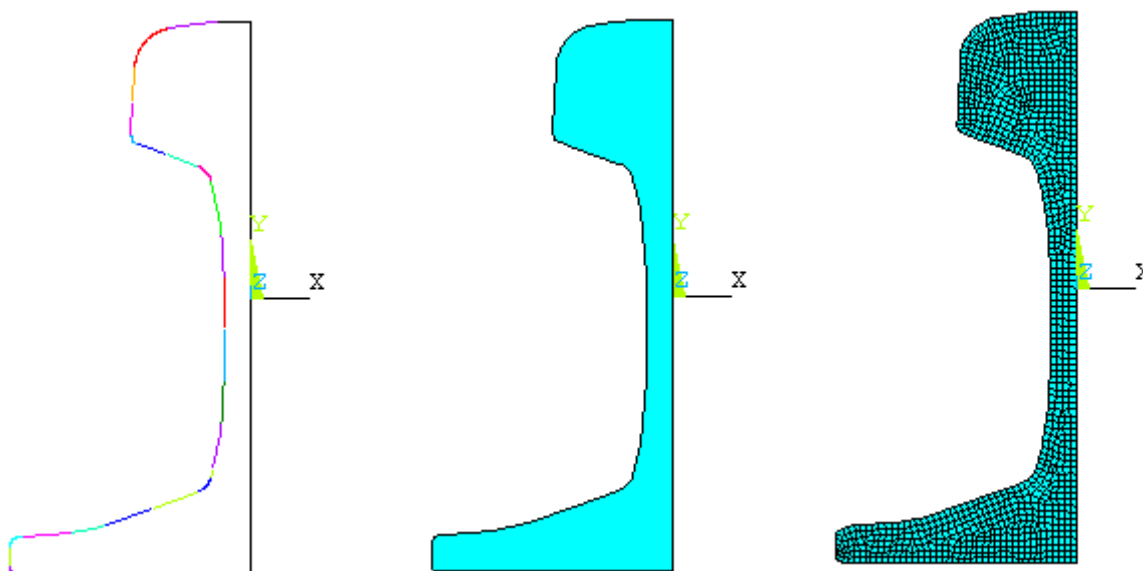
### 5.4.1. Model geometrie kolejnice

Model geometrie byl vytvořen na základě výkresové dokumentace (obr.3), pomocí programovacího jazyku APDL (ANSYS Parametric Design Language). Jak již bylo uvedeno model využívá rovinu symetrie kolejnice.

Nejprve je zhotovena plocha představující průřez, jejíž obrys obsahuje určitý počet čar (obr.26) Množství čar je voleno tak, aby vznikl při tvorbě modelu vhodný počet ploch pro nastavení okrajových podmínek. Nyní je na ploše vytvořena síť, která pomocí prvků zdiskretizuje řešenou oblast. Jemnost sítě je zadána nastavením délkou hrany prvků. Z důvodu polohy termočlánků (4 mm pod povrchem) a velkého teplotního gradientu při chlazení je volena velikost prvku 2 mm. Typ prvku PLANE55 (obr.25), určený pro teplotní analýzu, je vybrán ze standardní nabídky systému ANSYS. Je to plošný čtyřuzlový prvek s lineární bázovou funkcí, který má v každém uzlu jako primární neznámou veličinu teplotu. Bude sloužit jen pro tvorbu modelu, nikoliv pro výpočet.

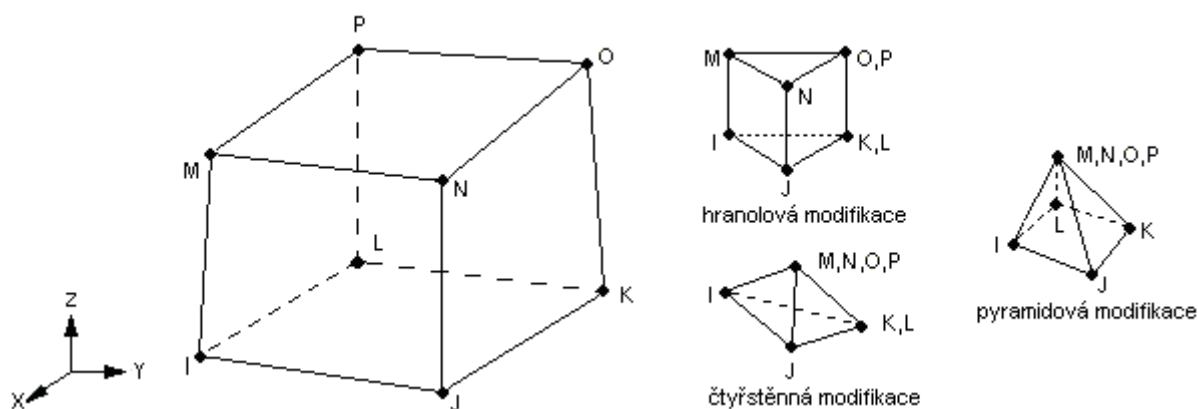


Obr.25: Prvek PLANE55

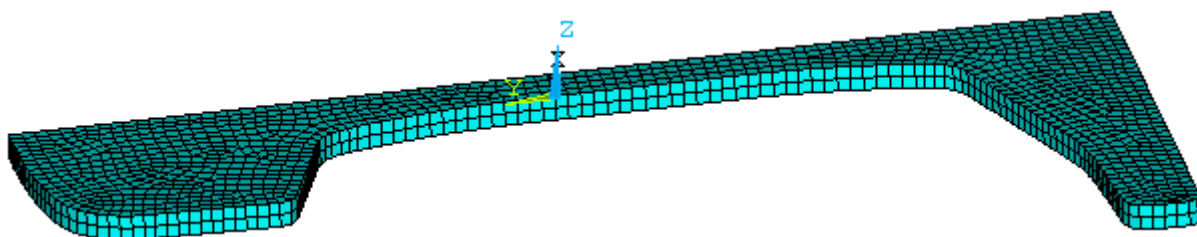


Obr.26: Obrys, plocha a síť rovinného modelu

Dále byl použit teplotní prostorový prvek s lineární bázovou funkcí SOLID70 (obr.27). Má osm uzlů v nichž je primární neznámá veličina teplota. Pomocí příkazu vytažení je vytvořen výpočtový konečnoprvkový model. Prostorová síť tohoto modelu bude mít stejné rozložení a velikost prvků jako síť rovinného modelu. Bude mít dvě vrstvy prvků o délce hrany 2 mm ve směru osy z (obr.28). Rovinná síť bude po vytvoření prostorové odstraněna.



Obr.27: Prvek SOLID70

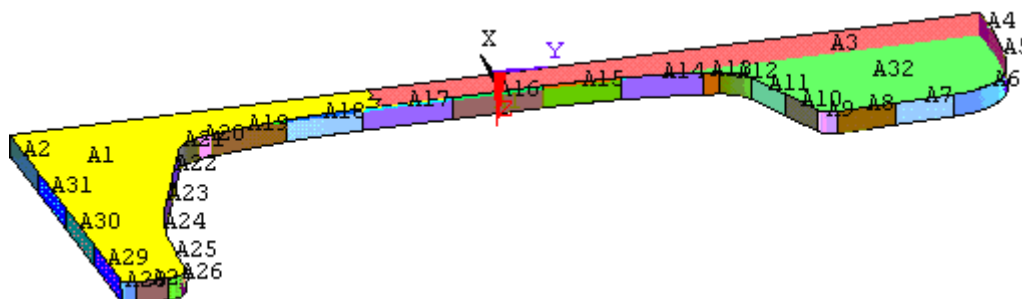


Obr.28: Diskretizovaný model geometrie

#### 5.4.2. Počáteční a okrajové podmínky teplotního výpočtu

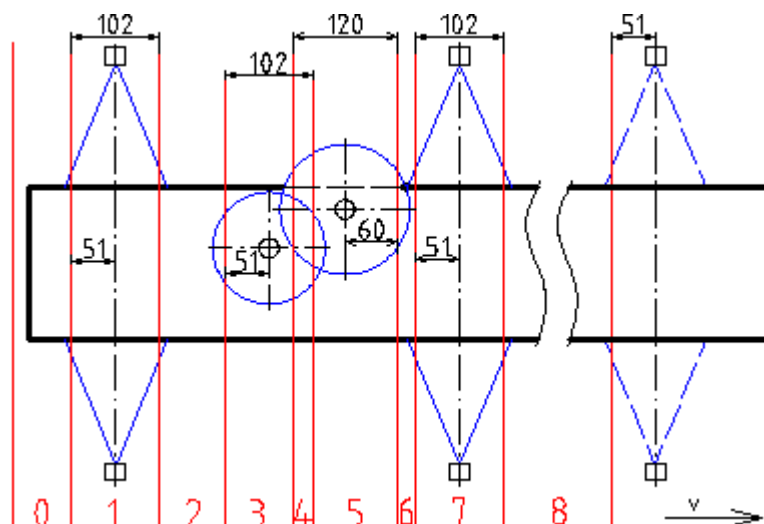
Teplotní výpočet vyžaduje zadat počáteční podmínku – teplotní pole v modelu geometrie na začátku simulace. Jelikož teplota nerezového vzorku na začátku experimentálního měření byla  $860^{\circ}\text{C}$ , byla zadána tato teplota jako počáteční. Teplotní pole je homogenní v celém objemu.

Protože je problém řešen jako rovinný a využívá rovinu symetrie kolejnice, je předpokládán na ploše číslo 1,3,32 nulový tepelný tok. Číslování je patrné z obrázku 29, které program provádí automaticky. Na tyto plochy nebude definována žádná okrajová podmínka, jedná se o tzv. přirozenou okrajovou podmínku.



Obr.29: Číslování ploch modelu

Nyní je na všechny boční plochy modelu vyjma plochy v rovině symetrie předepsán součinitel přestupu tepla. Bude závislý na teplotě, která je vypočtena z rozdílu teploty okolí ( je konstantní  $20^{\circ}\text{C}$ ) a teploty plochy, na které je součinitel definován. Tato závislost bude zadána pomocí tabulky do materiálového modelu, což program ANSYS umožňuje. Z důvodu složitosti ostříku bude koeficientů přestupu tepla 16. Opakující se část ostříkové sekce je rozdělena na úseky (obr.30).



Obr.30: Rozdělení ostříkové sekce na úseky

Čas, ve kterém budou koeficienty přestupu tepla v jednotlivém úseku aplikovány na model, je dán délkou úseku a rychlostí posuvu kolejnice. Rychlost bude stejná jako u experimentálního měření 3 m/s.

Záření je převedeno na konvekci (tab.1) pomocí vztahu 7. Na radu pracovníků laboratoře přenosu tepla a proudění volím emisivitu  $\varepsilon = 0,8$ , teplota  $T_\infty = 20^\circ\text{C}$  a Stefan-

Boltzmannova konstanta  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right]$ .

Teplota modelu $T_w [^\circ\text{C}]$	$\alpha_z [W/m^2 K^1]$
900	97,24
850	86,55
800	76,69
750	67,62
700	59,32
650	51,75
600	44,87
550	38,65
500	33,06
450	28,06
400	23,62
350	19,7
300	16,28
250	13,31
200	10,76
150	8,6
100	6,8
20	4,57

Tab.1: Teplotní závislost ekvivalentního součinitele přestupu tepla

Nyní jsou určeny výsledné součinitele přestupu tepla aplikované na výpočtový model tak, že součinitele související s konvekcí a zářením jsou sečteny:

$$\alpha_i = \alpha_{pi} + \alpha_z \quad [8]$$

kde  $\alpha_i$  - je výsledný součinitel přestupu tepla aplikovaný na plochy modelu  $\left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$

$\alpha_{pi}$  - součinitel přestupu tepla související s konvekcí  $\left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$

$\alpha_z$  - ekvivalentní součinitel přestupu tepla související se zářením  $\left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$

### Úsek 0

Tento úsek simuluje stav, kdy se kolejnice nachází před chladicí sekci. Hodnota součinitele přestupu tepla související s přirozenou konvekcí je volena  $\alpha_{p0} = 20$ .

Délka tohoto úseku byla volena tak, aby se doba chlazení rovnala době manipulace vzorku při experimentálním měření. Odečteno z obr.22  $t_0 = 72,8 \text{ s}$ . Délka ostatních úseků je známá, viz obr.5 a obr.31.

$$l_0 = t_0 \cdot v = 72,8 \cdot 0,3 = 21,84$$

$$l_0 = 21,84 \text{ m}$$

Koeficient  $\alpha_0$  je aplikován na plochy 2 a 4 až 31.

V následujících úsecích projíždí vzorek ostřikovou sekci. Úseky 1 až 8 se opakují jedenáctkrát, úsek 8 bude mít po sedmém opakování větší délku. Plochy, které se nachází pod vodním paprskem jsou chlazeny největší intenzitou. Plochy v úsecích mezi paprsky jsou chlazeny méně. V tab. 2 jsou uvedeny součinitele přestupu tepla související s nucenou konvekcí, které jsou aplikované na plochy modelu během simulace chlazení při průjezdu ostřikovou sekci.

i	Součinitel $\alpha_{pi}$ [ Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Plochy	Úsek	Čas [s]
1	6000	4 - 6	1	0,34
2	4000	7,8		
3	2000	9 - 23		
4	6000	2,30,31		
5	4000	29		
6	2000	24 - 28		
7	1000	2,4 - 31	2	0,24
8	6000	8 - 18	3	0,257
9	5000	6,7,19 - 23		
10	4000	4,5		
11	3000	24 - 28		
12	1000	2, 29 - 31		
13	4000	4,5	4	0,0826
8	6000	6 - 18		
9	5000	19 - 23		
11	3000	24 - 28		
12	1000	2, 29 - 31		
8	6000	6 - 16	5	0,317
9	5000	17 - 23		
11	3000	24 - 28		
12	1000	2,29 - 31		
13	4000	4,5		
7	1000	2, 4 - 31	6	0,063
úsek 7 je identický s úsekem 1			7	0,34
14	1000	2,4 až 31	8 - krátký	1,693
15	500	2,4 až 31	8 - dlouhý	5,193

Tab.2: Okrajové podmínky při simulaci průjezdu ostřikovou sekcí

Po projetí ostřikové sekce se kolejnice nachází ve vzdušné atmosféře. Proto je aplikován stejný součinitel přestupu tepla jako v úseku 0. Doba celé simulace chlazení trvá 7200 s. za tuto dobu bude model v celém objemu ochlazen na teplotu okolí.

#### 5.4.3. Model materiálu

Materiálové vlastnosti nerezové austenitické oceli jsou uvedeny v odstavci 5.1. Tyto vlastnosti závislé na teplotě jsou zadány tabelárně do programového systému ANSYS pomocí tzv. materiálových modelů.

#### 5.4.4. Typ analýzy a nastavení řešiče

Pro řešení problému použiji teplotní transientní analýzu, která je součástí programu ANSYS.

### Teplotní transientní analýza

Transientní teplotní analýza slouží k určení teplot a jiných termo-fyzikálních veličin, které se mění v čase. Teploty které tato analýza vypočítá se běžně používají jako vstupy do strukturální analýzy, kde se hodnotí teplotní napjatost. Základní rovnice transientní teplotní analýzy je [8]:

$$[C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad [9]$$

kde  $C$  – je matice měrné tepelné kapacity

$K$  – je matice tepelné vodivosti

$u$  – je vektor teplot v uzlech

$F$  – je aplikovaný vektor zatížení (teplných toků)

Rovnice 9 používá pro řešení univerzální lichoběžníkové pravidlo:

$$\{u_{n+1}\} = \{u_n\} + (1 - \theta)\Delta t\{\dot{u}_n\} + \theta\Delta t\{\dot{u}_{n+1}\} \quad [10]$$

kde  $\theta$  - je transientní integrační parametr

$$\Delta t = t_{n+1} - t_n$$

$\{u_n\}$  - je teplota v uzlech v čase  $t_n$

$\{\dot{u}_n\}$  - vektor rychlosti změny teploty v uzlech v čase  $t_n$  ( vypočteno z předchozího časového kroku )

Rovnice 9 může být zapsána v čase  $t_{n+1}$  takto:

$$[C]\{\dot{u}_{n+1}\} + [K]\{u_{n+1}\} = \{F\} \quad [11]$$

Nyní je dosazeno  $\{\dot{u}_{n+1}\}$  z rovnice 10 do rovnice 11:

$$\left( \frac{1}{\theta\Delta t} [C] + [K] \right) \{u_{n+1}\} = \{F\} + [C] \left( \frac{1}{\theta\Delta t} \{u_n\} + \frac{1-\theta}{\theta} \{\dot{u}_n\} \right) \quad [12]$$

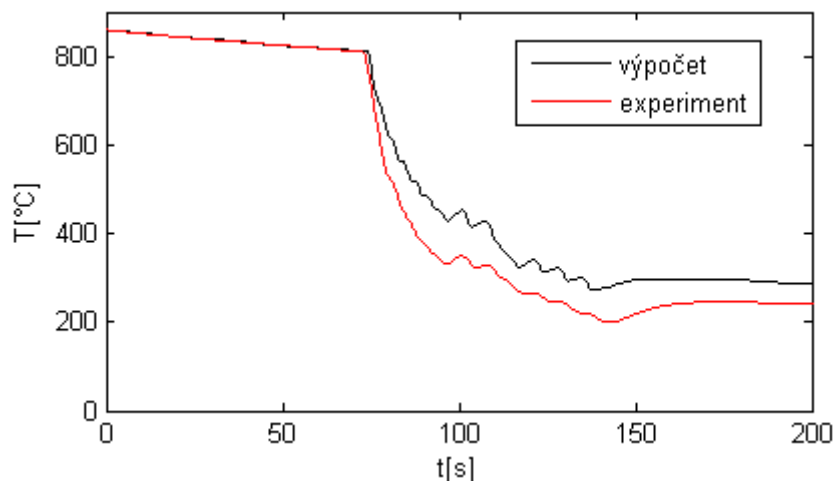
Jakmile je  $\{u_{n+1}\}$  vypočteno z rovnice 12, aktualizuje se  $\{\dot{u}_{n+1}\}$  z rovnice 10.

### Nastavení řešiče

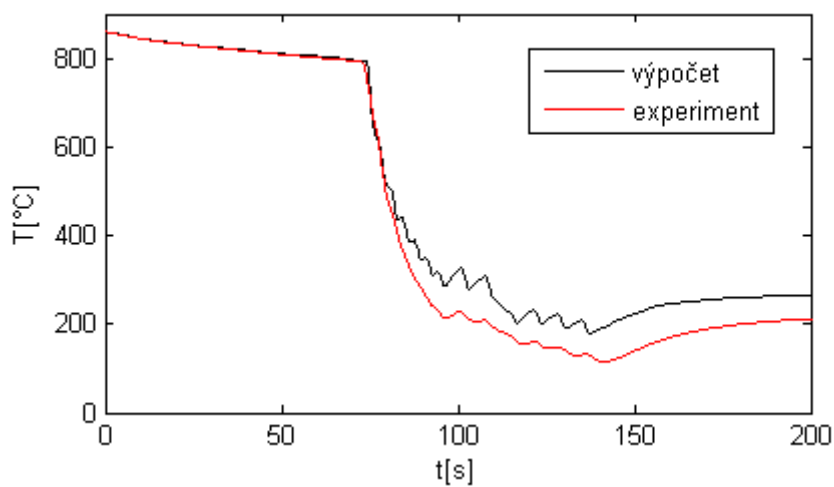
V nastavení zatěžovacích kroků zapnu kontrolu při řešení analýzy. V tomto případě je hodnota transientního integračního parametru  $\theta = 1$ . Jedná se o tzv. zpětnou Eulerovu metodu. Protože je hodnota transientního integračního parametru kladná, je systém rovnic implicitní. Dále nastavím, aby program při řešení analýzy volil časový krok automaticky.

### 5.4.5. Prezentace výsledku a jejich analýza

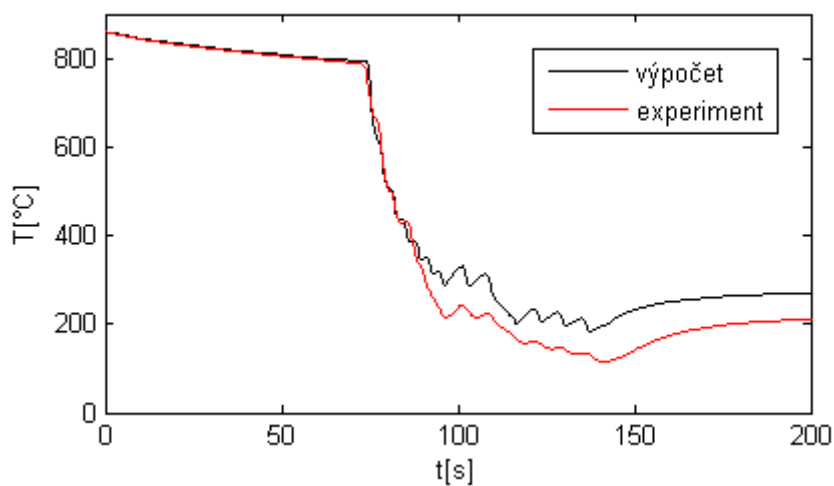
V této kapitole budou srovnány průběhy teplot získané z výpočtového modelování s průběhy získanými experimentálním měřením. Místa na modelu, kde budou průběhy sledovány odpovídají polohám termočlánků při experimentálním měření (obr.20).



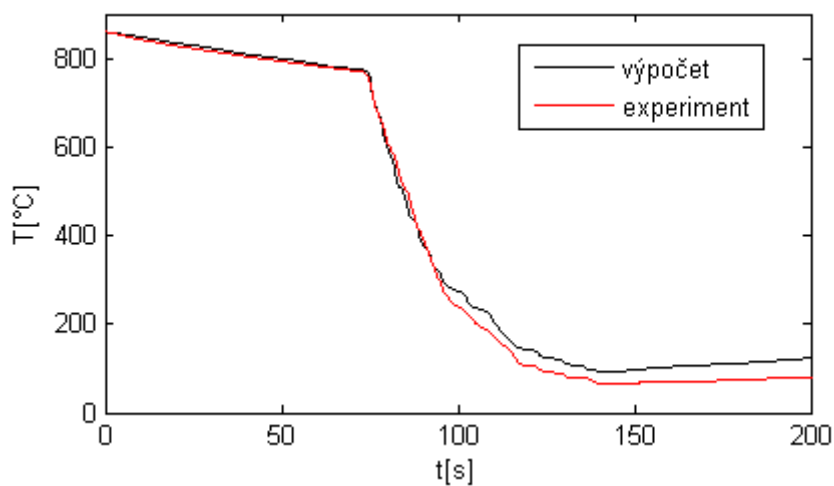
Obr.31: Časový průběh teplot v místě 1



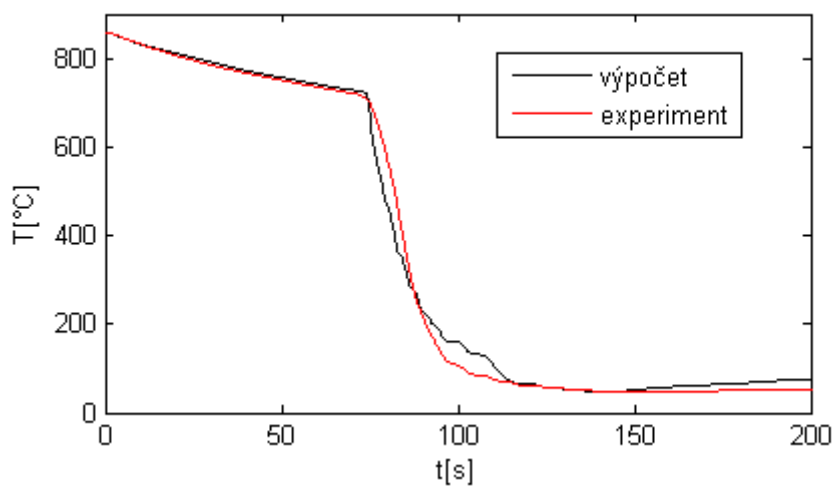
Obr.32: Časový průběh teplot v místě 2



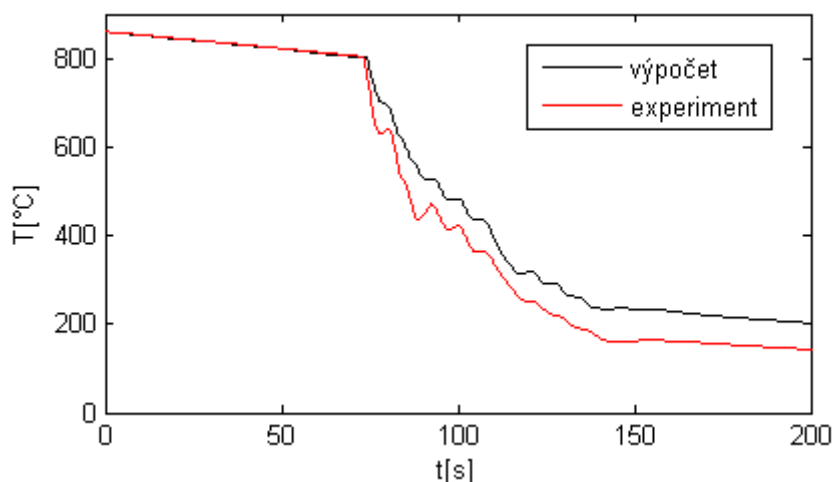
Obr.33: Časový průběh teplot v místě 3



Obr.34: Časový průběh teplot v místě 4



Obr.35: Časový průběh teplot v místě 5



Obr.36: Časový průběh teplot v místě 6

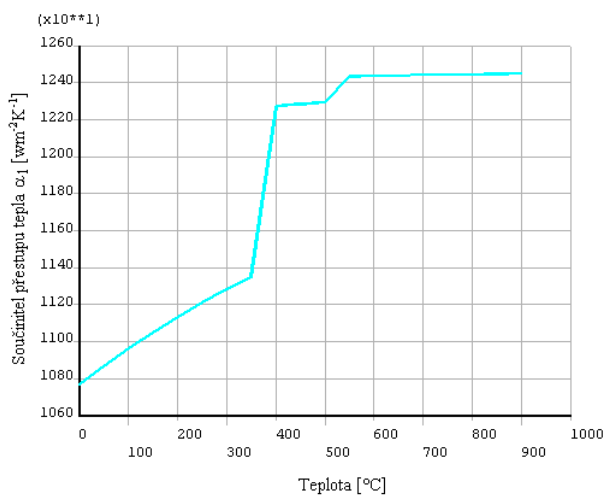
Z obrázků je patrné, že průběhy teplot ve výpočtovém modelování jsou rozdílné jak průběhy z experimentálního měření. Při chlazení vzorku v laboratoři bylo chlazení intenzivnější, zejména v místě 1,2,3 a 6. Bude tedy provedena změna okrajových podmínek.

#### 5.4.6. Změna okrajových podmínek

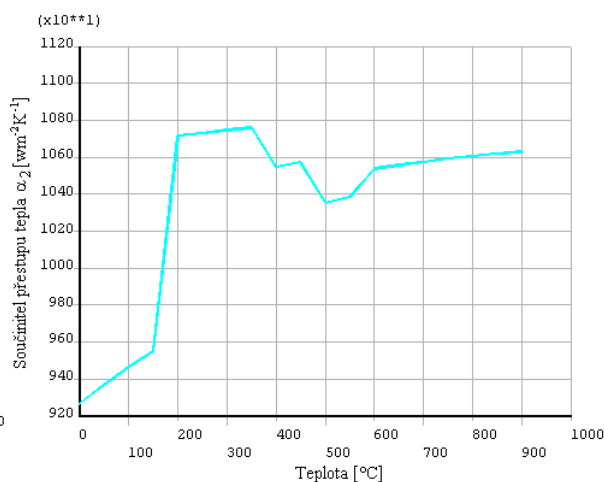
Počáteční a přirozené okrajové podmínky zůstanou stejné jako v kapitole 5.4.2. Délky úseků rozdělující ostřikovou sekci zůstanou taktéž stejné. Změněny budou hodnoty součinitelů přestupu tepla a upraveny jejich teplotní závislosti. Bylo provedeno mnoho variant výpočtů pomocí textového souboru, který jsem si vytvořil. Zde je uvedeno několik součinitelů přestupu tepla, ostatní budou uvedeny v příloze.

Poznámka: Uvedené součinitele přenosu tepla jsou výsledné, zahrnují v sobě konvekci i radiaci. Jsou aplikovány na stejné plochy jako v předešlé simulaci viz. Tabulka 2.

Součinitel  $\alpha_0$ , který odpovídá stavu kdy se kolejnice nachází na vzdušné atmosféře změněn nebude, protože jemu odpovídající průběh teplot se velmi dobře shoduje s experimentálním měřením.



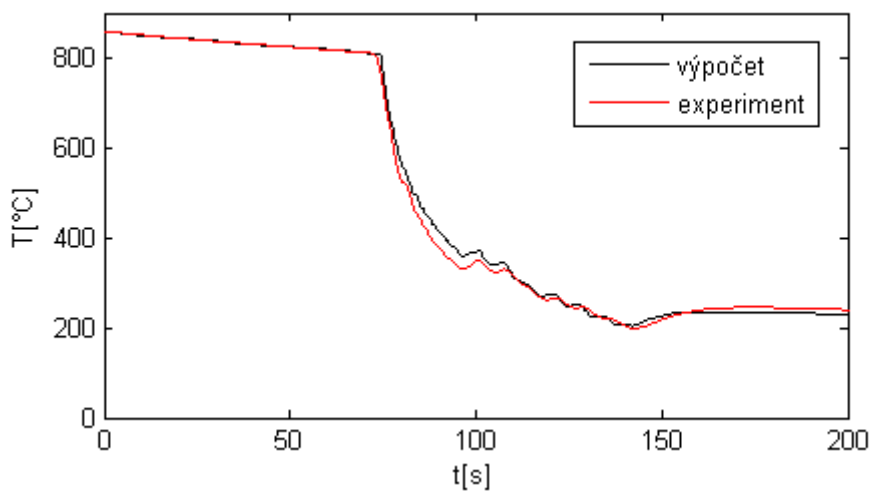
Obr.37: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_1$



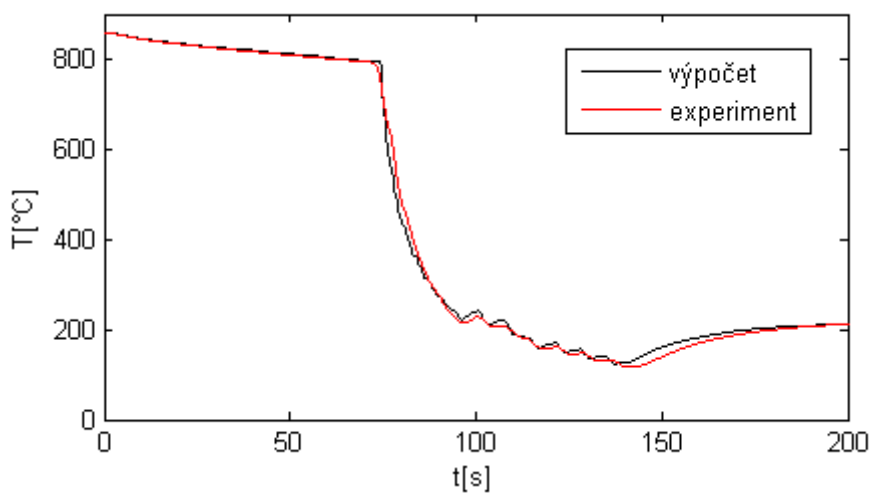
Obr.38: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_2$

### 5.4.7. Prezentace výsledků a jejich analýza

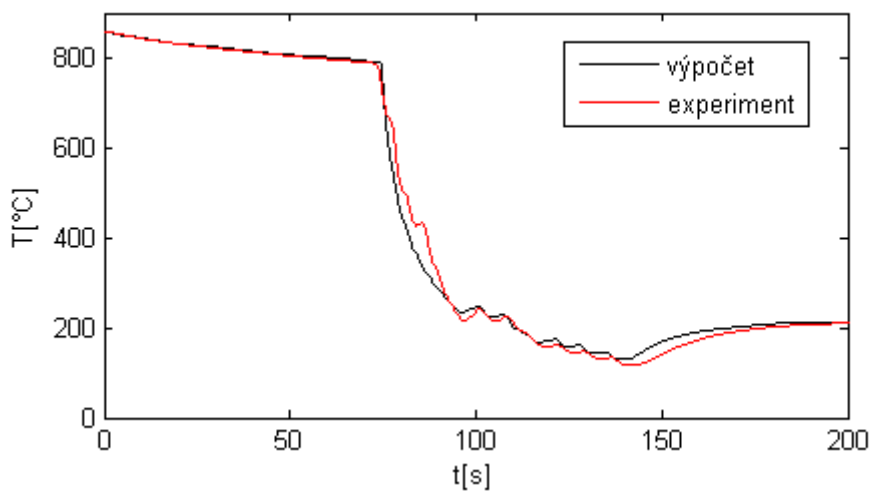
Teplotní průběhy na modelu v místech, kde byly umístěny termočlánky při experimentálním modelování:



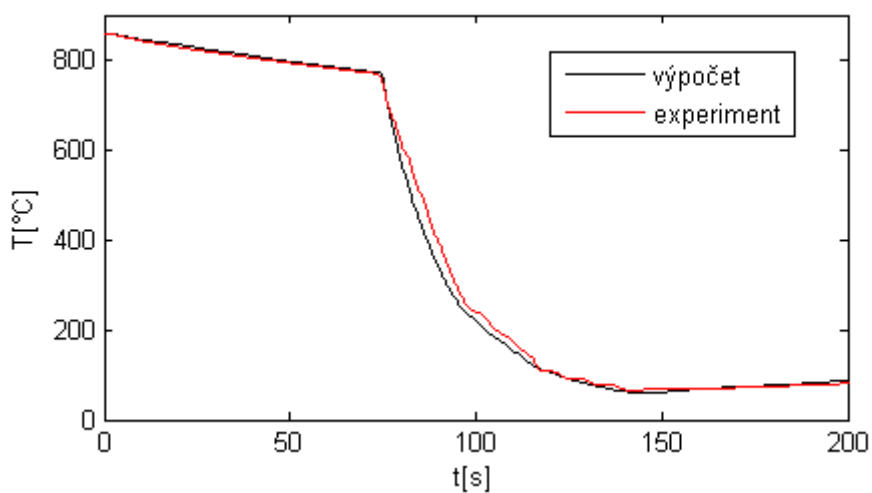
Obr.39: Časový průběh teplot v místě 1



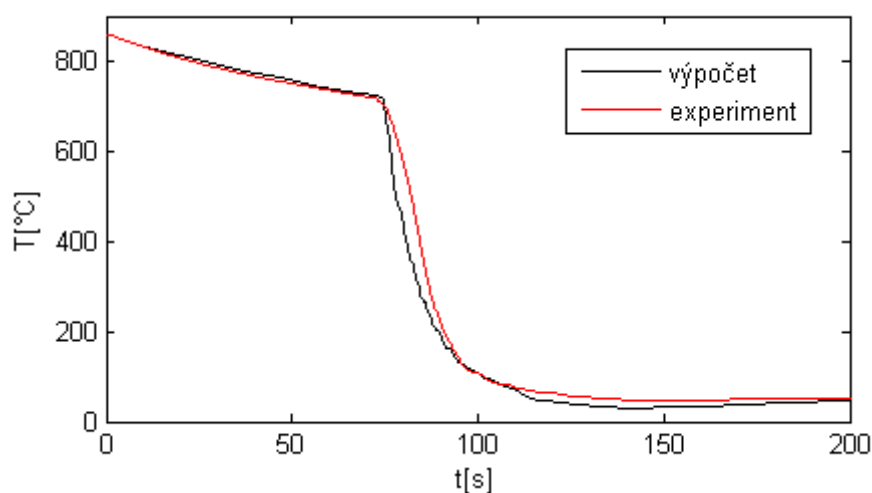
Obr.40: Časový průběh teplot v místě 2



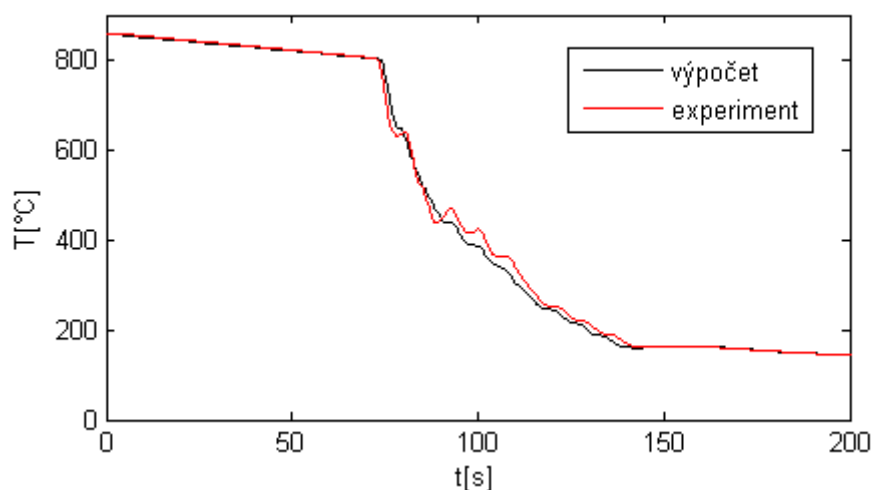
Obr.41: Časový průběh teplot v místě 3



Obr.42: Časový průběh teplot v místě 4



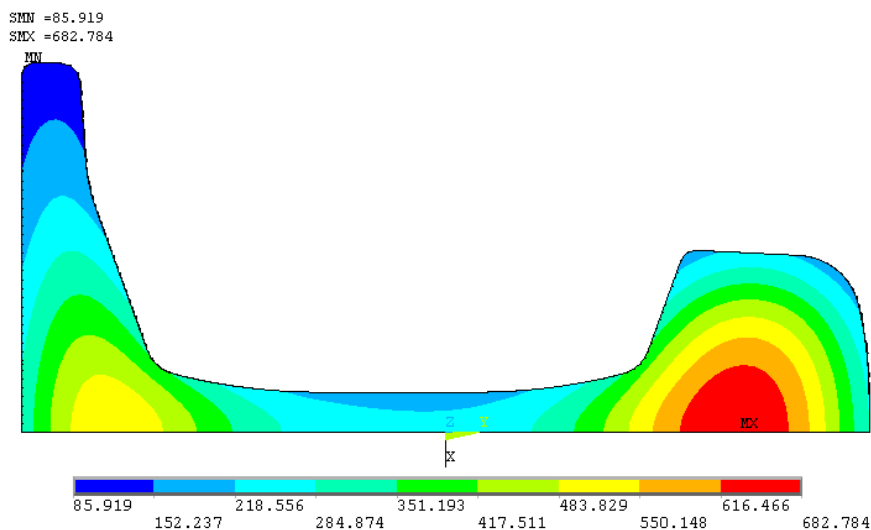
Obr.43: Časový průběh teplot v místě 5



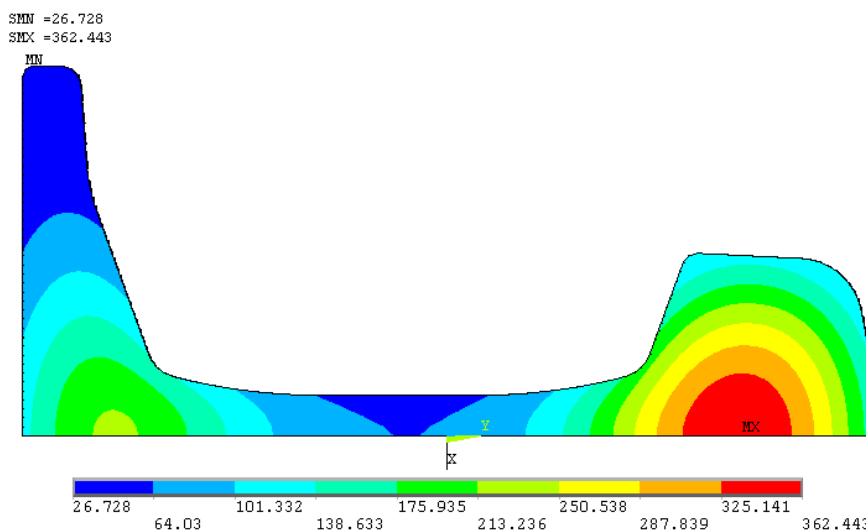
Obr.44: Časový průběh teplot v místě 6

Při ostříku kolejnice dochází k odrazům vodního paprsku a vzniku vodní páry. Dále se zde může projevit Leidenfrostův efekt. Je to jev, při kterém kapalina nacházející se v blízkém kontaktu zahřátého povrchu nad Leidenfrostův bod vytvoří izolační vrstvu páry. Je tedy velmi obtížné určit součinitel přestupu tepla na všechny plochy modelu po celou dobu simulace. Na základě souladu průběhů teplot lze simulaci považovat za vhodné řešení.

Na následujících obrázcích je zobrazeno teplotní pole modelu v určitých časových okamžicích. Čas  $t = 100$  s, přibližně odpovídá situaci, kdy se kolejnice nachází v polovině chladicího zařízení. Době kdy vzorek projede chladícím zařízením a nachází se na vzdušné atmosféře odpovídá čas  $t = 142$  s.



Obr.45: Teplotní pole modelu v čase  $t = 100\text{ s}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]



Obr.46: Teplotní pole modelu v čase  $t = 142\text{ s}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]

### 5.5. Výpočet pole napětí v průběhu procesu chlazení vzorku z uhlíkové oceli

Řešení bude mít dva nezávislé kroky. V prvním, výpočtově stanovém nestacionární teplotní pole v průřezu kolejničky a v druhém kroku odpovídající mechanické veličiny, což jsou napětí, deformace a posuvy.

### 5.5.1. Simulace procesu chlazení

#### 5.5.1.1. Model geometrie

Vzorek z austenitické nerezové oceli je vyroben se stejnými rozměry jaké má kolejnice z uhlíkové oceli. Model geometrie bude tedy shodný s modelem z kapitoly 5.4.1.

#### 5.5.1.2. Počáteční a okrajové podmínky teplotního výpočtu

Experimentální měření vzorku z uhlíkové oceli začínalo z vyšší teploty než měření nerezového vzorku. Byla tedy zadána počáteční podmínka: homogenní teplotní pole v objemu modelu o teplotě 942.

Přirozené okrajové podmínky zůstávají stejné jako u simulace vzorku z nerezového materiálu.

Jedním z cílů práce je porovnat chování modelů s vlastnostmi nerezové a uhlíkové oceli, při stejných okrajových podmínkách. Budou tedy použity stejné hodnoty součinitelů přestupu tepla jako v kapitole 5.4.6. Změní se jenom délka úseku 0, protože při experimentálním měření byla manipulace se vzorkem z uhlíkové oceli kratší jako u vzorku z nerezové oceli. Odečteno z obr.23  $t_0 = 16,17 \text{ s}$

$$l_0 = t_0 \cdot v = 16,17 \cdot 0,3 = 4,851$$

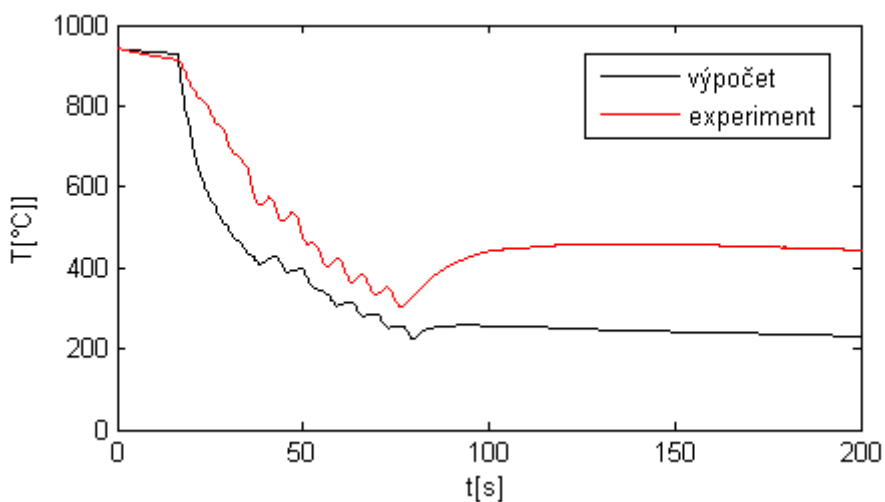
$$l_0 = 4,851 \text{ m}$$

#### 5.5.1.3. Model materiálu

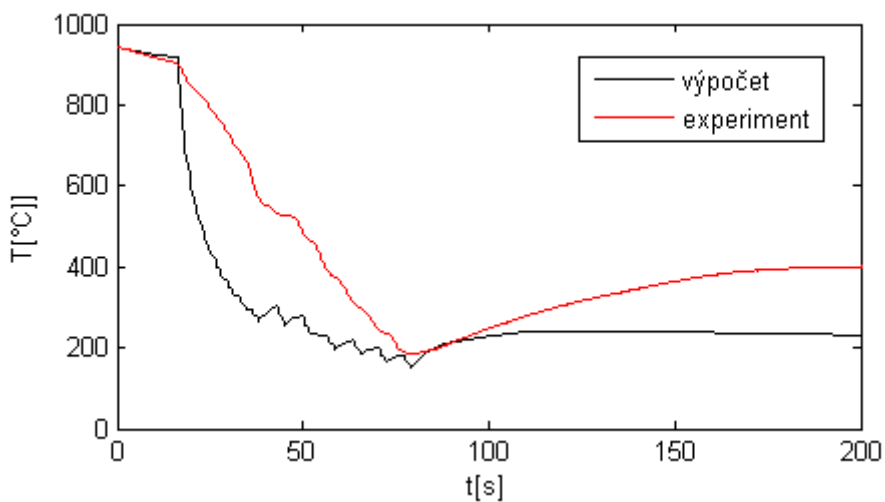
Termofyzikální vlastnosti jsou uvedeny v kapitole 5.1. a jsou zadány tabelárně do programu ANSYS pomocí tzv. materiálového modelu.

#### 5.5.1.4. Presentace výsledků a jejich analýza

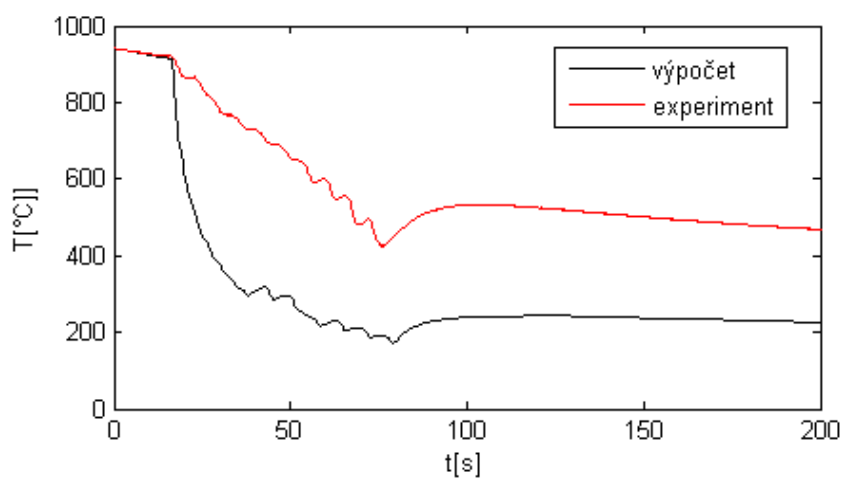
Na následujících obrázcích jsou porovnány vypočtené průběhy teplot s průběhy získanými experimentálním měřením.



Obr.47: Časový průběh teplot v místě 1



Obr.48: Časový průběh teplot v místě 2

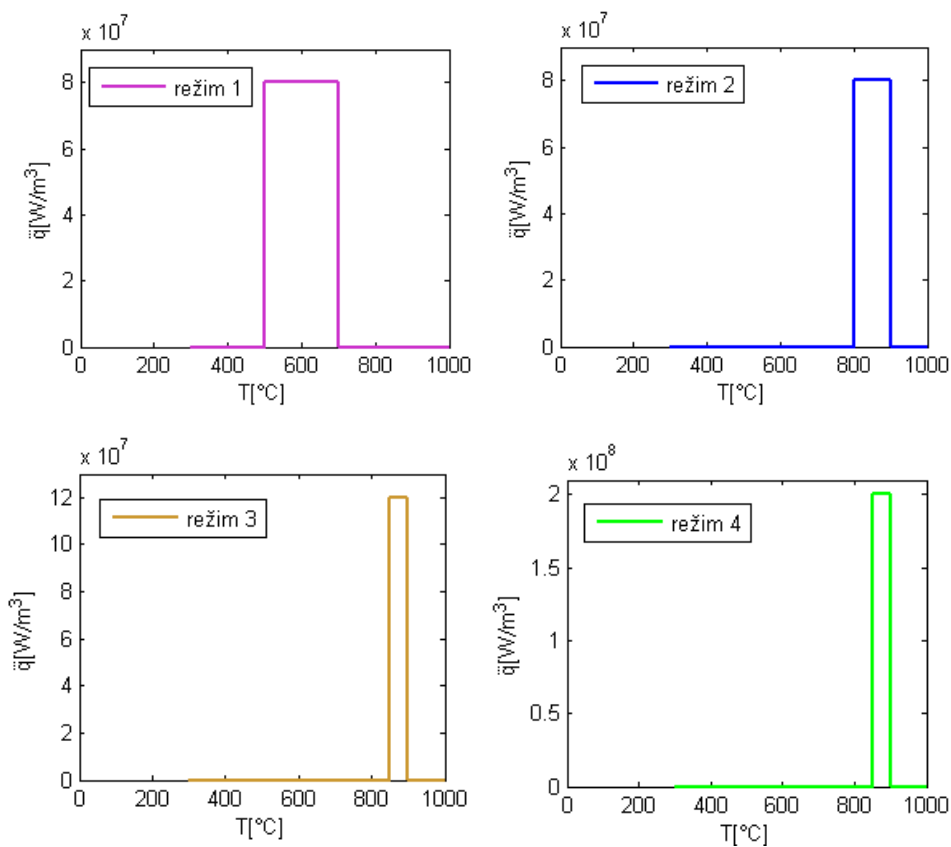


Obr.49: Časový průběh teplot v místě 3

Teplotní záznamy s experimentálního měření se výrazně liší od teplot vypočtených na modelu. Z obrázků je patrné, že vzorek z uhlíkové oceli je ochlazován mnohem pozvolněji než vzorek z oceli nerezové. Také opětovný nárůst povrchových teplot po ukončení ostříku u vzorku z uhlíkové oceli je mnohem větší. Jeden z největších vlivů je uvolnění latentního tepla při fázové přeměně z austenitu na perlit. Pokusím se tedy tento jev zahrnout do výpočtu.

### 5.5.1.5. Uvolnění latentního tepla

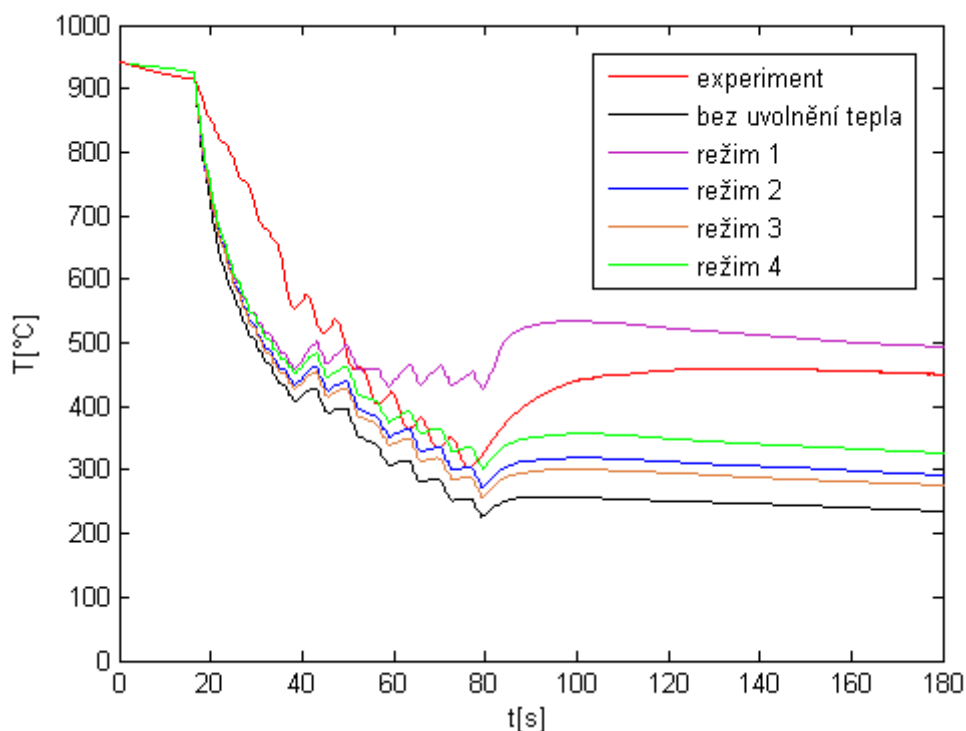
Uvolnění latentního tepla je provedeno tak, že je přidán vnitřní tepelný zdroj. Je to tepelný objemový výkon generovaný v uzlech modelu v určitém teplotním rozsahu. Aby generování výkonu netrvalo příliš dlouho, bude časově omezeno. Je odstraněno v časový okamžik, který odpovídá stavu, kdy se kolejnice nachází bezprostředně za chladícím zařízením. Ostatní okrajové a počáteční podmínky zůstanou nezměněny. Protože nevím kolik tepla a v jakém rozsahu se uvolní, bylo provedeno mnoho variant výpočtů. Na obr. 50 jsou zobrazeny některé varianty generování tepelného výkonu, které byly do uzlů přidány. Z časových důvodů je vyhodnocení zaměřeno pouze na průběh teploty v místě, kde se nacházel termočlánek 1.



Obr.50: Režimy vnitřního tepelného zdroje

### 5.5.1.6. Prezentace výsledků a jejich analýza

Na obr.51 je znázorněn vliv jednotlivých režimů generování tepelného výkonu na průběh teplot v průběhu simulace. Pro názornost je zobrazen i teplotní průběh získaný pomocí experimentu a průběh na výpočtovém modelu, u kterého nebylo zahrnuto generování tepelného výkonu.



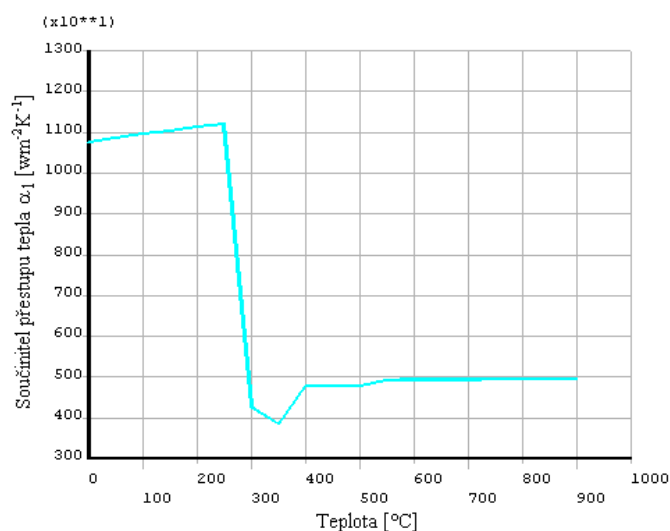
Obr.51: Vliv tepelného výkonu na průběh teplot v místě 1

Je-li teplo uvolňováno v oblasti nižších teplot, dojde k výraznému poklesu rychlosti chlazení v druhé polovině simulace průjezdu chladícím zařízením viz. obr.51 režim 1. Při generování tepelného výkonu v oblasti vyšších teplot se intenzita chlazení zmenší jen nepatrně v celém průběhu simulace průjezdu zařízením. Je tedy velmi pravděpodobné, že na začátku simulace průjezdu, byly součinitele přestupu tepla u vzorku z uhlíkové oceli výrazně menší než u simulace chlazení nerezového vzorku. To může být způsobeno tvorbou okují. U nerezového vzorku k tvorbě okují nedochází. Okuje, které snižují smáčivost povrchu se tvoří při vyšších teplotách. Další vliv na tuto skutečnost může mít Leidenfrostův jev. Byla tedy provedena změna okrajových podmínek.

### 5.5.1.7. Změna okrajových podmínek

Počáteční a přirozené okrajové podmínky zůstanou nezměněny. Generování tepelného výkonu bude provedeno režimem 4. Součinitel  $\alpha_0$ , který odpovídá stavu kdy se kolejnice nachází ve vzdušné atmosféře, bude ponechán, protože jemu odpovídající průběh teplot se dobře shoduje s experimentálním měřením.

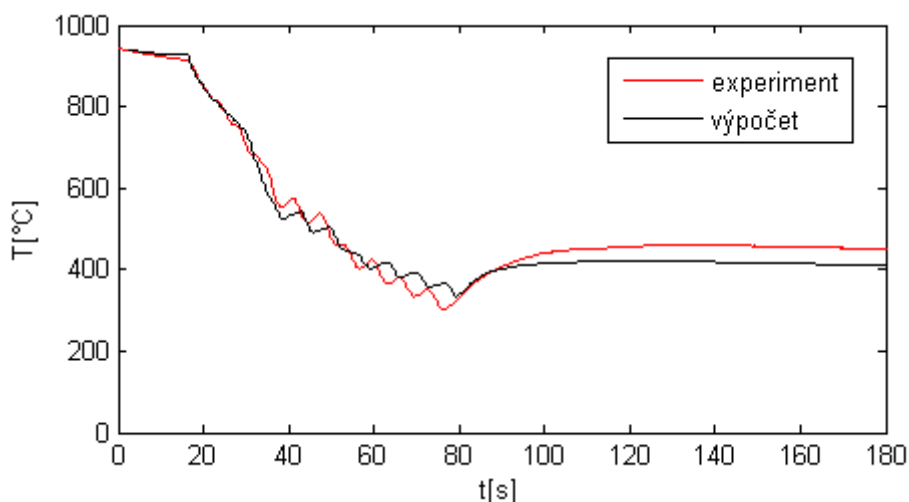
Snížím hodnoty součinitelů přestupu tepla v oblasti vyšších teplot. Pomocí textového souboru provedu mnoho výpočtů. Teplotní závislost součinitele přestupu tepla  $\alpha_1$  je znázorněna na obr. 52. Tento součinitel je aplikován na plochy modelu, pod kterými se při experimentálním měření nacházel termočlánek 1. Ostatní součinitele přestupu tepla jsou uvedeny v příloze.



Obr.52: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_1$

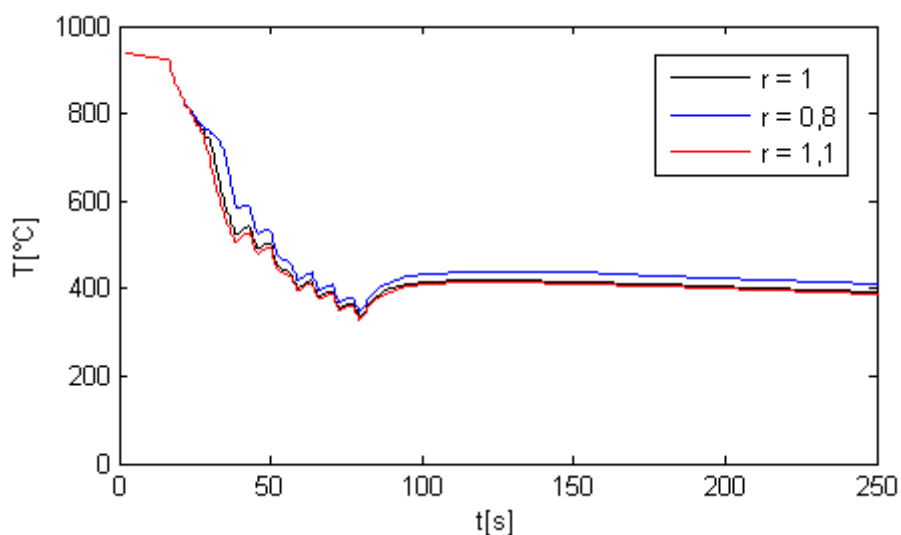
### 5.5.1.8. Prezentace výsledků a jejich analýza

Na obr. 53 je znázorněn průběh teplot po úpravě součinitelů přestupu tepla s generováním tepla dle režimu 4.



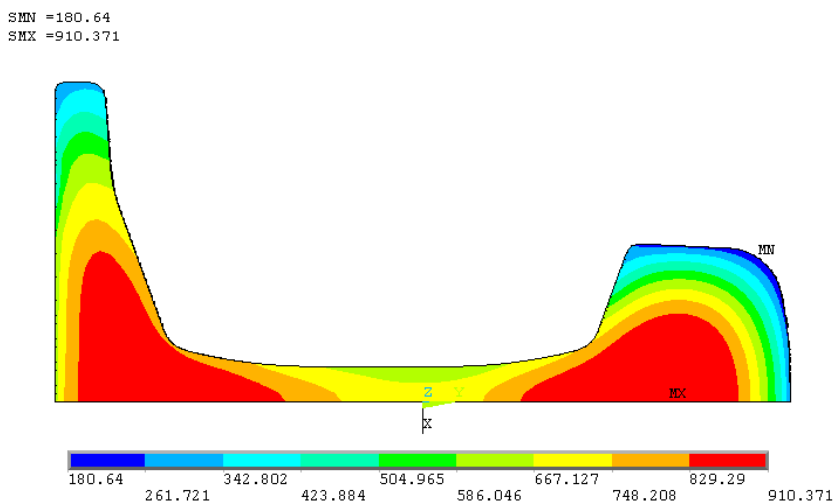
Obr.53: Časový průběh teplot v místě 1

Vypočtený průběh teplot v místě, kde se při experimentálním měření nacházel termočlánek 1 dobře odpovídá experimentu. Hodnota tepelného objemového výkonu a součinitelů přestupu tepla vzájemně ovlivňuje průběh teplot. Kdyby byl součinitel přestupu tepla menší, došlo by k příliš velkému poklesu rychlosti ochlazování. Naopak jestliže součinitel bude mít větší hodnotu, materiál bude chlazen intenzivněji a opětovný nárůst povrchových teplot po ukončení ostříku bude menší, než je na výpočtovém modelu viz. obr. 53. Na obrázku 54 je znázorněn vliv součinitelů přestupu tepla na průběh teploty v místě 1. Teplotní závislost součinitelů přestupu tepla z kapitoly 5.5.1.7. je upravena tak, že pro teplotu  $300^{\circ}\text{C}$  je jejich hodnota vynásobena konstantou  $r$ .

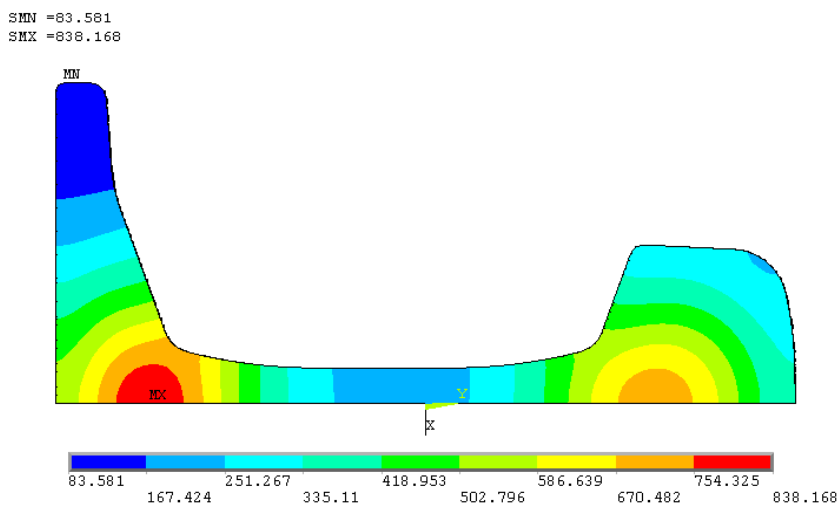


Obr.54: Vliv součinitele přestupu tepla na průběh teplot v místě 1

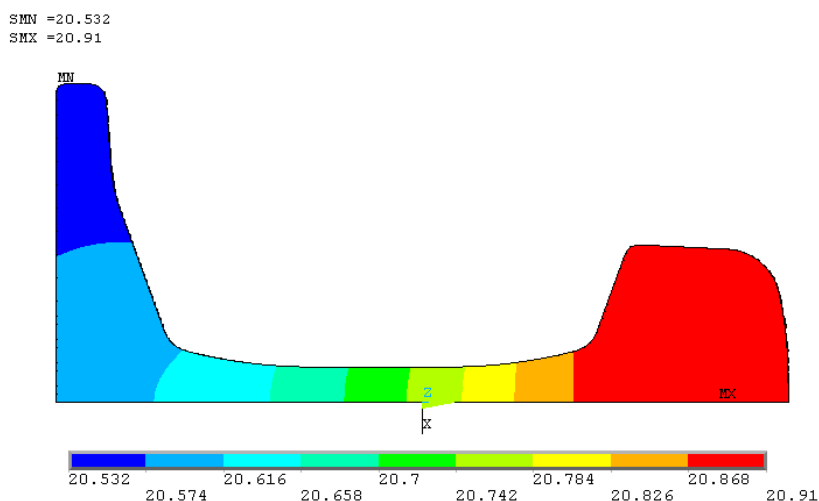
Na následujících obrázcích je zobrazeno teplotní pole modelu v určitých časových okamžicích. Čas  $t = 38$  s, přibližně odpovídá situaci, kdy se kolejnice nachází v polovině chladicího zařízení. Době kdy vzorek projede chladícím zařízením a nachází se na vzdušné atmosféře odpovídá čas  $t = 83$  s. Jelikož budu hodnotit reziduální napětí, musí model na konci simulace v čase  $t = 7200$  s pokojovou teplotu.



Obr.55: Teplotní pole modelu v čase  $t = 38$  s [°C]



Obr.56: Teplotní pole modelu v čase  $t = 83$  s [°C]



Obr.57: Teplotní pole modelu v čase  $t = 7200$  s [°C]

Z obr.56 je patrné, že v místě paty modelu kolejnice je vysoká teplota. Z časových důvodů je vyhodnocení zaměřeno jen na jeden termočlánek. Metoda funguje, nicméně verifikace výpočtových výsledků v oblasti paty kolejnice by vyžadovala další analýzy, což nebylo zvládnutelné.

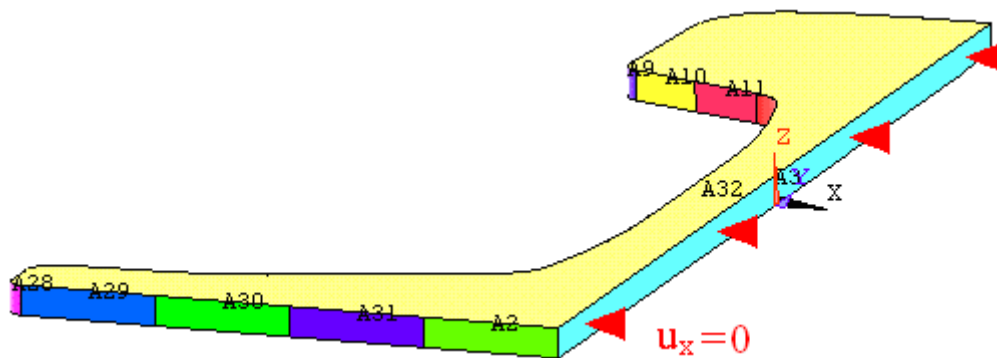
## 5.5.2. Výpočtové stanovení pole napjatosti vzorku z uhlíkové oceli

### 5.5.2.1. Model geometrie

V programovém systému ANSYS je změněna teplotní transientní úloha na strukturální. Program automaticky nahradí prvky SOLID70 za prvky SOLID185. Je to prvek který má stejný počet uzlů a stejné modifikace vyjma pyramidové, která se v mém modelu nenachází. V každém uzlu má tři stupně volnosti: translace ve směrech hlavního souřadného systému.

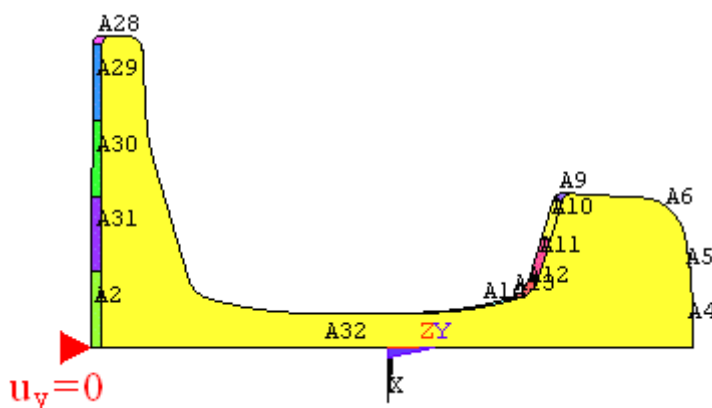
### 5.5.2.2. Okrajové podmínky

Protože je při řešení problému využívána rovina symetrie kolejnice, bude aplikována na výpočtový model symetrická okrajová podmínka. Budou zamezeny posuvy ve směru osy  $x$  uzlům, které se nacházejí na ploše 3 (obr.58).



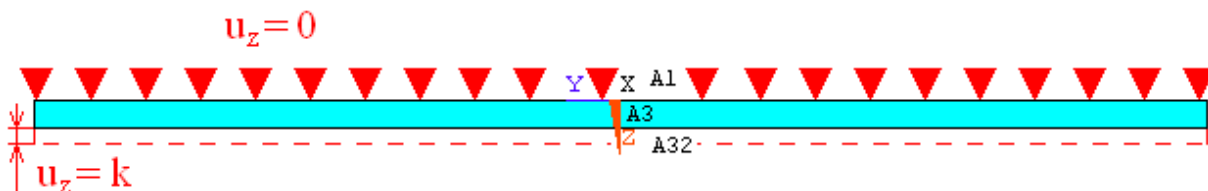
Obr.58: Symetrické okrajové podmínky

Kontakt kolejnice s válečkem bude v modelu realizován okrajovou podmínkou tak, že bodu nacházejícímu se na spodní hraně v rovině symetrie bude zamezen posunutí ve směru osy y (obr.59).



Obr.59: Okrajová podmínka představující kontakt kolejnice s válečkem

Je předpokládáno, že během procesu chlazení zůstává plocha modelu představující příčný průřez kolejnice rovinná a posouvá se v axiálním směru. Na plochu 1 budou předepsány nulové posuvy ve směru osy z a svázaný posuvy ve směru této osy všech uzlů, které náleží ploše 32 (obr.60).



Obr.60: Okrajová podmínka svazující posuvy v ploše 32

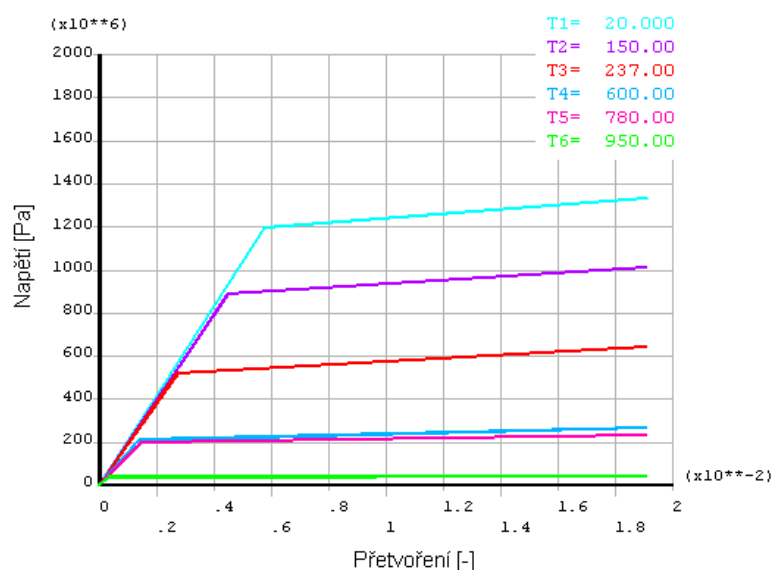
Model bude zatěžován teplotami, které byly vyřešeny v simulaci chlazení.

### 5.5.2.3. Model materiálu

Byl použit bilineární elasto-plastický model materiálu (obr.61). Pro tento model je potřeba určit: Youngův modul pružnosti v tahu (obr.14), mez kluzu (obr.16) a tečný modul, který je uveden v tab.3

Teplota [°C]	20	150	273	600	780	950
Tečný modul [MPa]	10000	8640	7720	3350	2000	200

Tab.3: Teplotní závislost tečného modulu uhlíkové oceli



Obr.61: Bilineární model materiálu

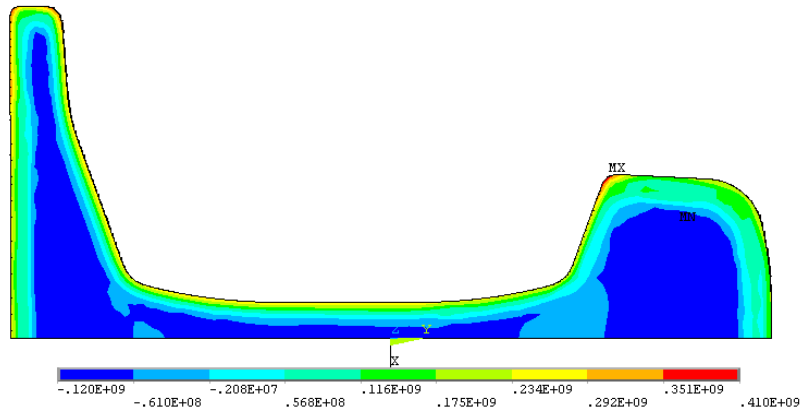
Jelikož se mezní stav pružnosti může během chladicího procesu opakovaně překročit, je nutné do výpočtu zahrnout model zpevnění, který definuje následné plochy plasticity. Nejlepší soulad mezi výsledky získanými výpočtovým modelováním a experimentálními výsledky dává kinematické zpevnění [7]. Použijí tedy tento model. Následné mezní plochy plasticity mají stejný tvar jako prvotní mezní plocha, posouvají se však v závislosti na plastické deformaci podle jejich různých závislostí na napětí [7].

Ostatní mechanické vlastnosti jsou uvedeny v kapitole 5.1. a jsou zadány tabelárně do programu ANSYS.

### 5.5.2.4. Prezentace výsledků a jejich analýza

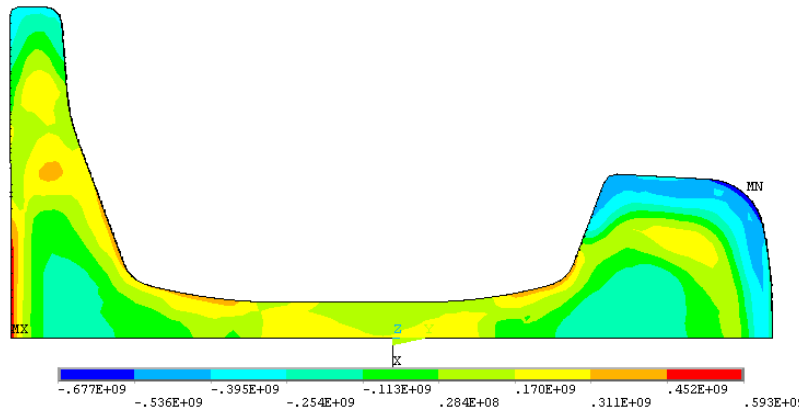
V průběhu chlazení se prvně na povrchu kolejnice vyskytuje tahové a uprostřed tlakové napětí, poté dojde k vystřídání. Tento průběh je znázorněn na napětí ve směru osy z (obr.62 až obr.64). Dále jsou zobrazeny ostatní složky reziduálního napětí a napětí dle HMM.

DMX = .224E-03  
 SMN = -.120E+09  
 SMX = .410E+09



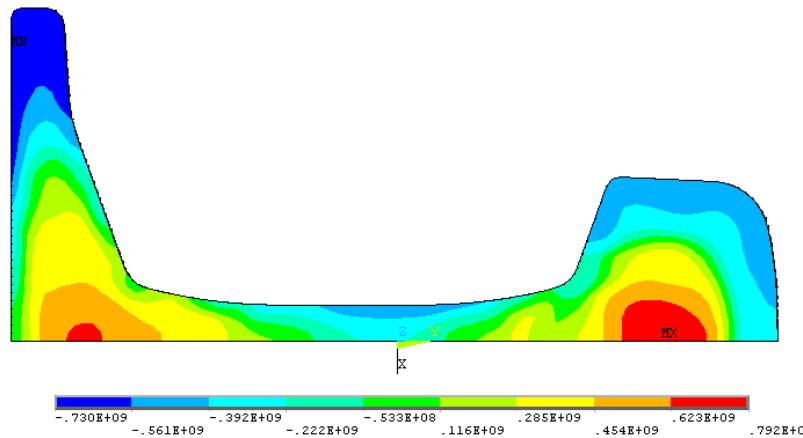
Obr.62: Napětí ve směru osy z v čase  $t = 19,3$  s [Pa]

DMX = .677E-03  
 SMN = -.677E+09  
 SMX = .593E+09

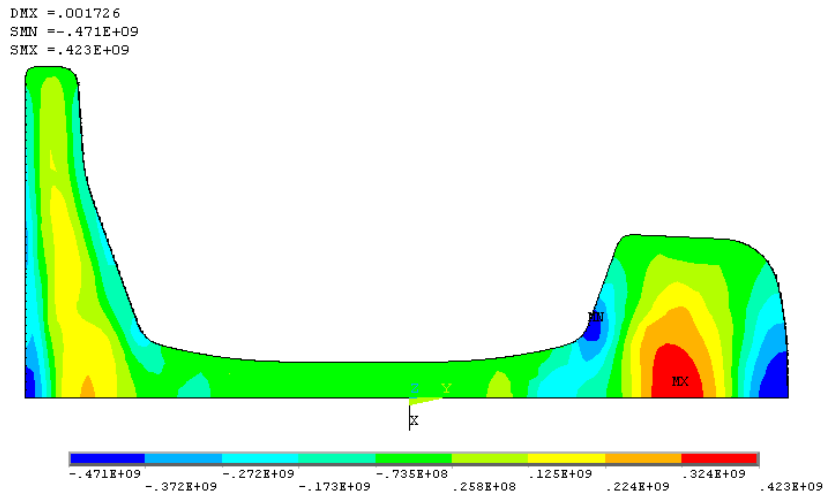


Obr.63: Napětí ve směru osy z v čase  $t = 57$  s [Pa]

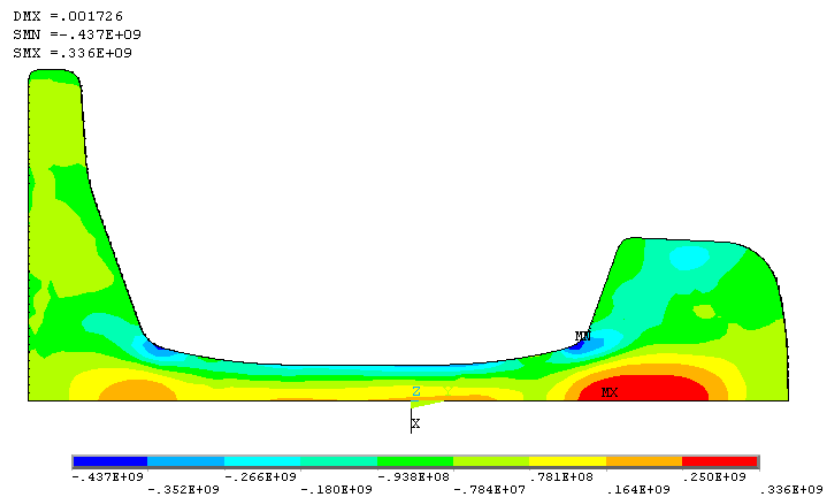
DMX = .001726  
 SMN = -.730E+09  
 SMX = .792E+09



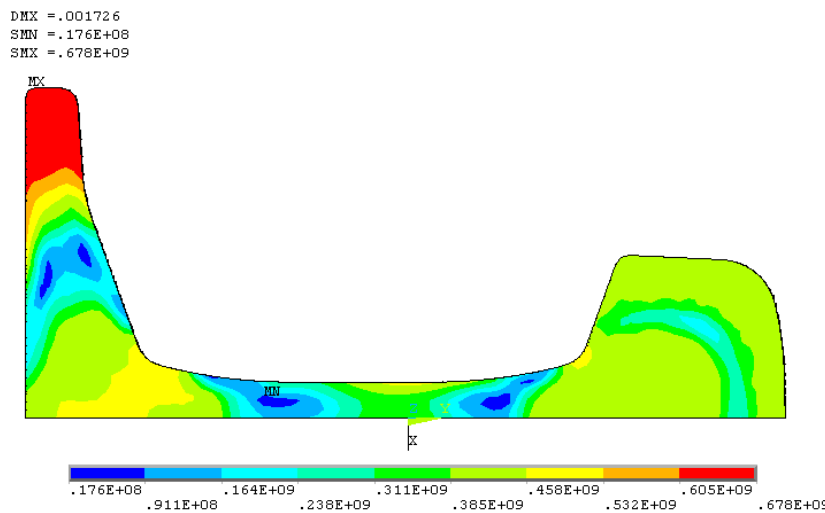
Obr.64: Napětí ve směru osy z v čase  $t = 7200$  s [Pa]



Obr.65: Napětí ve směru osy x v čase  $t = 7200$  [Pa]



Obr.66: Napětí ve směru osy y v čase  $t = 7200$  [Pa]

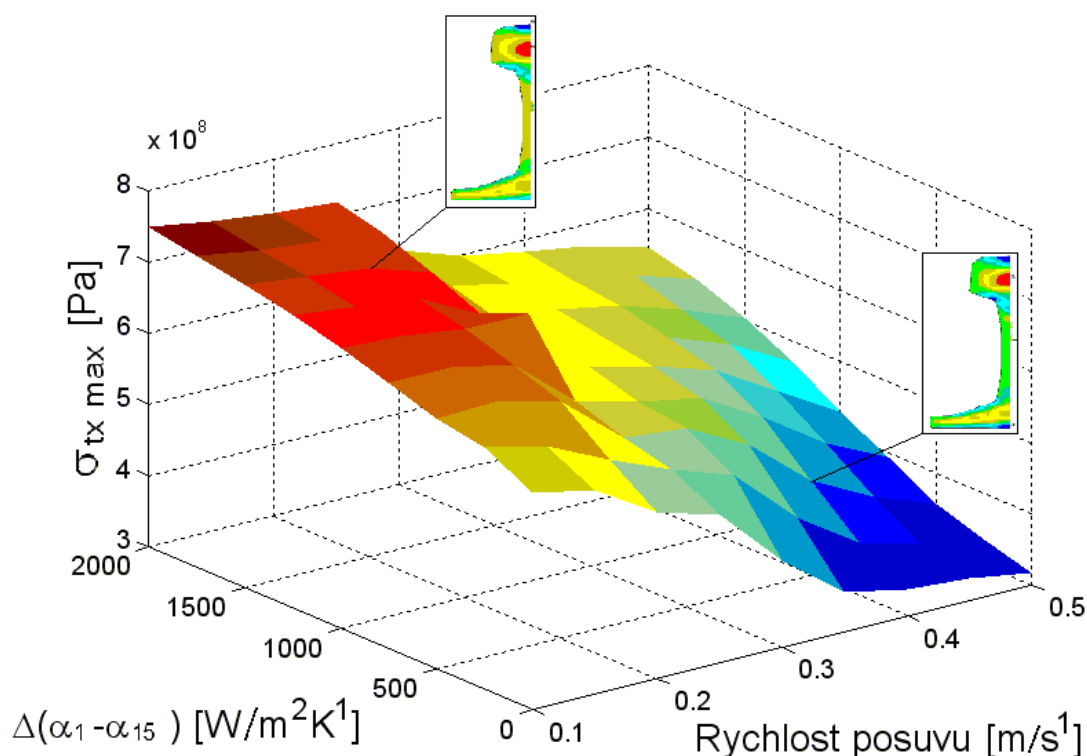


Obr.67: Redukované napětí dle HMH v čase  $t = 7200$  [Pa]

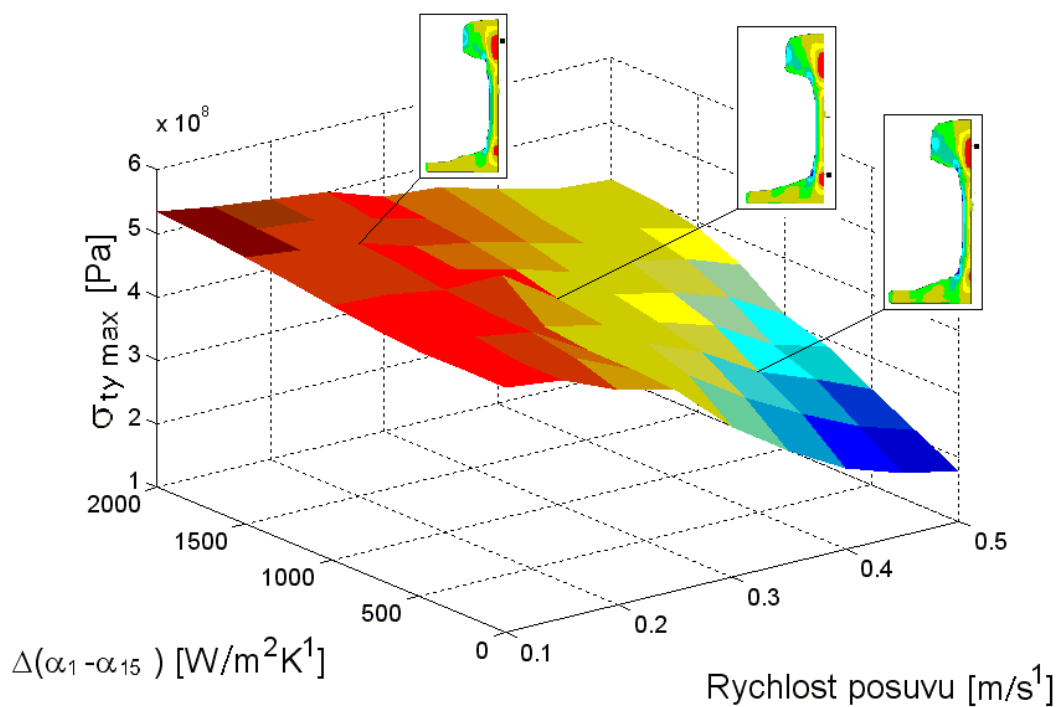
Jelikož jsou reziduální napětí velká, došlo v průběhu ochlazování k podstatným plastickým přetvořením. Je to způsobeno intenzivním chlazením, které vyvolá velké teplotní gradienty v průřezu kolejničky. Maximální hodnota redukovaného napětí je menší než mez kluzu, znamená to tedy, že nedochází k zpětné plastizaci při ochlazení na teplotu okolí. Hodnoty reziduálního napětí v oblasti povrchu kolejničky je možné porovnat experimentálně odvrtávací metodou.

### 5.6. Analýza vlivu doby a intenzity chlazení

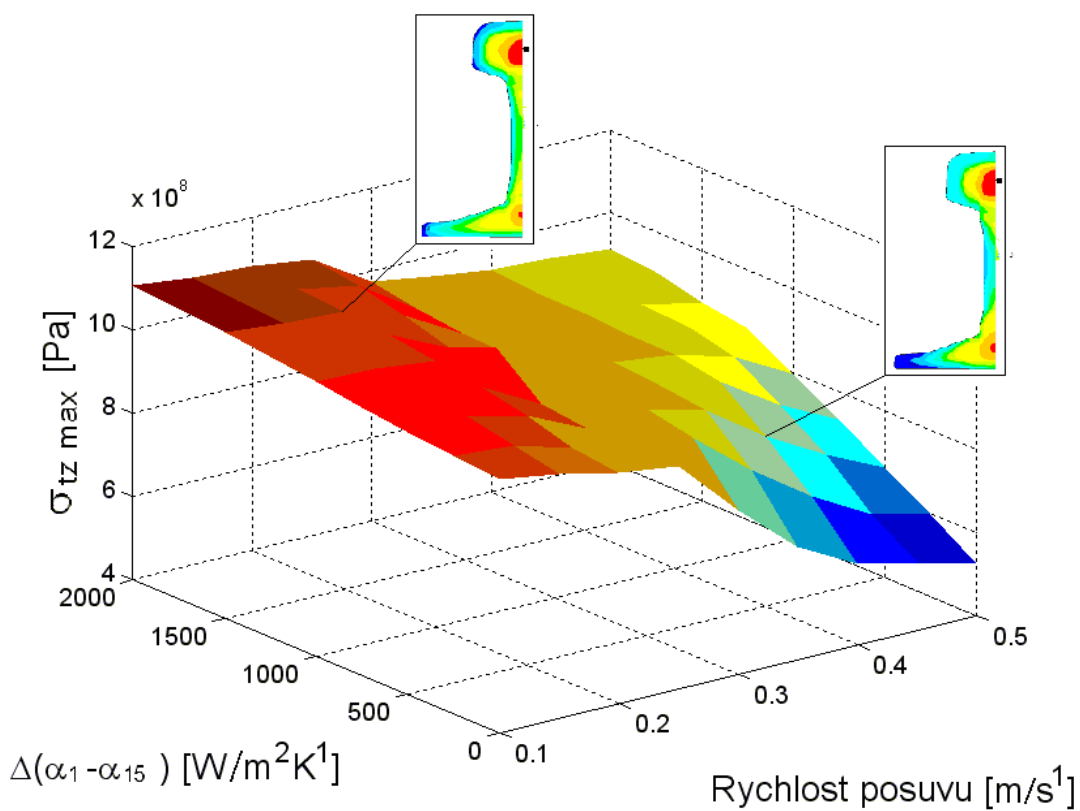
V této kapitole je provedena analýza vlivu rychlosti posuvu kolejničky a hodnoty součinitelů přestupu tepla na reziduální napětí. Na konci simulace se na povrchu kolejničky nachází tlakové napětí, což je z hlediska šíření a tvorby trhlin méně významné než napětí tahové. Jsou tedy sledovány maximální hodnoty tahového a redukovaného napětí. Rychlost posuvu kolejničky bude měněna v rozsahu 0,1 m/s až 0,5 m/s s krokem 0,05 m/s. Jako výchozí hodnoty součinitelů přestupu tepla budou použity z kapitoly 5.5.1.7. K součinitelům  $\alpha_1$  až  $\alpha_{15}$  je přičtena hodnota 2000 [W/m<sup>2</sup>K<sup>1</sup>] s krokem 250 [W/m<sup>2</sup>K<sup>1</sup>].



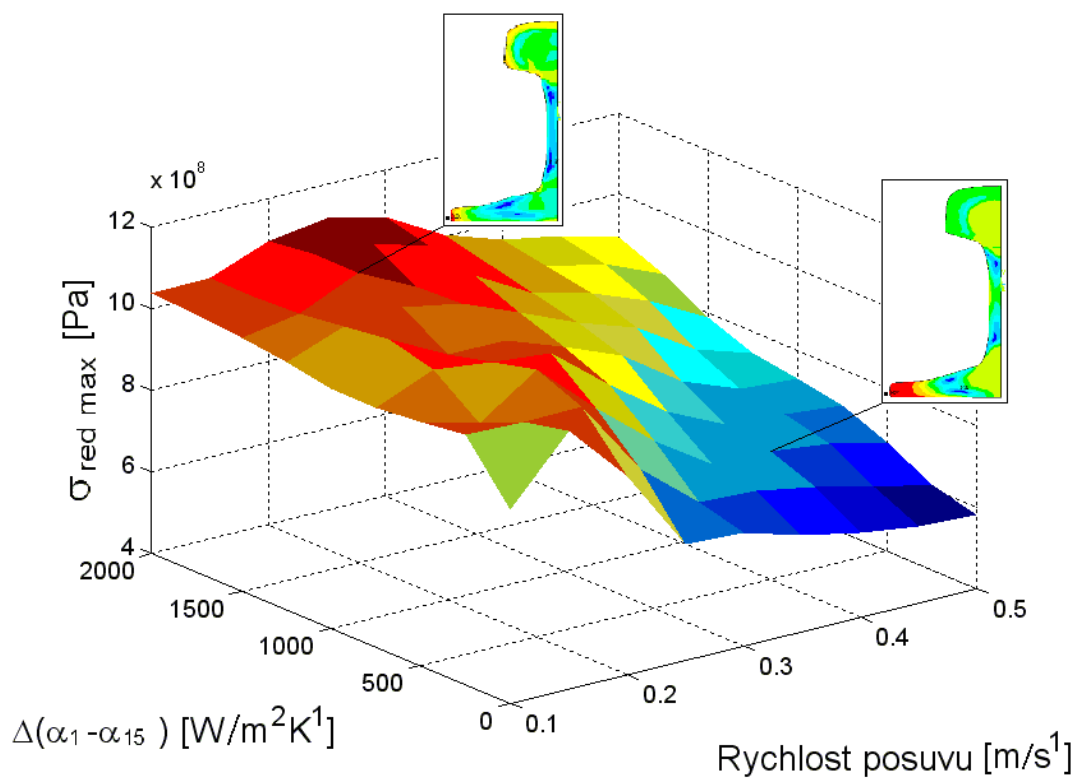
Obr.68: Průběh maximálního tahového napětí ve směru osy  $x$



Obr.69: Průběh maximálního tahového napětí ve směru osy y



Obr.70: Průběh maximálního tahového napětí ve směru osy z



Obr. 71: Průběh maximálního redukovaného napětí dle HMH

Pomocí předchozích obrázků je kvantitativně zhodnocena závislost maximálního tahového a redukovaného napětí na hlavních parametrech chladicího zařízení. Při delší době chlazení a větší hodnotě součinitele přestupu tepla, je reziduální napětí ve směrech globálního souřadného systému větší.

## 6. ZÁVĚR

V první části práce, bylo cílem nastavit okrajové podmínky na vzorek vyrobený z nerezové oceli tak, aby vypočtený průběh teplot odpovídal průběhu experimentálně změřenému. Jednalo se tedy o řešení inverzní úlohy. Z důvodu složitosti řešení problému, probíhaly všechny výpočty metodou opakovaných přímých výpočtů s řízenou změnou vstupních okrajových podmínek, pomocí textového souboru. Vypočtené průběhy teplot se dobře shodovaly s průběhy teplot získaných experimentálním měřením.

Dále byly tyto okrajové podmínky aplikovány na vzorek z uhlíkové oceli. Výsledné průběhy teplot se výrazně lišily od výsledků z experimentálního měření. Ochlazování modelu při výpočtu bylo mnohem intenzivnější. Velký vliv na tuto skutečnost má uvolňování latentního tepla při fázové přeměně z austenitu na perlit.

Uvolnění latentního tepla bylo do výpočtu zahrnuto pomocí generování tepelného výkonu aplikovaného v uzlech prvků. Tepelný výkon byl uvolňován v určitém teplotním rozmezí. Z časových důvodů bylo vyhodnocení zaměřeno jen na jeden termočlánek. Teplotní průběhy se dobře shodovaly s experimentálním měřením. Metoda funguje, nicméně verifikace výpočtových výsledků v oblasti paty kolejnice by vyžadovala další analýzy, což nebylo zvládnutelné.

Dále bylo vyhodnoceno reziduální napětí, při simulaci chlazení. Nestacionární teplotní pole bylo použito jako vstup do deformačně-napěťové analýzy. Reziduální napětí jsou velká, muselo tedy během chlazení docházet k podstatným plastickým deformacím.

V závěrečné části práce byla provedena analýza vlivu doby a intenzity chlazení na reziduální napětí. Z analýzy vyplývá, že čím déle a intenzivněji je vzorek chlazen, tím větší jsou hodnoty reziduálních napětí. Oba vlivy jsou kvantitativně vyhodnoceny. Vytvořený výpočtový model je připraven pro analýzu a optimalizaci procesu chlazení vývalků i pro další typy válcovaných profilů a materiálů.

## 7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Horský J., Kotrbáček P., Raudenský M., Pohanka M., Kellerová H., Stránský M., Horský M.. *Řízené dochlazování kolejnic – 1. část*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Laboratoř přenosu tepla a proudění, 2008.
- [2] Horský J., Kotrbáček P., Raudenský M., Pohanka M., Kellerová H., Stránský M., Horský M.. *Řízené dochlazování kolejnic – 2. část*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Laboratoř přenosu tepla a proudění, 2008
- [3] Horský J., Kotrbáček P., Raudenský M., Pohanka M., Kellerová H., Stránský M., Horský M.. *Řízené dochlazování kolejnic – 3. část*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Laboratoř přenosu tepla a proudění, 2008.
- [4] Pavelek M. *Termomechanika*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003.
- [5] Ringsberg J.W., Lindbäck T. *Rolling contact fatigue analysis of rails including numerical simulations of the rail manufacturing process and repeated wheel-rail contact loads*. International Journal of fatigue 25, 2003
- [6] Studijní opory předmětu Zkoušení materiálů a výrobků. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství  
<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/Index.html>
- [7] Janíček P., *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky, hledání souvislostí*. CERM 2007
- [8] ANSYS 11.0 product help

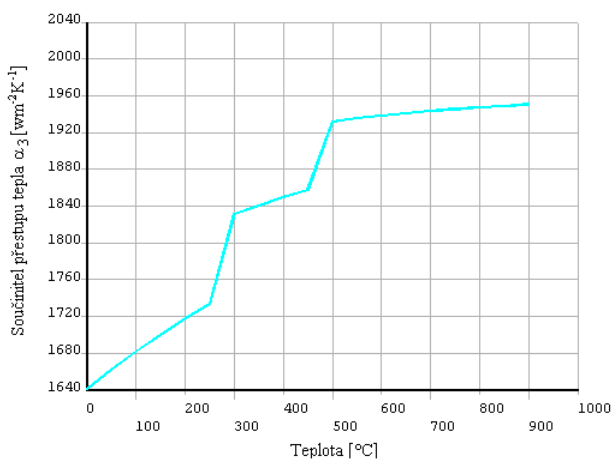
## 8. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

MKP	metoda konečných prvků	
APDL	ANSYS parametric design language	
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	$[MPa]$
$\dot{q}$	měrný tepelný tok	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	$\left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$
$\alpha_z$	ekvivalentní součinitel přestupu tepla zářením	$\left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$
$T_w$	teplota povrchu tělesa	$[K]$
$T_\infty$	teplota okolí tělesa	$[K]$
$\sigma$	Stefan-Boltzmanova konstanta	$\left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right]$
$\varepsilon$	poměrná zářivost	$[-]$
$[C]$	matice měrné tepelné kapacity	$\left[ \frac{J}{kgK} \right]$
$[K]$	matice tepelné vodivosti	$\left[ \frac{W}{mK} \right]$
$\{u\}$	vektor teplot v uzlech	$[K]$
$\{\dot{u}\}$	vektor rychlosti změny teplot v uzlech	$\left[ \frac{K}{s} \right]$
$F$	vektor zatížení	$\left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$
$\theta$	transientní integrační parametr	$[-]$
$t_0$	čas simulace v úseku 0	$[s]$
$l_0$	délka úseku 0	$[m]$

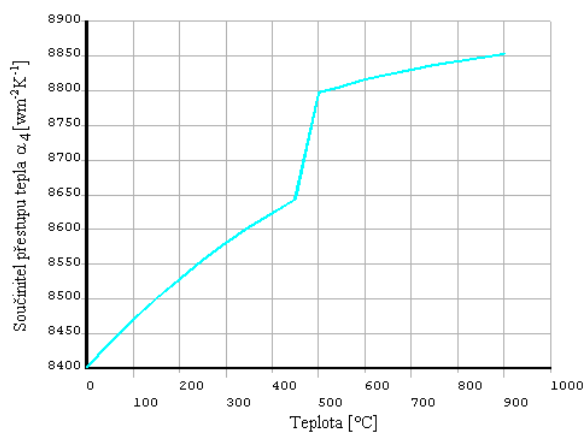
$\sigma_{tx \max}$	maximální tahové napětí ve směru osy x	[Pa]
$\sigma_{ty \max}$	maximální tahové napětí ve směru osy y	[Pa]
$\sigma_{tz \max}$	maximální tahové napětí ve směru osy z	[Pa]
$\sigma_{red \max}$	maximální redukované napětí	[Pa]
$r$	konstanta	[-]
$\ddot{q}$	měrný objemový výkon	$\left[ \frac{W}{m^3} \right]$

## 9. PŘÍLOHA

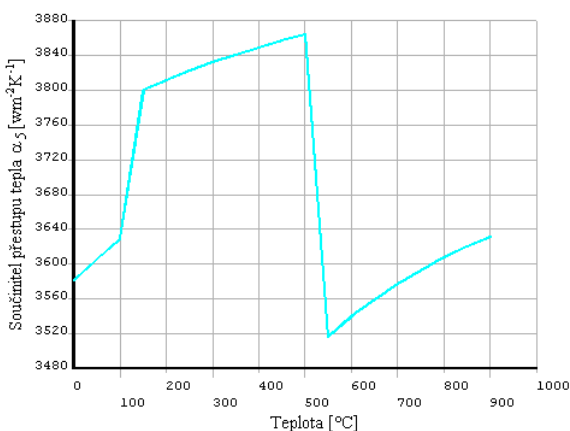
Okrajové podmínky v simulaci chlazení nerezového vzorku, kapitola 5.4.6



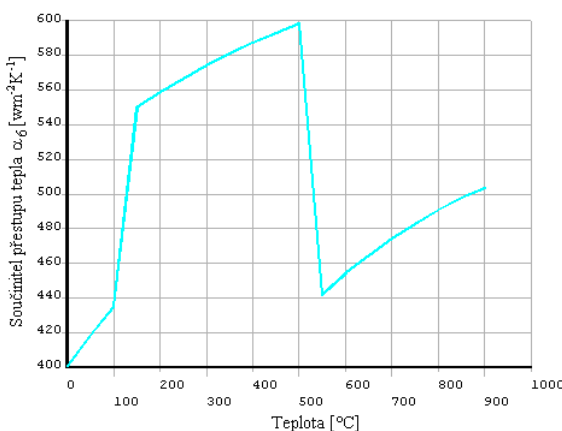
Obr. 72: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_3$



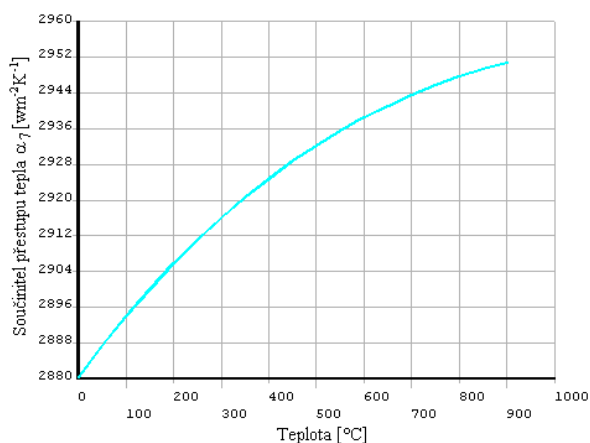
Obr. 73: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_4$



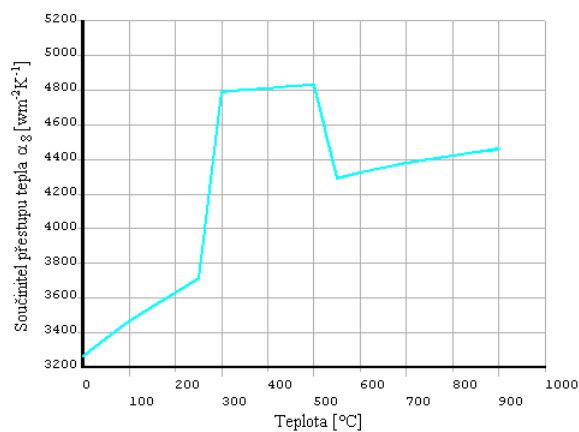
Obr. 74: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_5$



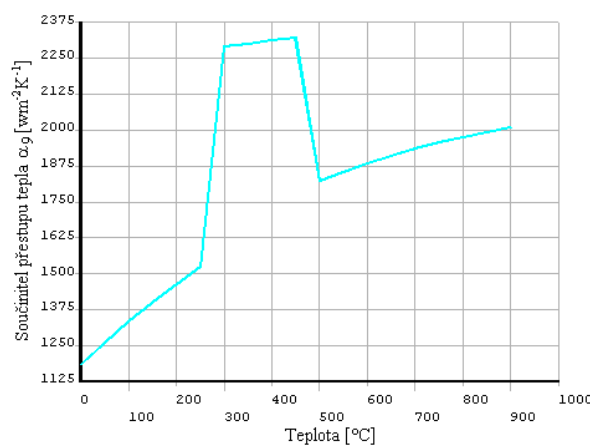
Obr. 75: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_6$



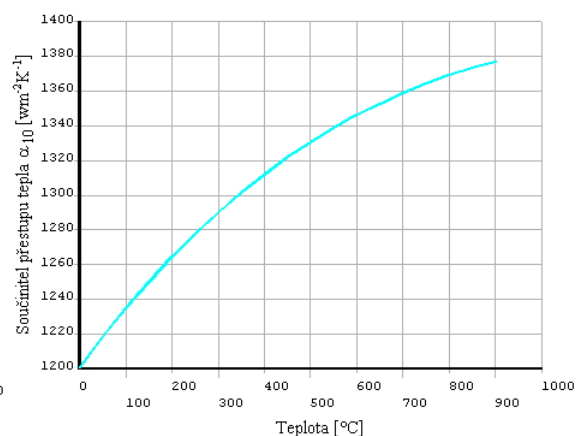
Obr.76: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_7$



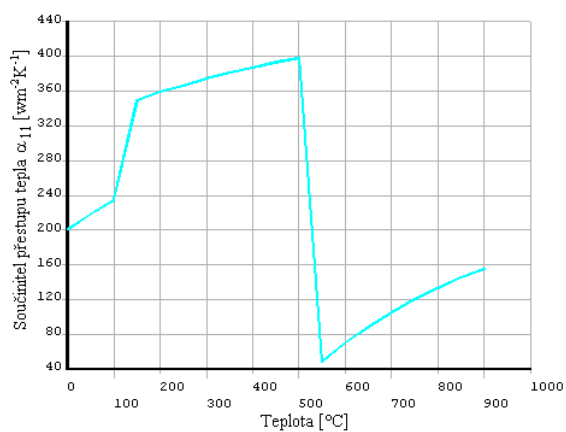
Obr.77: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_8$



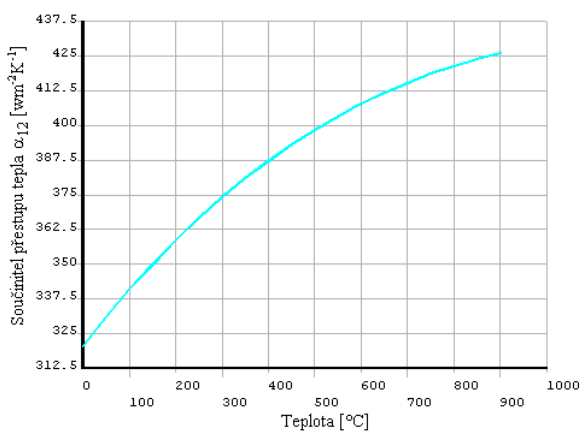
Obr.78: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_9$



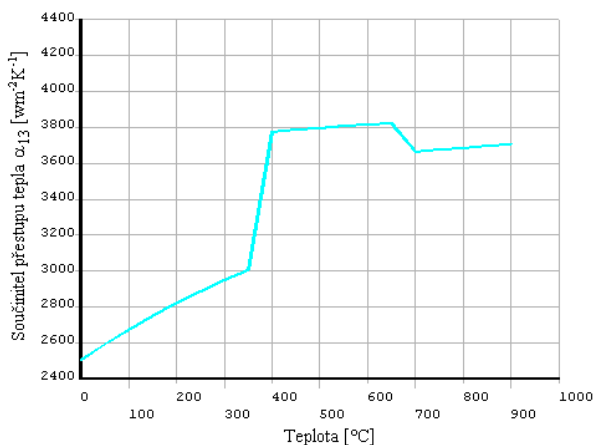
Obr.79: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_{10}$



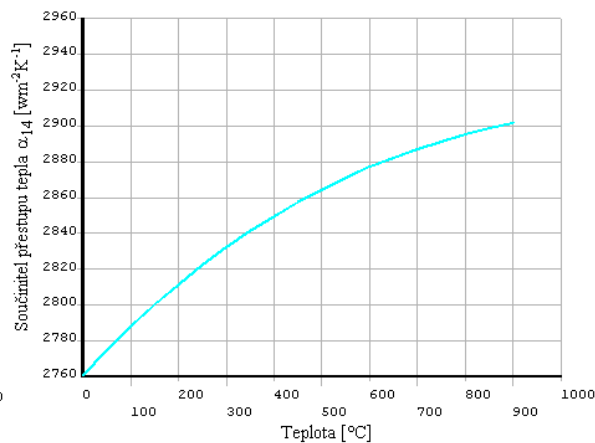
Obr.80: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_{11}$



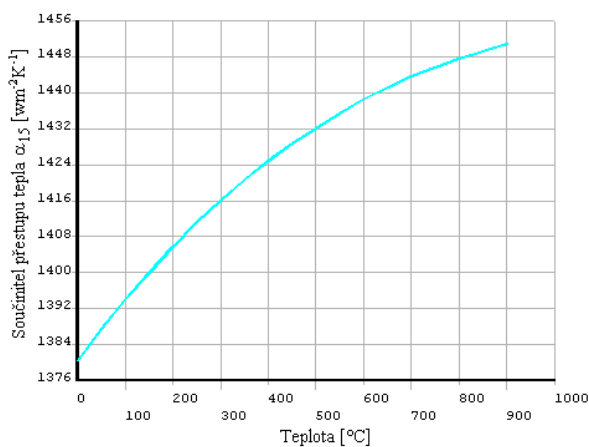
Obr.81: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_{12}$



Obr.82: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_{13}$

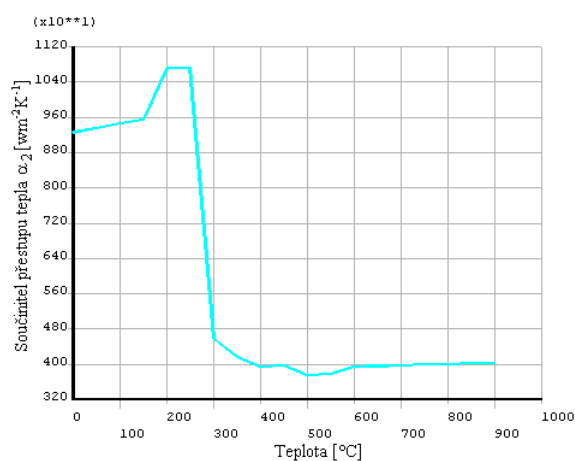


Obr.83: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_{14}$

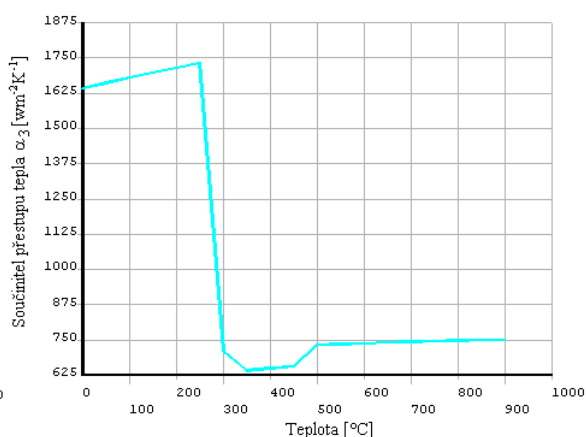


Obr.84: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_{15}$

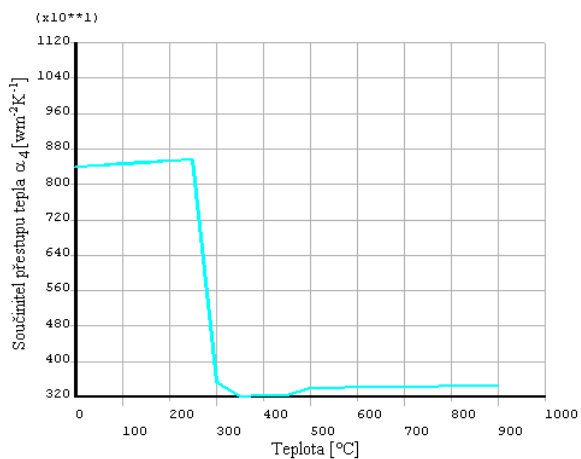
Okrajové podmínky v simulaci chlazení vzorku z uhlíkové oceli, kapitola 5.5.1.7



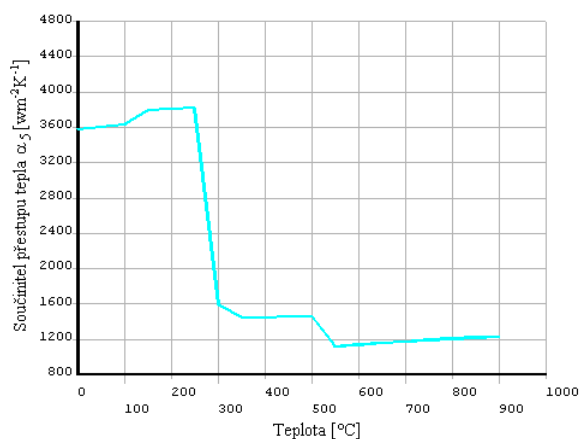
Obr.85: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_2$



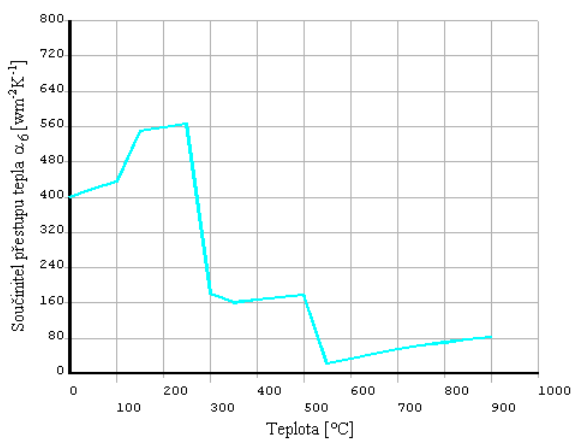
Obr.86: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_3$



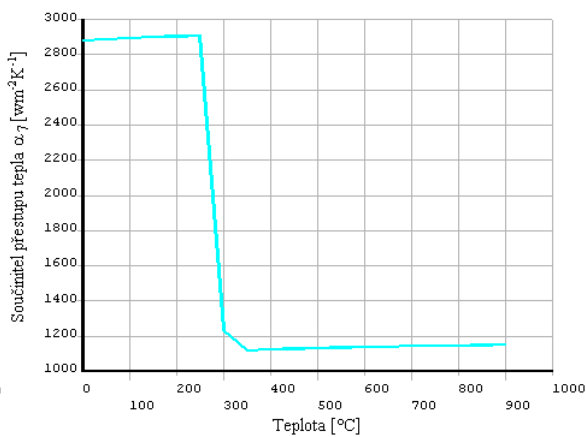
Obr.87: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_4$



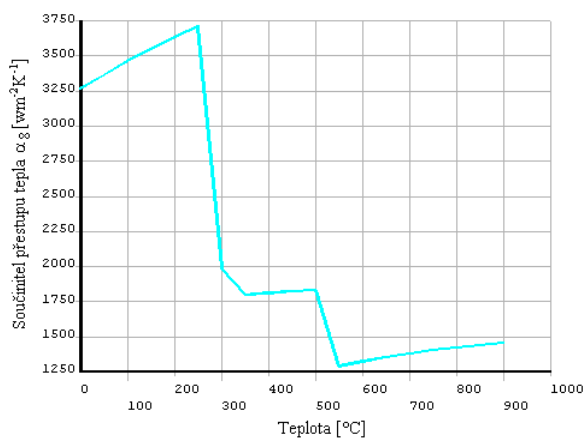
Obr.88: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_5$



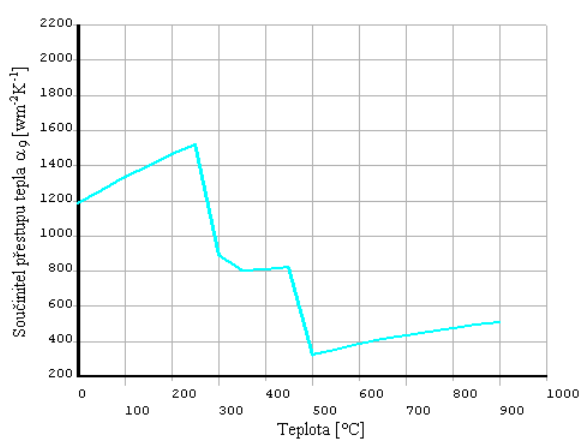
Obr.89: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_6$



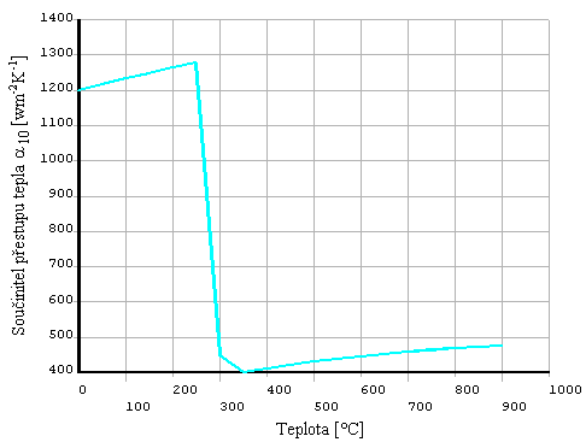
Obr.90: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_7$



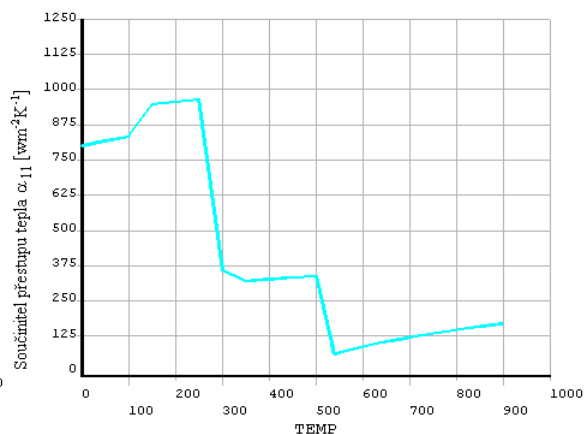
Obr.91: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_8$



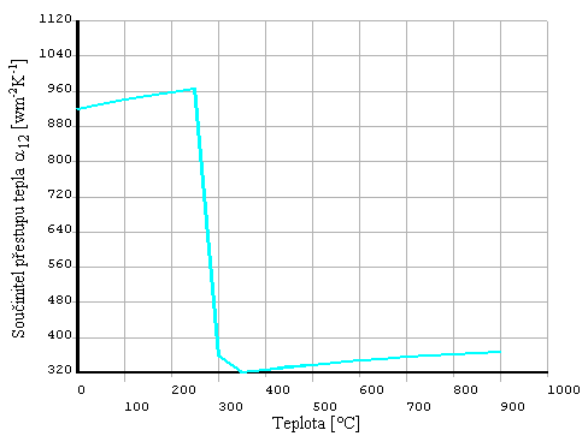
Obr.92: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_9$



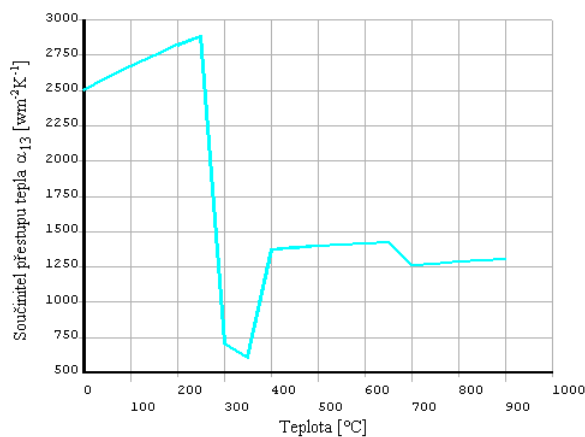
Obr.93: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_{10}$



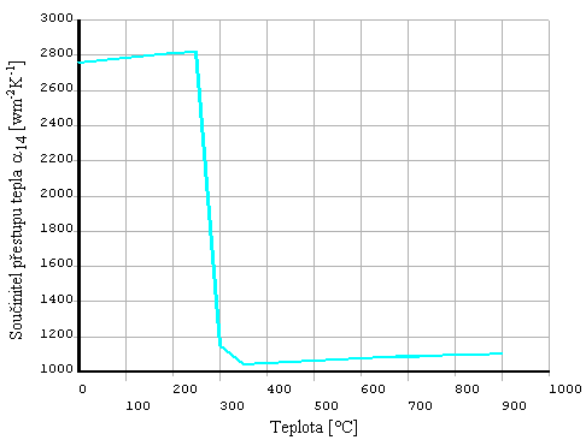
Obr.94: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_{11}$



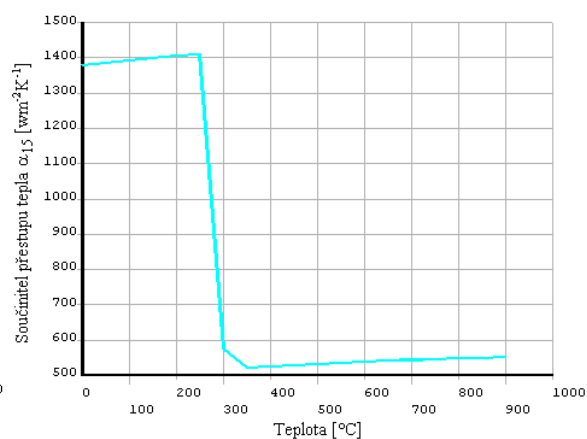
Obr.95: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_{12}$



Obr.96: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_{13}$



Obr.97: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_{14}$



Obr.98: Součinitel přestupu tepla  $\alpha_{15}$