

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Metodika predikce tvrdosti a hloubky prokalení při
hybridním povrchovém kalení**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš PECH**
Osobní číslo: **E14N0028P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Metodika predikce tvrdosti a hloubky prokalení při hybridním povrchovém kalení**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište technologii povrchového laserového a indukčního kalení.
2. Uveďte závislosti výsledných parametrů (hloubka prokalení, tvrdost) na vstupních podmínkách.
3. Modelujte posuvný laserový ohřev s indukčním dohřevem.
4. Vytvořte algoritmus pro predikci tvrdosti a hloubky prokalení.
5. Výsledky srovnajte s experimentem.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. W.M. Steen, Laser Material Processing, Springer, London, 1991.
2. R. A. Ganeev, Low-power laser hardening of steels, Journal of Materials Processing Technology, Volume 121, Issues 2-3, 28 February 2002, Pages 414-419.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Václav Kotlan, Ph.D.

Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce:

15. října 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

16. května 2016



Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Anotace

Předkládaná diplomová práce se zabývá predikcí tvrdosti a hloubky prokalení při povrchovém kalení za pomoci matematických modelů.

Důraz této práce je kladen na sestavení matematického modelu popisující zmíněnou technologii, jeho numerické řešení a ověření výsledků pomocí provedeného experimentu.

V úvodu práce jsou uvedeny základní informace popisující technologii indukčního a laserového kalení a popsány závislosti predikovaných parametrů na vstupních podmínkách. Diplomová práce také poskytuje úvod do nejčastěji používaných zkoušek měření tvrdosti. V následující části jsou formulovány základní matematické vztahy popisující rozložení elektromagnetického a teplotního pole a postup vytvoření matematického modelu pomocí aplikace COMSOL Multiphysics[®]. Těžištěm této práce je vytvoření jednotlivých modelů, poukázání na změny sledovaných parametrů v závislosti na rozdílných vstupních hodnotách a vytvoření algoritmu umožňujícího predikci tvrdosti materiálu ze získaných nasimulovaných dat. V poslední části práce jsou představeny výsledky sestaveného matematického modelu a jejich porovnání s výsledky provedeného experimentu ve společnosti MATEX, PM s.r.o.

Klíčová slova

Indukční ohřev, laserový ohřev, kalení, elektromagnetické pole, teplotní pole, matematický model, tvrdost, hloubka prokalení

Abstract

The topic of this diploma thesis is the mathematical model based predictions of material hardness and the hardening depth during hybrid surface hardening.

The emphasis of this thesis is the setup of a mathematical model describing the mentioned technology, its numerical solution and confirmation of its results using experiments.

The introduction of thesis contains basic description of the induction and laser hardening technology and the description of dependency of predicted parameters and entry conditions. The dissertation also provides an introduction to the most used methods of hardness tests. The following part formulates the basic mathematical relations describing the layouts of electromagnetic and thermal fields and the procedure of creation of a mathematical model using the COMSOL Multiphysics[®] software. The emphasis of this thesis is then the creation of individual models referring to changes of examined parameters based on various input conditions and the creation of an algorithm that would allow the prediction of material hardness from the gathered simulation data. The last part of the thesis introduces the results of a compiled mathematical model and their comparison with results from the experiments done in cooperation with the company MATEX, PM s.r.o.

Keywords

Induction heating, laser heating, hardening, electromagnetic field, thermal field, mathematical model, hardness, depth of hardening

Prohlášení

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

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 16.5.2016

Lukáš Pech

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Václavu Kotlanovi, Ph.D za všechny cenné rady, konstruktivní připomínky, ochotu a čas, který mi věnoval. Dále bych rád poděkoval Doc. Ing. Stanislavu Němečkovi, Ph.D, IWE společně s Ing. Františkem Wágnerem za umožnění provedení experimentu ve společnosti MATEX, PM s.r.o a Doc. Ing. Pavlu Karbanovi, Ph.D s Ing. Františkem Machem, Ph.D za jejich metodické vedení výuky, které mne přivedlo k řešení této diplomové práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině a nejbližším za poskytnutí zázemí při studiu a tvorbě diplomové práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	10
ÚVOD	12
1 TECHNOLOGIE POVRCHOVÉHO KALENÍ	13
1.1 INDUKČNÍ POVRCHOVÉ KALENÍ.....	13
1.1.1 <i>Princip indukčního ohřevu</i>	13
1.1.2 <i>Zdroje pro indukční ohřev</i>	16
1.1.3 <i>Induktory</i>	19
1.2 LASEROVÉ POVRCHOVÉ KALENÍ	21
1.2.1 <i>Základní vlastnosti laserového paprsku</i>	21
1.2.2 <i>Obecné části laseru</i>	23
1.2.3 <i>Vlastnosti laserového povrchového kalení</i>	26
1.2.4 <i>Princip laserového povrchového kalení</i>	27
1.2.5 <i>Kontrola povrchové teploty pomocí pyrometru</i>	29
1.2.6 <i>Vliv výchozí struktury a velikosti zrna</i>	29
1.2.7 <i>Řízení pohybu laserového paprsku při povrchovém kalení</i>	31
1.2.8 <i>Rozložení intenzity laserového záření</i>	33
1.2.9 <i>Absorpce laserového záření</i>	34
1.2.10 <i>Teplotní pole [8]</i>	36
1.2.11 <i>Zbytková napětí po laserovém povrchovém kalení</i>	38
2 ZKOUŠKY TVRDOSTI	39
2.1 ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE ROCKWELLA	40
2.2 ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE BRINELLA	41
2.3 ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE VICKERSE	42
2.4 ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE KNOOPA.....	42
3 MATEMATICKÝ MODEL ÚLOHY	43
3.1 ZPŮSOBY PŘENOSU TEPLA	43
3.1.1 <i>Tepelná výměna vedením (kondukcí)</i>	43
3.1.2 <i>Přenos tepla prouděním (konvekci)</i>	44
3.1.3 <i>Přenos tepla sáláním (radiací)</i>	45
3.2 MATEMATICKÝ MODEL PRO INDUKČNÍ OHŘEV	46
3.2.1 <i>Matematický model teplotního pole [34][35]</i>	46
3.2.2 <i>Matematický model elektromagnetického pole [34][35]</i>	48
3.3 MATEMATICKÝ MODEL TEPLITNÍHO POLE PRO LASEROVÝ OHŘEV [35].....	50
3.4 NUMERICKÉ METODY	51
3.4.1 <i>Metoda konečných prvků</i>	51
3.4.2 <i>Metoda hraničních prvků</i>	52
3.5 REALIZACE MODELU V COMSOL MULTIPHYSICS®	53
3.5.1 <i>Výběr prostorové dimenze modelu a řešených fyzikálních dějů</i>	53
3.5.2 <i>Návrh geometrie modelu</i>	53
3.5.3 <i>Určení fyzikálních parametrů pro přenos tepla v pevných látkách</i>	54
3.5.4 <i>Určení fyzikálních parametrů elektromagnetického pole</i>	55
3.5.5 <i>Určení a přiřazení materiálových vlastností</i>	56
3.5.6 <i>Vytvoření výpočetní sítě a konvergence řešení</i>	57
3.6 VÝSLEDKY NUMERICKÉHO MODELU PRO LASEROVÉ KALENÍ	59
3.7 VÝSLEDKY NUMERICKÉHO MODELU PRO INDUKČNÍ KALENÍ.....	61

3.8	VÝSLEDKY NUMERICKÉHO MODELU PRO LASEROVÉ KALENÍ S INDUKČNÍM PŘEDEHŘEVEM.....	63
3.9	VÝSLEDKY NUMERICKÉHO MODELU PRO LASEROVÉ KALENÍ S INDUKČNÍM DOHŘEVEM	65
4	NÁVRH ALGORITMU PRO PREDIKCI TVRDOSTI MATERIÁLU	67
5	SROVNÁNÍ MATEMATICKÉHO MODELU S EXPERIMENTEM	72
6	ZÁVĚR	78
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	80
	SEZNAM PŘÍLOH.....	84

Seznam použitých zkratk a symbolů

A	[Wb·m ⁻¹]	vektorový magnetický potenciál
A	[%]	absorptivita materiálu
B	[T]	magnetická indukce
C_0	[W·m ⁻² K ⁻⁴]	součinitel sálání
c	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita
E	[V·m ⁻¹]	intenzita elektrického pole
f	[Hz]	frekvence
H	[A·m ⁻¹]	intenzita magnetického pole
HB	[1]	tvrdost podle Brinella
HR	[1]	tvrdost podle Rockwella
HV	[1]	tvrdost podle Vickerse
h	[mm]	hloubka
I	[A]	elektrický proud
I_{vyp}	[A]	rozložení intenzity vířivých proudů
I_0	[A]	povrchová intenzita
J	[A·m ⁻²]	proudová hustota
j_p	[W·m ⁻²]	tepelný tok při přenosu tepla prouděním
j_s	[W·m ⁻²]	tepelný tok při přenosu tepla sáláním
j_v	[W·m ⁻²]	tepelný tok při přenosu tepla vedením
k_i	[-]	činitel vazby induktoru
L	[H]	indukčnost
M_F	[K]	teplota konce martenzitické přeměny
M_s	[K]	teplota počátku martenzitické přeměny
P	[W]	činný výkon
P_z	[W]	celkový výkon zařízení
q	[W/m ²]	hustota tepelného toku
R	[Ω]	elektrický odpor
r_r	[m]	poloměr ozářené oblasti
S	[m ²]	plocha
T	[K]	termodynamická teplota
T_k	[K]	teplota kalení

T_m	[K]	teplota tavení
T_p	[K]	teplota prostředí
T_s	[K]	ustálená teplota
T_v	[K]	teplota výrobku
T_z	[K]	teplota zařízení
t	[s]	čas
t_c	[s]	charakteristická doba přenosu tepla
t_k	[s]	doba ohřevu před kalením
U	[V]	elektrické napětí
v	[m·s ⁻¹]	rychlost
W_j	[W·m ⁻³]	měrné Jouleovy ztráty
z	[mm]	hloubka zakalení
z_k	[mm]	maximální hloubka zakalení
α	[-]	součinitel přenosu tepla
γ	[S·m ⁻¹]	měrná elektrická vodivost
ε	[-]	emisivita povrchu materiálu
ε	[F·m ⁻¹]	permitivita
ε_r	[-]	relativní permitivita
λ	[m]	vlnová délka
λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	tepelná vodivost
μ_0	[H·m-1]	permeabilita vakua
μ_r	[-]	relativní permeabilita
ρ	[kg·m ⁻³]	měrná hmotnost
φ	[V]	skalární elektrický potenciál
σ	[W·m ⁻² K ⁻⁴]	Stefan-Boltzmannova konstanta
ω	[rad·s ⁻¹]	úhlová frekvence
CO_2		oxid uhličitý
Fe_3C		karbid železa (cementit)
CM		COMSOL Multiphysics [®]
MKP		metoda konečných prvků
MHP		metoda hraničních prvků

Úvod

Tepelné zpracování materiálů je důležitou součástí strojírenského průmyslu, přičemž samotné laserové kalení, je zdánlivě téměř ideální způsob ohřevu povrchu materiálu – má vysokou energetickou účinnost, dobrou regulovatelnost procesu a je snadno realizovatelné. Technologie laserového kalení je ale také spojena s vysokými hodnotami teplotních gradientů, v jejichž důsledku dochází k mechanickému namáhání materiálu v důsledku zbytkových napětí a pnutí. Tento nedostatek částečně kompenzuje hybridní kalení.

Hybridní povrchové kalení, které je v této diplomové práci řešeno jako kombinace laserového paprsku s induktorem, je relativně nový způsob povrchového ohřevu ocelových materiálů, který ve světě realizuje pouze velmi málo strojírenských společností, a jeho princip spočívá ve využití indukčního přehřevu, nebo dohřevu především za účelem snížení teplotního gradientu.

V dnešní technické praxi má matematické modelování a simulace různých fyzikálních dějů velký význam a to jak z ekonomického hlediska, tak z hlediska možného vývoje nových technologií a jejich implementace do průmyslu. Proto cílem této práce je vytvořit matematický model pro laserové kalení s indukčním dohřevem a získaná data použít pro predikci hloubky prokalení a tvrdosti materiálu po kalení.

1 Technologie povrchového kalení

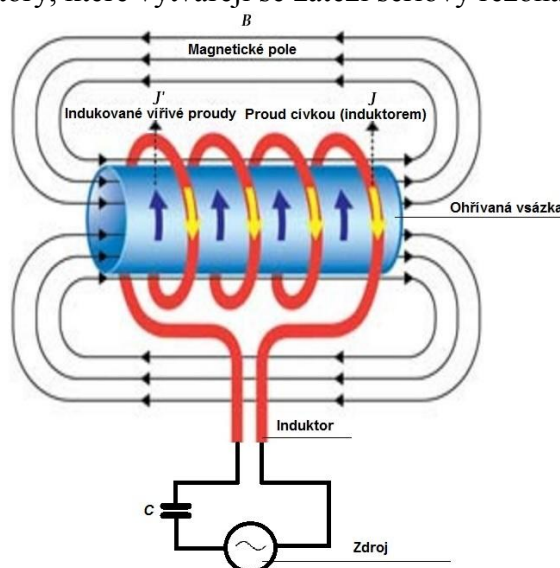
1.1 Indukční povrchové kalení

Kalení je postup tepelného zpracování, při kterém se kalený materiál ohřeje na tzv. austenizační teplotu a po určité době na této teplotě následuje ochlazení materiálu větší rychlostí, než je rychlost kritická. Základní strukturou pro kalené oceli je struktura martenzitická, nebo bainitická. Povrchové kalení má za cíl zvýšení tvrdosti pouze povrchové vrstvy, při zachování měkkého a houževnatého jádra kaleného materiálu. Rozdílných vlastností se dosahuje rychlým ohřevem povrchu materiálu a následujícím rychlým ochlazením. Jedním z nejužívanějších způsobů povrchového kalení je kalení indukční [3].

1.1.1 Princip indukčního ohřevu

Indukční ohřev je bezkontaktní elektrický ohřev využívající elektromagnetické indukce. Při indukčním ohřevu je ohříváný materiál umístěn v těsné blízkosti pracovní cívky tzv. induktoru.

Pracovní cívka (u náročných aplikací např. vodou chlazená) je napájena střídavým elektrickým proudem (10 až 3000A) s proudovou hustotou J o středním (3 až 50kHz) nebo vysokém kmitočtu (50 až 500kHz) ze středofrekvenčního nebo vysokofrekvenčního generátoru. Velká hodnota kmitočtu způsobuje, že v materiálu vsázky vzniká skin efekt, což je jev, který vyvolává vytlačování proudové hustoty směrem k povrchu vodiče. Úzkou spojitost s proudovou hustotou má hloubka vniku ω . Hloubka vniku ω je vzdálenost od povrchu materiálu, ve které klesne proudová hustota na hodnotu $\frac{1}{e}$. Induktivní charakter zátěže je kompenzován kondenzátory, které vytvářejí se zátěží sériový rezonanční obvod [1].

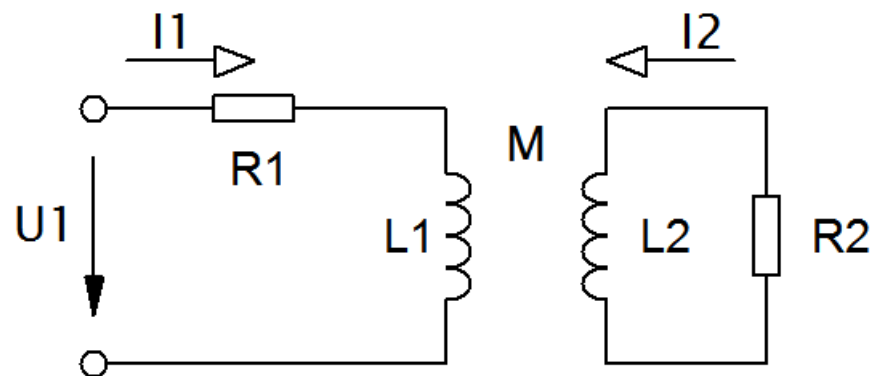


Obr. 1.1 Princip indukčního ohřevu (převzato z [2])

Lokální ohřev materiálu v bezprostřední blízkosti induktoru pak probíhá indukci, jež je přímou aplikací Lenzova a Jouleova zákona. Podle Lenzova indukčního zákona existuje v každém elektrickém vodiči umístěném do proměnného magnetického pole elektromotorická síla, a vznikají indukované proudy tzv. vířivé proudy, které mají proudovou hustotu \mathbf{J}' . Tyto proudy vytvářejí přímo v ohřívaném materiálu Jouleovo teplo a velmi rychle zahřívají vsázku na kalicí teplotu, aby se povrch následně zakalil prudkým ochlazením.

Teplo se tedy do vsázky dopravuje střídavým magnetickým polem o indukci \mathbf{B} a nikoli teplotním spádem jako u nepřímých ohřevů, a vzniká přímo ve sázce.

Vše ostatní v okolí může být chladné což je velká výhoda indukčního ohřevu. Další výhodou indukčního ohřevu je snadná regulace procesu nebo vysoká účinnost ohřevu (ztráty mezi zdrojem indukčního ohřevu a ohřívaným materiálem jsou minimální) [1].



Obr. 1.2 Náhradní schéma indukčního ohřevu (překresleno z [5])

Na obrázku 1.2 je uvedeno náhradní zjednodušené schéma pro indukční ohřev, které lze přirovnat k transformátoru, který má sekundární vinutí o jednom závitě spojené nakrátko. Jako M je označena vzájemná indukčnost vinutí, L_1 je pracovní indukčnost primárního vinutí, R_1 je ztrátový činný odpor. U_1 , I_1 a f_1 je napětí, proud a frekvence použitého zdroje. Na sekundární straně I_2 označuje elektrický proud, který protéká vsázkou, R_2 je činný odpor vsázky a L_2 je indukčnost vsázky.

Pro vlastní magnetické pole budící cívky platí, že jeho velikost je úměrná součinu intenzity elektrického proudu a počtu závitů použitého induktoru. Indukované magnetické pole účinkuje proti primárnímu poli induktoru, a tím mu brání v proniknutí do jádra zpracovávaného materiálu.

Rozložení intenzity vířivých proudů I_{vp} je dáno exponencionální funkcí podle vztahu (1.1), kde I_0 je povrchová intenzita, x je hloubka pod povrchem materiálu a h je efektivní hloubka průniku vířivých proudů

$$I_{vp} = I_0 * e^{\left(\frac{-x}{h}\right)}. \quad (1.1)$$

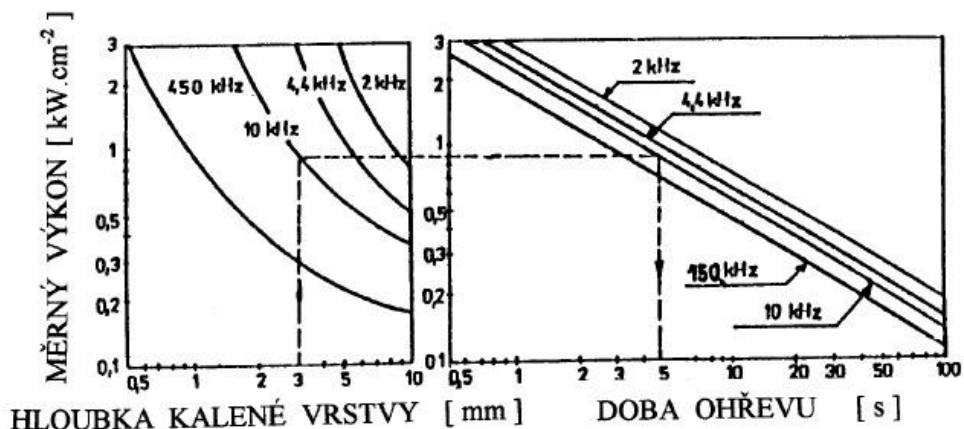
Výpočet efektivní hloubky průniku vířivých proudů je uveden ve vztazích (1.2) a (1.3), přičemž vzorec (1.2) se uvádí pouze jako přibližný výpočet pro konstrukční ocel [3][4]

$$h = \frac{25}{f}. \quad (1.2)$$

Přesný výpočet efektivní hloubky průniku vířivých proudů lze získat z definice (1.3), kde γ je měrná elektrická vodivost v ($S \cdot m^{-1}$), μ_r je relativní permeabilita, μ_0 je permeabilita vakua v ($H \cdot m^{-1}$) a $\omega = 2\pi f$ je úhlový kmitočet v ($rad \cdot s^{-1}$) [4]

$$h = \sqrt{\frac{2}{\omega * \mu_r * \mu_0 * \gamma}} \quad (rad \cdot s^{-1}, H^{-1}, S \cdot m^{-1}). \quad (1.3)$$

Hloubka podle vztahu (1.3) se nazývá hloubka vniku a je to taková hloubka, ve které klesne proudová hustota J na hodnotu 0,368 hustoty povrchu. Závisí na permeabilitě materiálu, konduktivitě a na frekvenci elektrického proudu. Ze vztahu (1.3) tedy plyne, že pro zmenšení tloušťky zakalené vrstvy je třeba zvýšit kmitočet nebo zkrátit dobu ohřevu, tedy zvýšit měrný výkon. Z obr. 1.3 lze vyčíst závislost mezi měrným výkonem induktoru, dobou ohřevu a hloubkou zakalené vrstvy [3].



Obr. 1.3 Diagram pro určení doby ohřevu pro zvolenou hloubku zakalení (převzato z [3])

1.1.2 Zdroje pro indukční ohřev

S rostoucí frekvencí střídavého proudu se zvyšuje i koncentrace vířivých proudů u povrchu materiálu – proto je pro indukční povrchové kalení vhodné použití elektrického proudu s velkou hodnotou frekvence. Z výše uvedeného tedy vyplývá, že pro efektivní indukční ohřev je nutná vhodná volba použitého zdroje s požadovanou hodnotou frekvence, která je dále závislá na následujících faktorech:

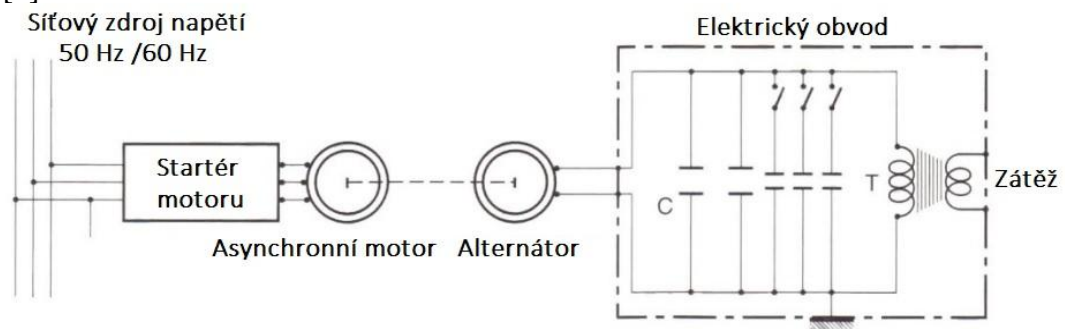
- Tvar výrobku společně s jeho podélnými rozměry
- Magnetická permeabilita a konduktivita materiálu výrobku
- Na velikosti požadované hloubky povrchového ohřevu

Jedním z nejdůležitějších prvků u vysokofrekvenčních zdrojů použitých pro indukční ohřev je tedy frekvenční měnič. Frekvenční měnič, je elektronické zařízení, které zajišťuje změnu kmitočtu napájecího napětí. Jeho aplikace je nutná, protože dodávaná frekvence je odlišná od používané frekvence průmyslové [8].

- **Rotační měnič**

Před vývojem tyristorových měničů byly používány rotační měniče, jejichž pracovní frekvence se nachází v rozmezí od 200 Hz do 1000 Hz. Rotační měniče se skládají z trojfázového asynchronního motoru napájeného ze sítě poháněného synchronním alternátorem, který zajišťuje dodávku elektrického proudu o potřebné frekvenci a zátěžného obvodu, který tvoří cívka a kompenzační kondenzátory.

Účinnost rotačního měniče je závislá na velikosti použitého napětí (efektivita klesá, pokud je zdroj používán pro nízké napětí) a kmitočtovém rozsahu. Pro frekvenční rozsah od 1 do 3 kHz je účinnost rotačního měniče přibližně 85% a v rozsahu od 3 do 10 kHz v rozmezí 75 až 80% [9].



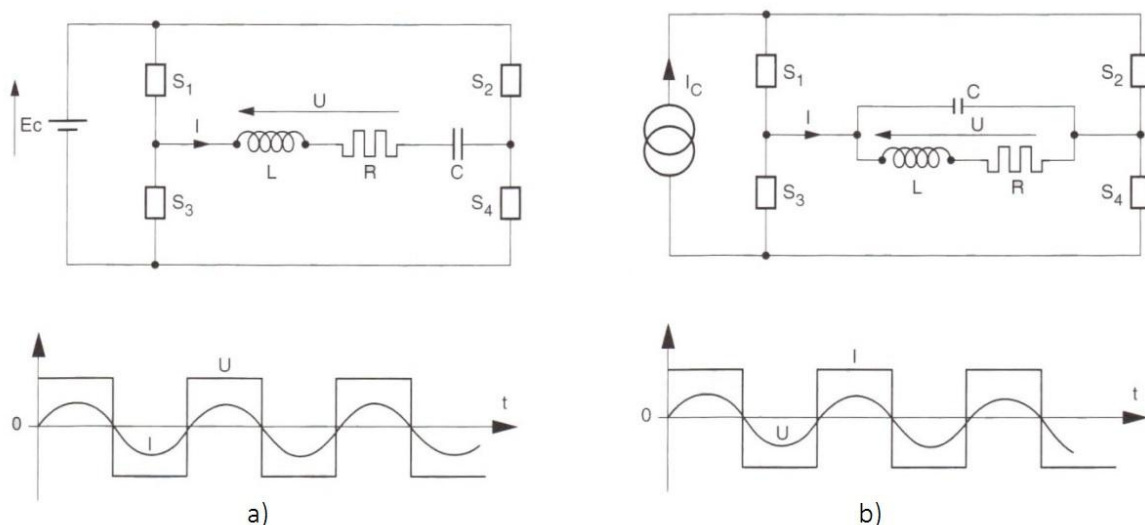
Obr. 1.4 Schéma rotačního měniče (převzato z [6])

- **Polovodičové měniče**

Polovodičové frekvenční měniče, používané jako zdroje pro indukční ohřev, pokrývají kmitočtové pásmo v rozsahu od 100 Hz do 400 kHz. Součástí každého frekvenčního měniče je filtr se schopností filtrování stejnosměrného napětí či proudu, usměrňovač, kompenzační kondenzátor, měnič napájení oscilačního obvodu a odpovídající okruh. Frekvenční měniče můžeme rozdělit do dvou základních skupin:

- Přímé měniče frekvence
- Nepřímé měniče frekvence (napěťový měnič, proudový měnič, rezonanční měnič)

Z důvodu indukčního charakteru aplikací indukčního ohřevu je vždy nízký účinník v síti. Pro jeho kompenzaci jsou použity kompenzační kondenzátory, které jsou zapojeny sériově nebo paralelně s cívkou. Proto jsou využívány především měniče, které jsou realizovány pomocí sériového (napěťový měnič) a paralelního (proudový měnič) rezonančního obvodu. Jako spínací prvky měničů frekvence jsou používány tyristory a tranzistory. Hlavní výhodou tyristorů, je jejich schopnost spínat velké výkony proto jsou používány pro ohřevy velkých těles, tavení, kování a různé tepelné úpravy. Mezní frekvence pro použití tyristoru jako spínacího prvku je 10 kHz. Pro zajištění vyšší provozní frekvence je nutné použít ovladatelné komponenty, které lze ovládat vypínáním a zapínáním, tedy tyristory typu Gate Turn-OFF nebo tranzistory. Pro středně vysoké a vysoké kmitočty jsou využívány následující druhy tranzistorů: tranzistor s izolovaným hradlem IGBT – až 50 kHz, bipolární tranzistory – až 100 kHz a unipolární tranzistory MOSFET – až 400 kHz [9].



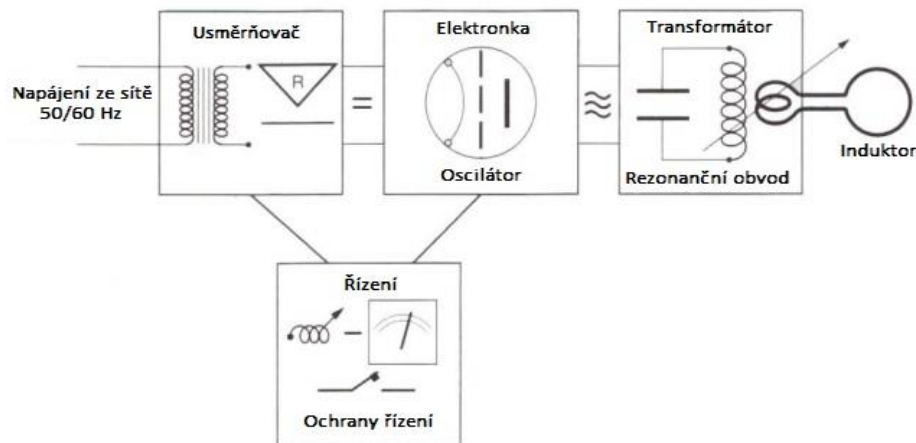
Obr. 1.5 Schéma a) frekvenčního měniče napětí a za b) proudu (převzato z [6])

- **Elektronkové zdroje**

Elektronky jsou využívány jako zdroj vysokého střídavého napětí a dokážou upravovat velikost napětí při 5 až 10 kV. Protože napětí, se kterým pracují induktory, je mnohem menší než u elektronek, je potřeba použít transformátor, který je zapojen mezi induktorem a kondenzátory anody (pokud se jedná o neperiodické zdroje, tak mezi kondenzátory a elektronku). V praxi nejčastěji využívané elektronkové zdroje jsou triodové a tetrodové.

Triodové zdroje mají poměrně omezenou dobu životnosti – přibližně 15 000 hodin, pracují na vysokých frekvencích – 30 MHz a více a jejich celková účinnost se blíží 65%.

Tetrodové zdroje mohou být dvojího typu – tetrodové oscilátory nebo tetrodové zesilovače. Obecně mají oproti zdrojům triodovým delší životnost až o 40%, díky možnosti lepší kontroly elektrického pole na mřížce. Účinnost tetrodového zdroje dosahuje až 73% [9].



Obr. 1.6 Blokové schéma elektronových zdrojů (převzato z [6])

- **Transformátor se syceným jádrem**

Transformátory se syceným jádrem jsou speciální transformátory využívající pro svoji funkci vyšších harmonických vyprodukovaných přesycením magnetického jádra. Ve vinutí transformátoru se naindukuje pevně daný kmitočet o hodnotě 3x, 5x nebo 9x větší, než je kmitočet sítě. Zátěž se nastavuje paralelní řadou kondenzátorů. Tento zdroj byl v minulosti využíván především ve slévárenských pecích, v dnešní době se pro vysoké pořizovací náklady a špatnou flexibilitu již nepoužívá [9].

1.1.3 Induktory

Induktory jsou koncovou částí indukčního systému, jedná se o pracovní cívku, která je napájena střídavým elektrickým proudem o středním nebo vysokém kmitočtu.

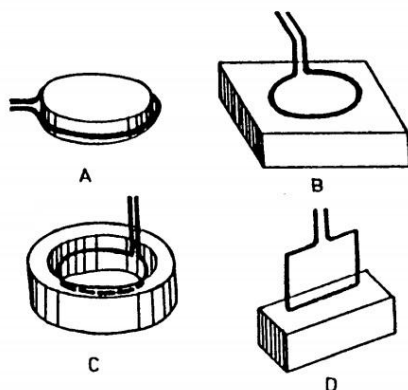
Na konstrukci induktorů jsou kladeny vysoké požadavky ať již z hlediska elektrického namáhání, nebo namáhání tepelného. Nejběžnějším materiálem pro výrobu induktorů je měď, pro její vynikající tepelnou a elektrickou vodivost. Důležitou součástí induktorů je jejich chlazení, jelikož jimi mohou protékat až desítky kA. Takto namáhané induktory se vyrábějí duté, ve zvláštních případech jsou použity chladicí sprchy. Nejčastějším chladícím médiem je voda, nebo olej. Jako induktory se také dají použít vysokofrekvenční lana, která jsou nechlazena, ale v tom důsledku také limitována použitým výkonem [7].

Účinnost indukčního systému je mimo jiné vlivy dána tzv. činitelem vazby induktoru k_i , který je dán vztahem (1.4), kde $\frac{I_2}{I_1}$ je činitel přenosu proudu, tedy poměr indukovaného a budícího proudu a $\frac{L_2}{L_{i0}}$ je poměr indukčnosti dráhy indukovaného proudu a indukčnosti prázdného induktoru [3]

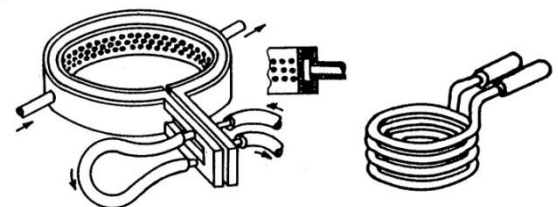
$$k_i = \frac{I_2}{I_1} * \sqrt{\frac{L_2}{L_{i0}}} \quad (1.4)$$

Podle tvaru induktoru a ohřívané plochy, je možné rozdělit induktory na čtyři skupiny, znázorněné na obr. 1.7 za A) jsou to jednozávitové induktory obepínající předmět z vnější strany s těsnou vazbou, za B) induktory přiložené k ploše se střední vazbou, za C) induktory vložené do dutiny s volnou až střední vazbou a za D) induktory, které přiléhají jen k části ohřívané plochy s volnou vazbou.

Z konstrukčního hlediska, mohou být induktory rozděleny na jednozávitové a mnohozávitové, jak znázorňuje obr. 1.8 [3].



Obr. 1.7 Typy vazby jednozávitových induktorů (převzato z [3])



Obr. 1.8 Jednozávitový a mnohozávitový induktor (převzato z [3])

Pro indukční povrchové kalení platí že:

- Hustota magnetického toku je nejvyšší uvnitř tělesa induktoru a to se také ohřívá za nejkratší časový úsek
- Induktor se musí nacházet vzhledem k výrobku v takové vzdálenosti, která spolehlivě zaručuje největší hustotu siločar elektromagnetického pole v místě výrobku, kde je požadováno dosažení nejvyšší teploty
- Tvar induktoru nesmí zeslabovat velikost magnetické indukce protisměrnými toky v blízkých protilehlých částech cívky
- Při nesouměrné poloze výrobku vzhledem k poloze induktoru dochází k různé hloubce ohřevu
- V místě připojení induktoru ke zdroji elektrického proudu je elektromagnetické pole slabší než ve vzdálenějších částech cívky, což negativně ovlivňuje hloubku ohřevu výrobku (platí především pro induktor s jedním závitem) [8].

Výhody indukčního kalení:

- Velmi dobrá účinnost
- Bezkontaktní – není potřeba kontakt mezi tepelně upravovaným materiálem a cívkou
- Možnost přesného určení ohřívaných zón
- Snadno regulovatelný proces s dobrým řízením teploty kovu
- Vysoká hustota výkonu a rychlost ohřevu
- Minimální negativní vliv na životní prostředí [1].

Nevýhody indukčního kalení:

- Vysoké investiční náklady
- Nutnost konstrukce induktoru pro každý výrobek odpovídajícího tvaru

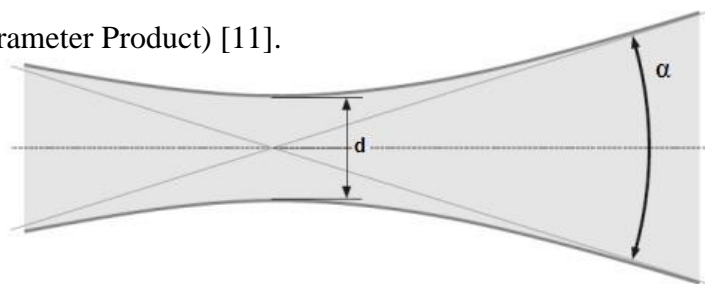
1.2 Laserové povrchové kalení

Druhým v současné době nejčastěji používaným způsobem povrchového kalení, je laserové povrchové kalení, díky kterému lze velmi rychle dosáhnout ohřevu materiálu v tenké povrchové vrstvě. Používá se železných materiálů, které lze kalit – tedy u ocelí a litin s podílem obsahu uhlíku větším než 0,2% [12].

1.2.1 Základní vlastnosti laserového paprsku

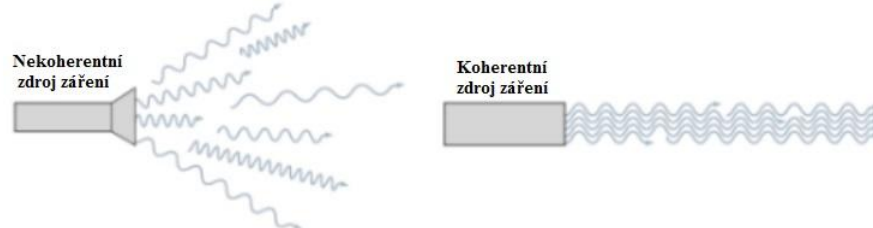
Slovo LASER je akronymem z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což lze volně přeložit jako zesilování světla stimulovanou emisí záření. Laser je obecně optický zdroj, který generuje elektromagnetického záření díky stimulované emisi fotonů. Záření, které laser emituje, má několik specifických vlastností oproti přirozeným zdrojům světla [10].

- Světelný paprsek je *kolimovaný* – paprsek je soustředěný v úzkém svazku jedním směrem a lze jej zaostřovat na velmi malé plochy. Schopnost zaostření laserového paprsku je ovlivněna použitou vlnovou délkou zdroje, kde s klesající hodnotou vlnové délky roste schopnost zaostření paprsku na plochu. Na obr. 1.10 označuje α úhel velikosti rozbíhavosti laserového paprsku a d je vzdálenost v nejužším místě zaostřeného paprsku. Mírou kvality laserového svazku je schopnost být fokusován (zaostřen), pro kruhově symetrické svazky tuto schopnost vyjadřuje veličina BPP (Beam Parameter Product) [11].



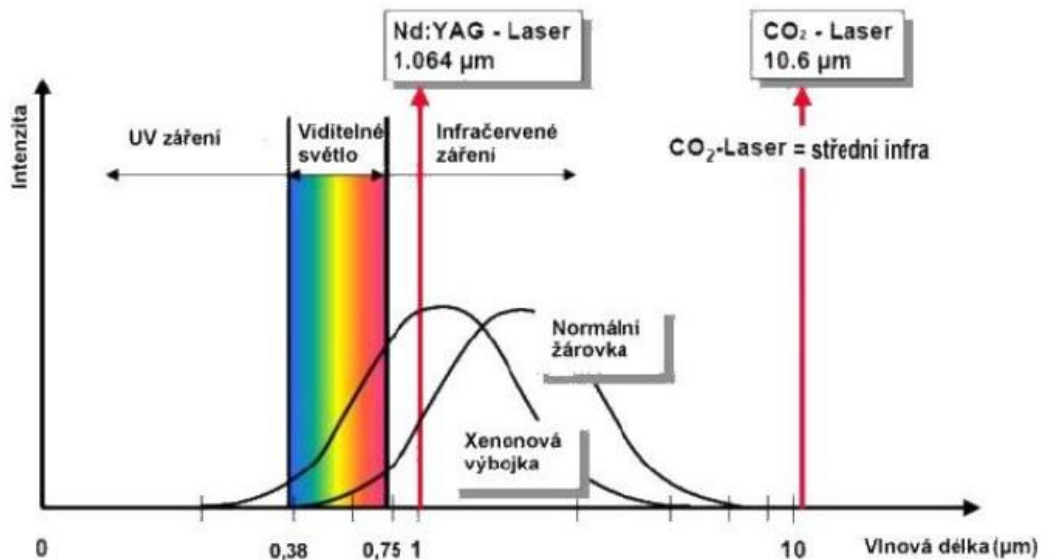
Obr. 1.10 Kolimovaný laserový paprsek (převzato z [12])

- Světelný paprsek je *koherentní* – díky emisi stejných fotonů má paprsek stejný směr i stejnou fázi jak časově, tak prostorově [11].



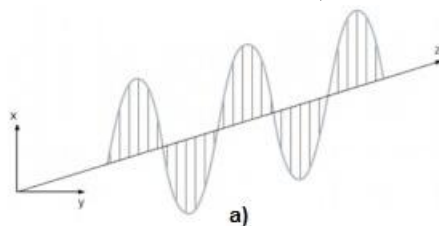
Obr. 1.11 Koherentní a nekoherentní zdroj elektromagnetického záření (převzato z [13])

- Emitované záření je *monochromatické* – emitované fotony mají stejný kmitočet, respektive stejnou vlnovou délku. Záření je proto jednobarevné. Na obr. 1.12 jsou uvedeny příklady jiných optických zdrojů záření a rozsah jejich barevného spektra podle vlnové délky. Například klasická žárovka, která na rozdíl od laserového zdroje generuje fotony rozbíhající se do všech směrů, různých vlnových délek a s náhodnou fází [11] [14].

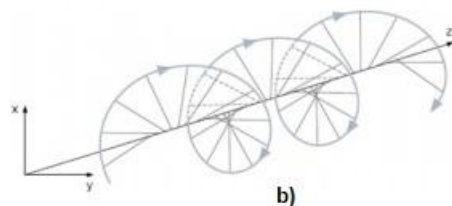


Obr. 1.12 Příklady zdrojů elektromagnetického záření (převzato z [14])

- Emitované záření je *polarizované* – světlo obecně je elektromagnetické vlnění, tedy jde o kmitání vektoru intenzity elektrického pole \mathbf{E} a k němu kolmého vektoru indukce magnetického pole \mathbf{B} . Oba vektory leží v rovině, která je kolmá ke směru šíření vlnění a spolu s Poytingovým vektorem tvoří pravotočivou soustavu. Záření emitované laserovým zdrojem je na rozdíl například od denního světla, které je nepolarizované a jeho vektory \mathbf{E} mají v každém bodě myšlené roviny jiný směr, polarizované. Na obr. 1.13 a) je znázorněna lineární polarizace kdy vektor \mathbf{E} je v dané rovině neměnný, pokud se směr vektoru \mathbf{E} v čase mění, bude opisovat elipsu což je znázorněno na obr. 1.13 b) [16].



Obr 1.13 a) polarizace světla – lineární (převzato z [13])

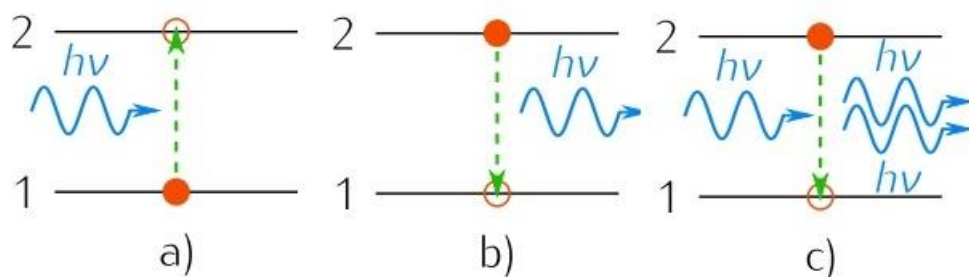


Obr 1.13 b) polarizace světla – eliptická (převzato z [13])

1.2.2 Obecné části laseru

Aktivní prostředí

Základní částí každého laseru je aktivní prostředí. Jednou z hlavních charakteristik laserového záření je jeho vlnová délka λ , která je určena právě použitým typem aktivního prostředí. Aktivní prostředí je médium, které obsahuje oddělené kvantové energetické hladiny elektronů, schopné zesilovat jím procházející záření díky stimulované emisi záření. Tento jev může nastat při vzájemném působení fotonu s atomem, nebo molekulou. Obecně existují tři základní typy vzájemného působení, které jsou znázorněny na obrázku 1.14, a to absorpce, spontánní emise a stimulovaná emise [11].



Obr. 1.14 a) absorpce, b) spontánní emise, c) stimulovaná emise (převzato z [11])

Na obr. 1.14 c) je zobrazen princip stimulované emise záření. V případě, že se atom nachází na druhé energetické hladině a současně na něj dopadá elektromagnetická vlna o kmitočtu ν , tedy s kmitočtem spontánně emitované vlny, pak existuje nenulová pravděpodobnost, že dopadající vlna donutí atom přejít do stavu jedna za současné emise záření s energií $h\nu$. Dopadající a emitované vlnění mají stejný směr, jsou ve fázi a skládají se. Tím dochází k zesílení původního vlnění tedy ke stimulované emisi záření. Nutným předpokladem nepřetržité stimulované emise je přítomnost inverzní populace, tedy přebytku částic na vyšších energetických hladinách vůči počtu částic na hladinách nižších. V opačném případě by došlo k opětovné absorpci uvolněné energie částicemi z nižších hladin.

Aktivním prostředí musí být průhledná látka a schopná odvádět teplo vzniklé ze záření. Základním rozdělením laserů je tedy rozdělení podle použitého aktivního prostředí [11][15].

- Aktivním prostředím je plyn nebo směs plynů (např. CO₂, HeNe) – plynové lasery
- Aktivním prostředím je polovodič s PN přechodem – diodové lasery
- Aktivním prostředím je pevná látka (monokrystal) – pevnolátkové lasery
- Aktivním prostředím je organické barvivo – barvičkové lasery

Budící (čerpací) systém

Budící systém dodává potřebnou energii aktivnímu prostředí a zajišťuje přebytek částic ve vyšším energetickém stavu, tedy inverzní populaci nutnou pro zajištění nepřetržité stimulované emise, která je poté vyzářena v podobě laserového svazku.

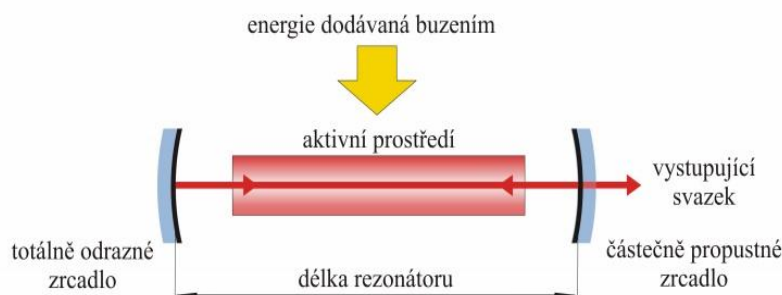
Způsob buzení je určen podle použitého typu aktivního prostředí. U pevnolátkových laserů k buzení dochází obvykle pomocí výbojek nebo LED diod. Pro lasery s plyným aktivním prostředím k buzení dochází ve většině aplikací elektrickým výbojem, střídavým nebo stejnosměrným proudem, ale existují i další způsoby buzení například chemickou reakcí.

Zdroje buzení mohou pracovat ve dvou režimech – kontinuálním nebo pulzním [11][15].

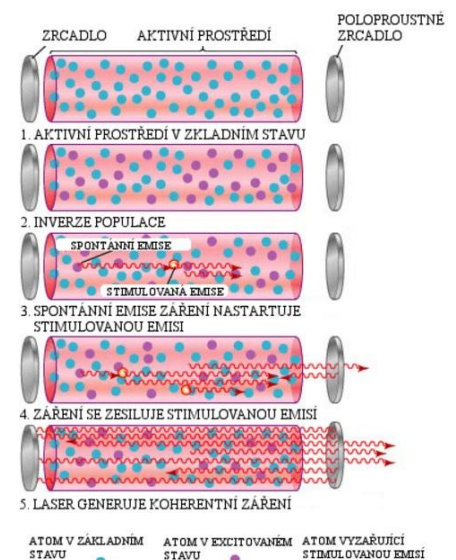
Optický rezonátor

Je optická soustava umožňující zformátovat a zesílit záření, které z něj následně vystupuje v podobě světelného svazku. Soustava je tvořena vždy nejméně dvěma rovnoběžně umístěnými zrcadly se stejnou osou, mezi nimiž je umístěno aktivní prostředí.

Jedno ze zrcadel je vždy polopropustné. Záření (fotony) vystupující z aktivního prostředí se odráží od zrcadla zpět do aktivního prostředí, kde funguje jako podnět k další stimulované emisi. Opakovanými odrazy se laserové záření zesiluje. Po dosažení požadované intenzity opouští svazek rezonátor jedním ze zrcadel, které je polopropustné. Vlivem absorpce záření v zrcadlech vznikají ztráty, které u výkonných laserových zdrojů zahřívají zrcadla a je třeba je chladit. Tvarem a velikostí zrcadel lze ovlivnit rozdělení intenzity v paprsku, což charakterizuje tzv. mód laserového paprsku [11][12][15].



Obr. 1.15 Schéma optického rezonátoru (převzato z [11])



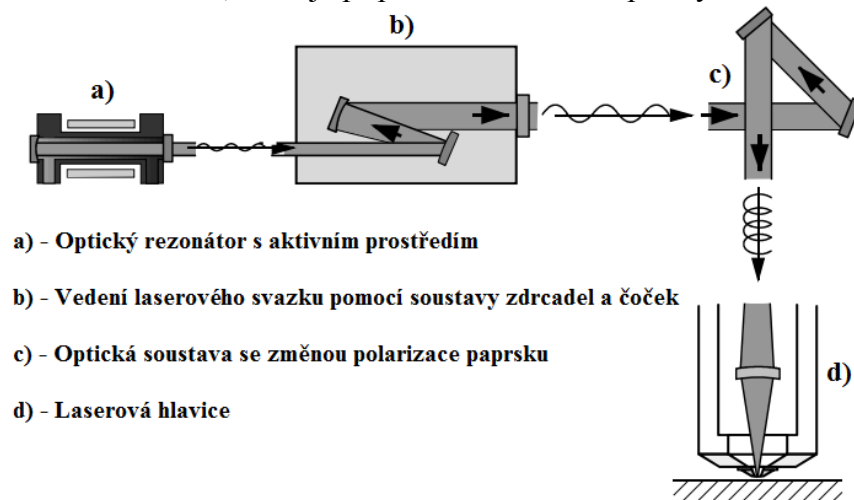
Obr. 1.16 Interakce fotonů v optickém rezonátoru (převzato z [15])

Vedení laserového světelného svazku

Z aktivního prostředí je laserový paprsek nutné přenést až do pracovní výstupní hlavice laseru, která je zobrazena na obr. 1.17 d). U průmyslových laserů je světelný svazek, vystupující z optického rezonátoru, dále upravován systémem čoček a clon, který upravuje průměr výstupního svazku a zvyšuje jeho kvalitu. Tento systém se nazývá expandér a jeho hlavní funkcí je pokud možno co největší snížení rozbíhavosti svazku. Při této úpravě laserového svazku však dochází ke značným energetickým ztrátám, což má za následek snížení celkové výsledné účinnosti laserového systému. Kvalita svazku je však v řadě průmyslových aplikací upřednostňována před jeho výkonem [11][12].

Jednou z možností pro přenos paprsku z aktivního prostředí je pomocí soustavy zrcadel a čoček do laserové hlavice. Materiál, ze kterého jsou optické komponenty této soustavy vyrobeny, závisí na vlnové délce generovaného záření a nesmí toto záření pohlcovat. Nejčastěji se používá dielektrické sklo či leštěné kovy. Tato varianta přenosu je často používána pro 2D aplikace jako je například řezání plechů.

Jinou variantou přenosu laserového paprsku je přenos prostřednictvím optického vlákna do místa určení. Nejčastěji se tento způsob využívá pro přenos paprsku u 3D aplikací, kde se pro přesný 3D pohyb využívá robotů a manipulátorů. Paprsek je pak přiveden do libovolné polohy výstupní laserové hlavice, která je připevněna na rameni průmyslového robota [11].



Obr 1.17 Schéma vedení laserového svazku pomocí soustavy zrcadel a čoček (převzato z [12])

Každý výkonový laserový systém je také vybaven chladicím zařízením většinou založeném na proudění kapaliny, nejčastěji demineralizované vody. Poslední významnou součástí laserového systému je řídicí počítač, který obsahuje software pro nastavení všech volitelných parametrů laseru a jeho ovládání [11][12].

1.2.3 Vlastnosti laserového povrchového kalení

Laserové kalení je moderní způsob tepelného zpracování, jehož cílem je zvýšení tvrdosti povrchu zpracovávaného materiálu při zachování jeho původních vlastností. Jedná se o opakující se proces rychlého ohřevu a následného prudkého ochlazování kritickou rychlostí nutnou ke vzniku zakalené struktury. Teploty používané při povrchovém kalení jsou podstatně vyšší než při běžném tepelném zpracování. Povrch kaleného materiálu není potřeba externě chladit přiváděnou kapalinou (konvekci), protože jádro uvnitř zůstane studené a odvod tepla je dostatečný.

Limitujícím faktorem laserového povrchového kalení je tloušťka stěny kalené součásti, která by měla být nejméně desetkrát silnější než kalená hloubka z důvodu odvodu dostatečného odvodu tepla materiálem. Pro drobné díly platí, že je většinou možné použít externí chlazení např. proudem vzduchu nebo ochlazením do nádrže s chladícím médiem.

Druhým limitujícím parametrem je maximální hloubka prokalení přibližně 2 mm v závislosti na vodivosti materiálu. Tuto hranici nelze obejít ani výkonnějším laserem, ani pomalejším pohybem paprsku, ale lze použít hybridní kalení (kombinace laserového paprsku a induktoru) [18].

Výhody laserového povrchového kalení:

- Velmi malá tepelně ovlivněná oblast
- Velmi malé deformace materiálu po tepelném zpracování
- Zakaleného povrchu je dosaženo bez použití kapalného chladícího média
- Zmenšení investičních nákladů v podobě finálního opracování materiálu
- Tepelné zpracování složitých součástí a možnost lokálního tepelného zpracování
- Vysoká tvrdost materiálu při zachování jeho pružnosti
- Velikost dodané energie laserovému paprsku lze ovlivnit typem použitého laseru a rychlostí pohybu laserového svazku po povrchu zpracovávaného materiálu
- Opětovné kalení materiálu
- Automatizace výroby

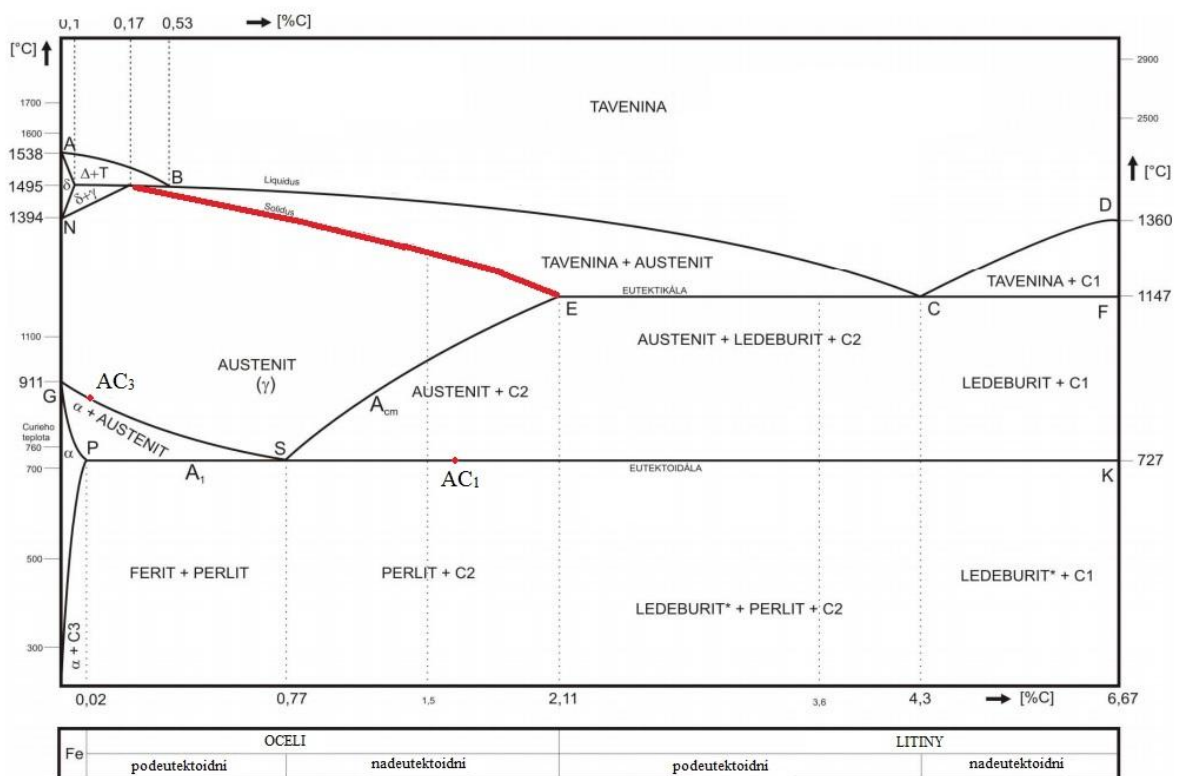
Problematické oblasti laserového povrchového kalení:

- Vysoké vstupní investiční náklady
- Rozložení dopadajících fotonů v příčném řezu paprskem nemusí být homogenní
- Odlišné vzájemné působení laserového paprsku s jednotlivými druhy materiálů a jejich zpracování (např. vysoce odrazivé materiály) [17].

1.2.4 Princip laserového povrchového kalení

Nejdříve laserový paprsek bezdotykově ohřeje povrch materiálu na teplotu, která je nižší než teplota solidu, která je na obr. 1.18 vyznačena červenou křivkou. Řádově se jedná o teplotu blízkou tavicí teplotě materiálu v rozmezí 900 – 1400 °C při takové teplotě dochází k přeměně struktury na austetickou. Hodnota teploty ohřevu povrchové vrstvy by měla ležet nad tzv. překryštalizační teplotou. Proto se volí v závislosti na složení oceli, významný je především obsah uhlíku.

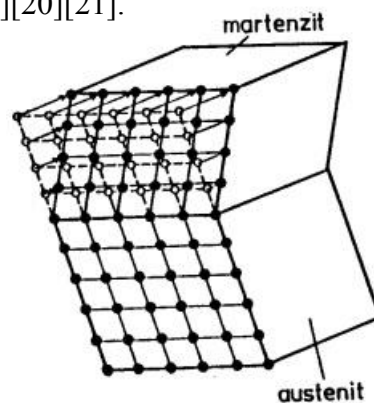
V případě ocelí podeutektoidních (mají obsah uhlíku do cca 0,8%) se ohřev provádí na teplotu 30 – 50 °C nad hodnotu AC_3 . Pokud se jedná o nadeutektoiní oceli (mají obsah uhlíku v rozmezí 0,8% - 2,1) je ohřev proveden na teplotu o 30 - 50° vyšší než hodnota AC_1 . Obě hodnoty jsou barevně vyznačeny na obr. 1.18. Požadované teploty povrchu materiálu je dosaženo za velmi krátký časový úsek, řádově se jedná o desetiny vteřiny, kdy dochází k posunu paprsku ve směru posuvu a následné ohřátí další části povrchu kaleného materiálu [3][19].



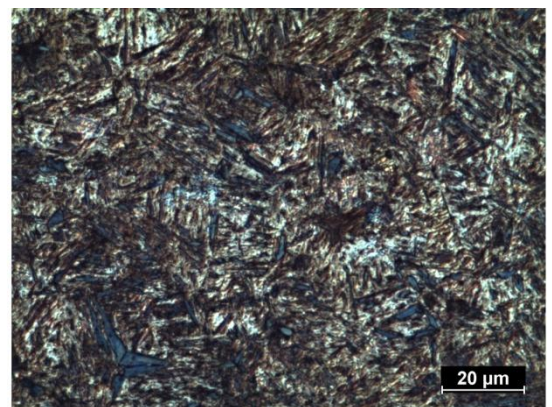
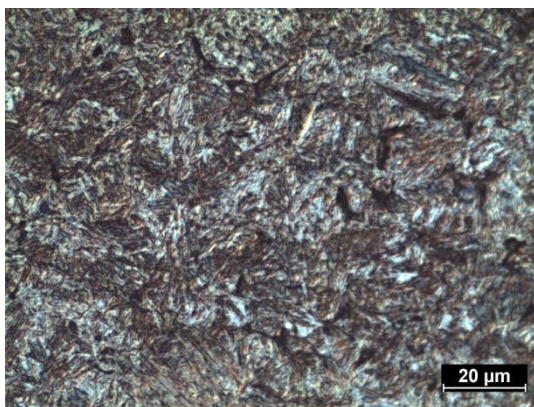
Obr. 1.18 Rovnovážný binární diagram metastabilní soustavy Fe-Fe₃C (převzato z [20])

Vzniklé teplo je pomocí tepelné vodivosti materiálu odváděno do okolního materiálu a dochází k tzv. samozakalení, tedy k prudkému ochlazení s využitím tepelné vodivosti. Není proto potřeba ochlazovat povrch materiálu např. kapalinou (vodou, olejem) jako u konvenčních metod kalení. V důsledku velmi rychlého ochlazení povrchové vrstvy nedojde k vrácení kovové mřížky zpět do výchozího stavu a v materiálu vzniknou velmi jemnozrné struktury.

Tato struktura se označuje pojmem martenzitická a je charakteristická velkou tvrdostí bez nežádoucího křehnutí struktury materiálu, nebo tvorby trhlin v důsledku pnutí. Současně je okolí jen velmi málo teplotně ovlivněné a nedochází tak k významné deformaci okolního materiálu. Samotný vznik martenzitické struktury začíná ve chvíli ochlazování materiálu v určitém rozmezí teplot, obecně označovaných jako M_S (Martensite Start) a M_F (Martensite Finish). Teploty M_S a M_F nejsou závislé na rychlosti ochlazování austetické struktury, ale na jejím chemickém složení, která je pro každý materiál rozdílná. Proto i teploty M_S a M_F jsou pro každý materiál odlišné [3][20][21].



Obr. 1.19 Martenzitická přeměna (převzato z [21])



Obr. 1.20 Martenzitická struktura po laserovém povrchovém kalení rychlostí 4 a 2 mm/s

1.2.5 Kontrola povrchové teploty pomocí pyrometru

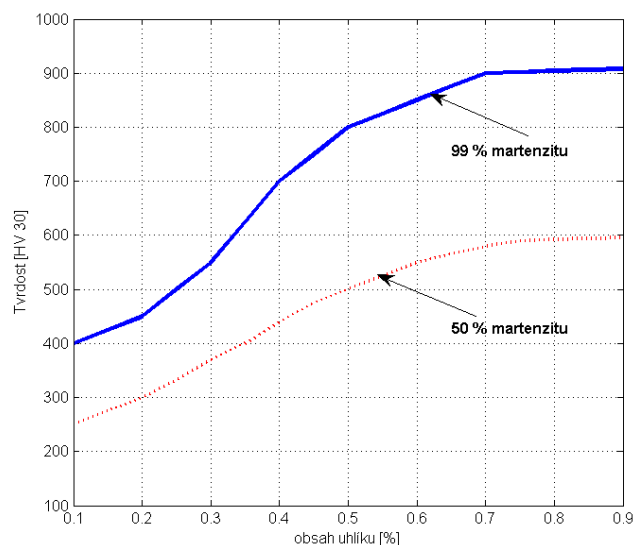
Bezdotyková kontrola hodnoty teploty povrchového ohřevu je zajištěna pomocí pyrometru, který je většinou připojen přímo k pracovní hlavici laseru. Pyrometr po celou dobu procesu měří průběžné teploty povrchu ohřívaného materiálu a na jejich základě se následně uzpůsobuje potřebná hodnota energie laseru ke změně struktury, tak aby nedošlo k natavování povrchu nebo naopak, aby hodnota energie nebyla příliš malá a proces zakalení by byl nekvalitní. Díky online regulaci teploty pyrometrem, lze tedy přímo řídit hloubku prokalení tepelně opracovávané součásti. Princip pyrometru je založen na měření intenzity vyzařování infračerveného záření, které vyzařují všechny materiály [18].



Obr. 1.21 IR pyrometr (převzato z [23])

1.2.6 Vliv výchozí struktury a velikosti zrna

Rychlý ohřev laserovým paprskem má své příznivé, ale i nepříznivé důsledky. Vyšší rychlosti ohřevu mají za následek posunutí transformačních teplot k vyšším hodnotám. Proto pro kalení laserem neplatí běžné diagramy tepelného zpracování a kalící teploty jsou průmyslovým tajemstvím každého výrobce.



Obr. 1.22 Závislost tvrdosti oceli s 50% a 99% martenzitu na obsahu uhlíku (překresleno z [22])

Důležitým parametrem u ocelí je jejich obsah uhlíku. Jak je vidět na obr.1.22 mezi obsahem uhlíku a tvrdostí materiálu je přibližně lineární závislost až do hodnoty obsahu 0,4% C. Od hodnoty 0,4% již není nárůst tvrdosti tak intenzivní, ale stále roste až do hodnot kolem 0,8% kde je nárůst tvrdosti již prakticky konstantní.

Schopnost oceli dosáhnout kalením zvýšení její tvrdosti se nazývá prokalitelnost. Platí, že čím větší je zrno, tím lepší je vytvrditelnost. Například zvětšením zrna z 0,02 na 0,12 mm se zlepši prokalitelnost přibližně o 50%. Při rychlém ohřevu ale není struktura dostatečně homogenizována, rozpuštěný uhlík se nedostane do středu původních feritických zrn a důsledkem jsou rozkolísané hodnoty tvrdosti. To může působit problémy třeba u masivních odlitků forem a strojních dílů.

Nezanedbatelným parametrem pro povrchové laserové kalení je i výchozí struktura materiálu, konkrétně karbidy a jejich velikost. Karbidy jsou sloučeniny uhlíku s elektropozitivnějšími prvky, například karbid železa Fe_3C – cementit. Čím větší je karbid, tím potřebuje delší dobu pro rozpouštění. V případě, že by došlo k tomu, že se karbid nerozpustí, vznikne v matici nedostatek uhlíku a prakticky dochází ke kalení nízkouhlíkové matrice. Při kalení tedy musí být jasně definováno, o jaký druh součásti se jedná a jaké prodělala předchozí tepelné zpracování. V případě, že se bude jednat o součást litou, bude pravděpodobně hrubozrnná, nebo tvářenou, která bude nejspíše jemnozrnnější. Pomalu transformující rovnovážné struktury mají karbidy větší, jejich rozpouštění bude trvat déle, naopak zušlechtěné materiály martenzitické nebo bainitické mají karbidy velmi jemné a snadněji rozpustitelné. Výchozí stav struktury ovlivňuje i hloubku prokalení (při jinak shodných parametrech kalení) a to v řádech několika desetin milimetru [3][18][20].

1.2.7 Řízení pohybu laserového paprsku při povrchovém kalení

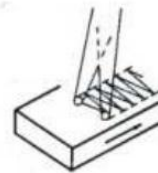
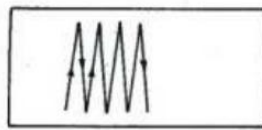
Při procesu povrchového kalení, je třeba, aby se laserový paprsek pohyboval s určitou minimální rychlostí vůči povrchu materiálu. Je nutné zajistit tuto podmínku z toho důvodu, aby nedocházelo k povrchovému natavování materiálových vrstev. V technické praxi jsou v současné době využívány dvě možné technologie zajištění pohybu laserového paprsku a to:

- Pohyb laserového paprsku příčně lineární



Obr. 1.23 Pohyb laserového paprsku při povrchovém kalení příčně lineární (převzato z [24])

- Pohyb laserového paprsku příčně kývavý



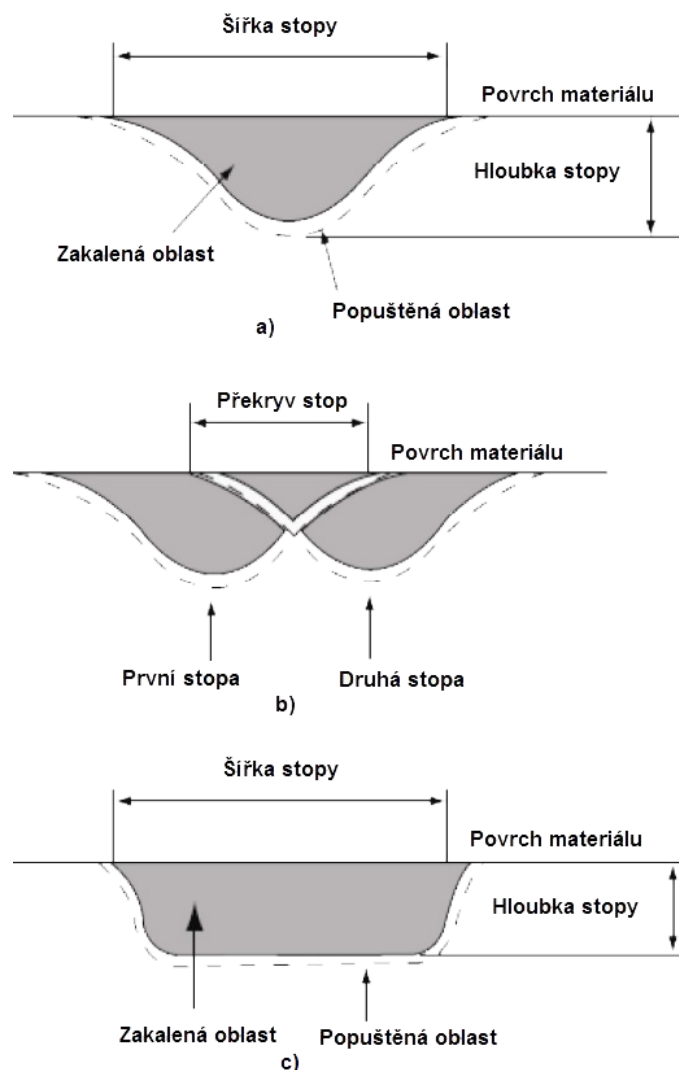
Obr. 1.24 Pohyb laserového paprsku při povrchovém kalení příčně kývavý (převzato z [24])

Technologie příčně lineárního pohybu paprsku se využívá ve spojení s rozostřeným laserovým paprskem. Aby byla vytvořena komplexní povrchově zakalená plocha, je nutné, aby se stopy laserového svazku vzájemně překrývaly. Z principu této technologie tedy vyplývá i její největší nevýhoda, což je rozdílná hloubka prokalení a vytvoření strukturně měkčí tepelně ovlivněné oblasti v těch místech, kde se stopy laserového svazku vzájemně překrývaly.

Metoda příčně kývavého pohybu paprsku je oproti metodě příčně lineární náročnější jednak na technické vybavení pracoviště, jednak je nutné zajistit větší množství nastavitelných parametrů při procesu kalení (např. oscilační frekvence). V nejjednodušším možném případě, se laserový paprsek pohybuje vůči geometrické ose povrchu tepelně zpracovávaného materiálu příčně, tak jak je zobrazeno na obr. 1.24. Dalším rozdílem od metody lineárního pohybu je využití zaostřeného laserového paprsku, který ale musí mít určitou minimální hodnotu měrné energie [17][24].

Tato minimální hodnota měrné energie je nutná pro vznik teplotního gradientu, který je nezbytný pro samozakalení kaleného materiálu. K jednotné hloubce prokalení dochází, pokud je kývání laserového svazku tak rychlé, že se jeví kývavý pohyb jako pevná čára energie. Je-li rychlost kývání příliš pomalá, dochází k natavování povrchových materiálových vrstev což je nežádoucí jev.

Na obr. 1.25 a) je znázorněn příčný řez kaleným materiálem a jeho profil, za b) je profil zakaleného povrchu při překrytí stop příčně lineárním pohybem. Obr. 1.25 c) znázorňuje ideální profil zakaleného povrchu pomocí příčně kývavého pohybu. Oproti Obr. 1.25 a) a b) je zde patrná jednotná hloubka prokalení a menší velikost tepelně ovlivněné oblasti [17][24].

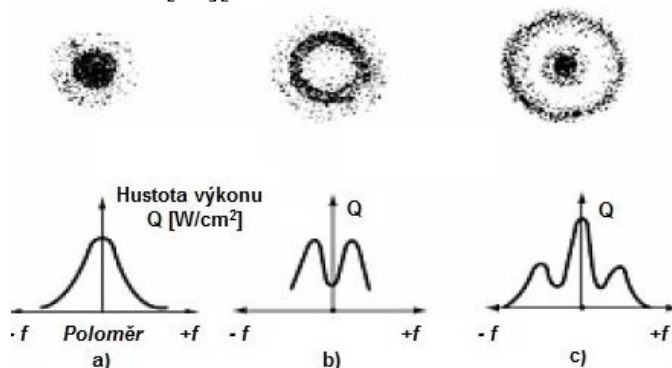


Obr. 1.25 Profily zakalených stop pomocí a) b) příčně lineárního a c) příčně kývavého pohybu laserového svazku (převzato z [17])

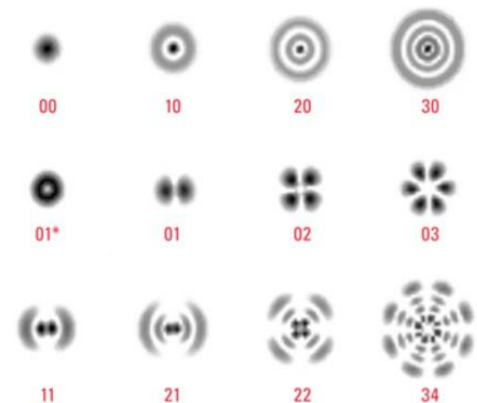
1.2.8 Rozložení intenzity laserového záření

Mezi parametry, které ovlivňují hloubku prokalení při laserovém povrchovém kalení patří rozložení hustoty proudících fotonů v laserovém paprsku, neboli intenzita laserového záření. Laserový paprsek má charakteristické rozložení intenzity záření v příčném a podélném směru. Toto rozložení je označováno akronymem TEM_{mn} , z anglického Transverse Electromagnetic Mode. Kde m je počet bodů o nulovém osvětlení podél osy X a n je počet bodů o nulovém osvětlení podél osy Y [17][25].

Základní mód je označován TEM_{00} a je zobrazen na obr. 1.26 a). Tvar křivky jeho rozložení intenzity odpovídá Gaussovo rozložení hustoty. Mód TEM_{00} má proto nejvyšší intenzitu záření v ose laserového paprsku. S rostoucí vzdáleností od osy paprsku se intenzita záření snižuje, tento mód je určený k řezání materiálu. Druhým módem zobrazeným na obr. 1.26 b) je TEM_{01} , který má část křivky intenzity stejnou jako je Gaussovo rozložení hustoty, ale maximální intenzita paprsku je v určité vzdálenosti od osy paprsku a v ose paprsku je nulová. Mód TEM_{01} je vhodný pro tepelné zpracování materiálu nebo vrtání. Posledním uvedeným módem je mód TEM_{10} – obr. 1.26 c), který je v technické praxi využíván především pro svařování. Na obr. 1.27 jsou uvedeny příklady dalších možných uspořádání módů TEM [17][25].



Obr. 1.26 rozložení intenzity záření pro
a) mód TEM_{00} b) mód TEM_{01} c) mód TEM_{10} (převzato z [17])



Obr. 1.27 Příklady dalších uspořádání
módů TEM (převzato z [25])

Tvar a rozložení intenzity záření je dán geometrickou konstrukcí optického rezonátoru (např. zrcadly) a dalšími optickými komponenty. Dokonalá symetrie módu je základním faktorem pro většinu průmyslových aplikací. Tvar módu se zjišťuje dvěma způsoby. Jednou možností je pomocí speciálního plexiskla ve tvaru kostky. Na plexisklo se spustí rozostřený laserový paprsek a charakteristické rozložení intenzity záření (mód) se projeví uvnitř této kostky. Druhou možností je přenesení charakteristického tvaru intenzity záření do počítače, pomocí speciálního ústrojí [12][14].

1.2.9 Absorpce laserového záření

Aby byl laserový paprsek při povrchovém kalení materiálů co nejefektivněji využit, je důležitá absorpce záření daným materiálem a následná přeměna na teplo. Pomocí absorpce pak dochází k ohřevu materiálu, natavení nebo až sublimaci materiálu v závislosti na hustotě výkonu a právě na absorpci materiálu. Absorpce laserového záření, ovlivňuje především pracovní rychlost a šířku tepelně ovlivněné oblasti. Při dopadu laserového paprsku na povrch materiálu dochází nejen k jeho absorpci, ale také k odrazu, či v případě transparentních materiálů až k průchodu paprsku. Energie dopadajícího paprsku se tedy dělí na absorbovanou, odraženou a procházející. Procházející energie je pro neprůhledné materiály nulová [27].

Vznik tepla na povrchu materiálu je možné popsat, jako reakci elektromagnetického vlnění s atomy, která na povrchu daného tělesa způsobuje vznik elektrického proudu. Elektrická vodivost tělesa je však omezená a Joulovo teplo způsobí vzrůstání teploty na povrchu. Wiedemannův - Franzův zákon říká, že poměr elektrické a tepelné vodivosti je konstantní, z čehož vyplývá, že kovy s dobrou vodivostí mají koeficient absorpce laserového záření nízký [26].

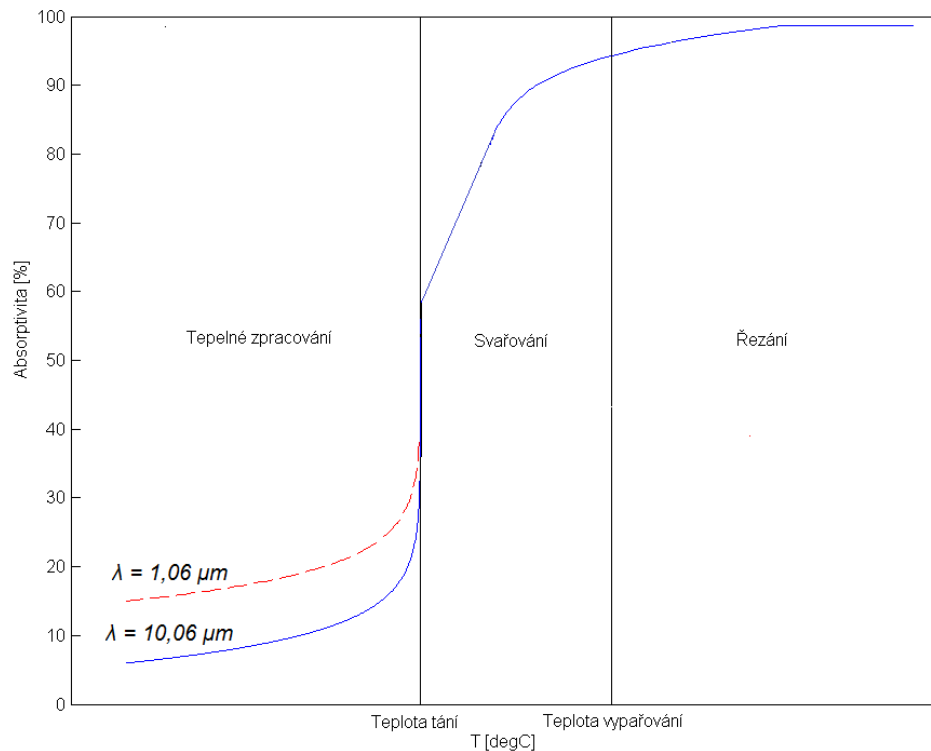
Jak je vidět na obr. 1.28 při zvýšení teploty dojde ke zvýšení absorpce u daného materiálu, protože u kovů klesá schopnost elektrické vodivosti. Zároveň je elektrická vodivost ve střídavém elektromagnetickém poli závislá na frekvenci, a proto laserový paprsek s rozdílnou pracovní vlnovou délkou bude vykazovat rozdílnou absorpci ve stejném materiálu. Významný vliv na absorpci má stav povrchu materiálu, především jeho drsnost. Velikost absorpce také ovlivňuje přítomnost oxidické vrstvy a povrchové napětí. Absorpce je dále ovlivněna např. úhlem dopadu laserového paprsku na povrch materiálu [17][26].

Druh zpracování materiálu	Průměrná drsnost povrchu materiálu [μm]	Absorpce CO ₂ laseru [%]	Absorpce Nd:YAG laseru [%]	Materiál	Absorpce CO ₂ laseru	Absorpce Nd:YAG laseru [%]
Vyleštěný	0,02	5,2	30	Ocel	5	37
Broušený	0,21	7,5	40	Měď	1	10
Válcovaný	0,87	6	34	Hliník	3	27
Pískovaný	1,65	34	68,3	Zlato	1	5

Tab. 1.1 Porovnání absorpce záření laserového paprsku pro různé materiály (převzato z [26])

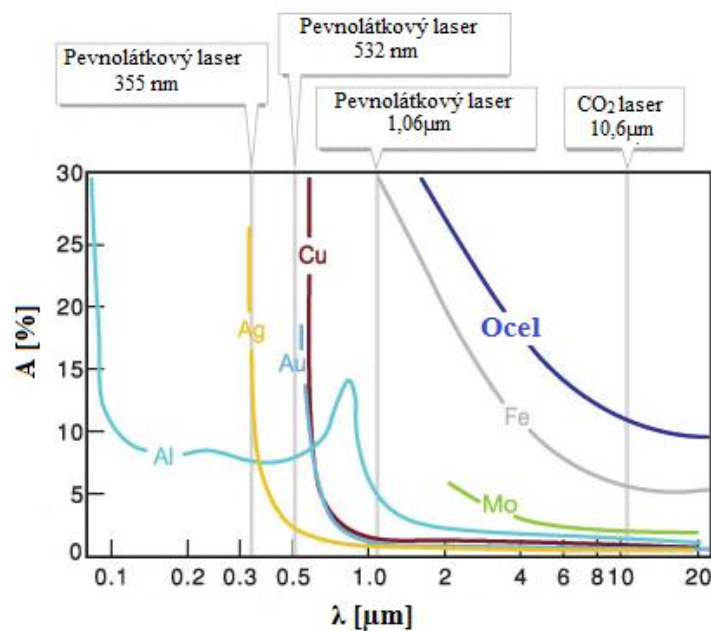
Zvýšení účinku procesu laserového povrchového kalení lze dosáhnout:

- Zvýšením drsnost povrchu zpracovávaného materiálu (pískování)
- Povrchovou úpravou
- Zajištěním kolmého dopadu laserového paprsku na povrch zpracovávaného materiálu
- Použití tzv. absorbéru (materiálu s vyšším koeficientem absorpce)



Obr. 1.28 Závislost absorpce laserového záření na teplotě (překresleno z [17])

Na obr. 1.29 je zobrazen graf závislosti absorpce na vlnové délce. Známořňuje hodnoty absorpce pro běžně používané a v praxi tepelně opracovávané materiály. Jako příklad jsou zde uvedeny hodnoty pro CO₂ plynové lasery pracující na vlnové délce 10,6 μm a pevnolátkový laser Nd:YAG pracující na vlnové délce kolem 1 μm . Z grafu je vidět, že například při vlnové délce 1 μm u hliníku nebo oceli, je absorpce výrazně vyšší než při vlnové délce 10,6 μm používané u CO₂ laserů.



Obr. 1.29 Závislost absorpce laserového záření na použité vlnové délce (převzato z [14])

1.2.10 Teplotní pole [8]

Při tepelných úpravách materiálu pomocí koncentrovaných zdrojů energie je nutné určit tvar a rozměry vrstvy pod povrchem, která se ohřívá na vysoké teploty. Z tohoto důvodu se provádí analýza teplotního pole daného materiálu. Mezi charakteristické parametry teplotního pole patří:

Hustota tepelného toku q je definována podle vzorce (1.5) a závisí na celkovém výkonu zařízení P_z , součiniteli absorpce A a na poloměru ozářené oblasti r_r

$$q = \frac{A \cdot P_z}{\pi \cdot r_r^2} \left(\frac{W}{m^2} \right). \quad (1.5)$$

Ustálená teplota T_s je důležitý parametr povrchového zdroje a je určena podle vztahu (1.6) kde λ značí tepelnou vodivost

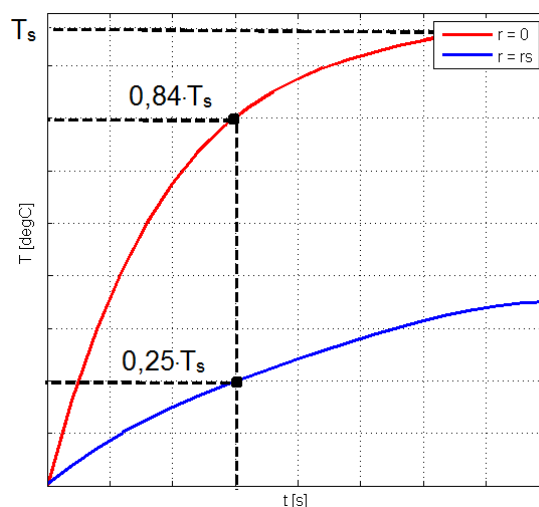
$$T_s = \frac{q \cdot r_r}{\lambda} (K). \quad (1.6)$$

Dalším důležitým parametrem je charakteristická doba přenosu tepla t_c (1.7), za kterou je ve středu povrchového zdroje dosaženo hodnoty $0,84 T_s$. Jak je vidět ze vztahu (1.7) tento čas je závislý na teplotní vodivosti a

$$t_c = \frac{\pi \cdot r_r^2}{a} (s). \quad (1.7)$$

Tepelný gradient je definován vztahem (1.8). Pro tepelný gradient platí, že je závislý na hustotě tepelného toku q . Při měkkém ohřevu je teplotní gradient malý, při tvrdém velký. Na obr. 1.30 je znázorněna závislost teploty ve středu ($r = 0$) ohraničeného povrchového zdroje a na jeho okraji ($r = r_s$)

$$\frac{\Delta T}{\Delta r} = \frac{(0,84 - 0,25) \cdot T_s}{r_s} = 0,59 \cdot \frac{q}{\lambda} \left(\frac{K}{mm} \right). \quad (1.8)$$



Obr. 1.30 Časová závislost teploty ve středu a na okraji ohraničeného povrchového zdroje (překresleno z [8])

Jak je vidět z obr. 1.30 rozložení teploty se mění s časem. Proto je pro její přesné určení nutné vyjádřit komplikovaný integrál, který obsahuje Besselovy funkce a Gaussův integrál chyb podle závislosti funkce (1.9)

$$T(\lambda, a, q, z, t, r_s, v, r). \quad (1.9)$$

Jelikož takové řešení je velmi složité na výpočet, používá se přibližné analytické řešení, které je založeno na modelu jednorozměrného ohřevu polonekonečného prostředí neohrazeného povrchovým zdrojem s konstantní hodnotou hustoty tepelného toku q , působícího podle (1.10) po čas t a splňující omezující podmínku pro r_s podle (1.10)

$$t = \frac{2 \cdot r_s}{v}; \text{ podmínka: } r_s \gg \sqrt{a \cdot t}. \quad (1.10)$$

Pak pro teplotu pod povrchem materiálu v hloubce z platí vztah (1.11)

$$T(\lambda, a, q, z, t) = \frac{q}{\lambda} \cdot \sqrt{4 \cdot a \cdot t \left\{ \frac{1}{\pi} \cdot \exp \left[-\frac{z^2}{4 \cdot a \cdot t} \right] - \frac{z}{\sqrt{4 \cdot a \cdot t}} * \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{\sqrt{4 \cdot a \cdot t}} \right) \right] \right\}}. \quad (1.11)$$

Za předpokladu, že platí podmínka pro hloubku z , uvedená ve vztahu (1.12) pak je možné použít zjednodušený výpočet teploty pomocí lineární aproximace ve tvaru uvedeném v (1.12)

$$T = \frac{q}{\lambda} \left(\sqrt{\frac{4 \cdot a \cdot t}{\pi}} - z \right); \text{ podmínka: } z \ll \sqrt{4 \cdot a \cdot t}. \quad (1.12)$$

Ze vztahu vyjádřeného v (1.12) lze určit ideální vlastnosti tepelného zdroje, při jehož působení by se povrchová vrstva materiálu ohřála na teplotu velmi těsně pod teplotou tavení T_m a díky tomu by došlo k maximální hodnotě hloubky zakalení z_k .

Pro efektivní hodnotu hustoty tepelného toku q_{ef} lze pak psát vztah (1.13)

$$q_{ef} = T_m \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{\pi}{4 \cdot a \cdot t}}. \quad (1.13)$$

Pokud bude platit podmínka, že k zakalení materiálu dojde všude tam, kde bude teplota větší než kalicí teplota pak maximální hloubka zakalení bez natavení povrchu materiálu je rovna vztahu (1.14).

$$z_k = \sqrt{\frac{4 \cdot a \cdot t_k}{\pi}} - \frac{\lambda \cdot T_k}{q_{ef}} = \sqrt{\frac{4 \cdot a \cdot t_k}{\pi}} \cdot \frac{T_m - T_k}{T_m}; \text{ podmínka: } T > T_k. \quad (1.14)$$

Teplotní vodivost, teplota tání i tavení jsou materiálové konstanty, proto je hloubka prokalení závislá především na době ohřevu před kalením, kterou lze definovat podle (1.15)

$$t_k = \frac{\pi \cdot Z_k^2}{4 \cdot a} \left(\frac{T_m}{T_m - T_k} \right)^2 \quad (1.15)$$

Dalším parametrem je příčný rozměr svazku paprsku záření r_s který je popsán v (1.16)

$$r_s = \left[\frac{k_{v'} \cdot A \cdot P_z \cdot Z_k}{\pi \cdot \lambda \cdot (T_m - T_k)} \right]^{1/2} \quad (1.16)$$

Z rovnic (1.15) a (1.16) lze určit rychlost pohybu tepelného zdroje v která je uvedena ve vztahu (1.17)

$$v = \frac{2 \cdot r_s}{t_k} = \frac{8 \cdot a}{\pi \cdot T_m^2} \cdot \left(\frac{T_m - T_k}{Z_k} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{k_{v'} \cdot A \cdot P_z}{\pi \cdot \lambda} \right)^{1/2} \quad (1.17)$$

1.2.11 Zbytková napětí po laserovém povrchovém kalení

Při procesu povrchového laserového kalení dochází k vytváření tlakového napětí na povrchu materiálu a také v podpovrchových vrstvách, v jehož důsledku dojde ke zvýšení tvrdosti a odolnosti vůči únavě materiálu či opotřebením. Velká tvrdost zakaleného materiálu může způsobovat technologické problémy tam, kde je po kalení materiál třeba dále opracovávat například broušením. Proto jsou pro takové součásti voleny co nejmenší přídavky na obrábění.

Zbytkové napětí je způsobeno jako důsledek teplotního gradientu a martenzitické fázové transformace. Pro povrchové laserové kalení je typické vysoké zbytkové tlakové napětí, které působí jako předpětí a zvyšuje tak možnost zatížení dané součásti. Zbytkové tlakové napětí zabraňuje tvorbě trhlin, případně omezuje jejich šíření přes kalením upravenou vrstvu materiálu [17].

2 Zkoušky tvrdosti

Tvrdost je mechanická vlastnost materiálu, která je nejčastěji definována, jako odpor materiálu vůči vnikání cizího tělesa [28].

Okolnosti ovlivňující tvrdosti materiálu:

- Velikost působící síly
- Doba působení síly
- Plastické a elastické vlastnosti materiálu
- Tloušťka testovaného vzorku
- Tvar, rozměry, tvrdost a modul pružnosti vnikajícího tělesa
- Rychlost vnikání indentoru do testovaného vzorku
- Atmosférické podmínky, za kterých probíhá zkouška, především teplota [28].

Měření tvrdosti lze rozdělit podle několika hledisek:

a) Podle způsobu zatěžování zkoušeného materiálu:

- *Statické* – zkušební těleso je vtlačováno do zkoušeného materiálu s pozvolna narůstající silou
- *Dynamické* – zkušební těleso vniká do povrchu zkoušeného materiálu rázem

b) Podle druhu deformace vzniklé ve zkoušeném materiálu:

- *Dynamicko – plastické metody* – zkušební těleso vniká do povrchu zkoušeného materiálu rázem a zanechá trvalou deformaci povrchu
- *Dynamicko – elastické metody* – zkušební těleso dopadá rázem, který je důsledkem tíhové síly

c) Podle účelu měření:

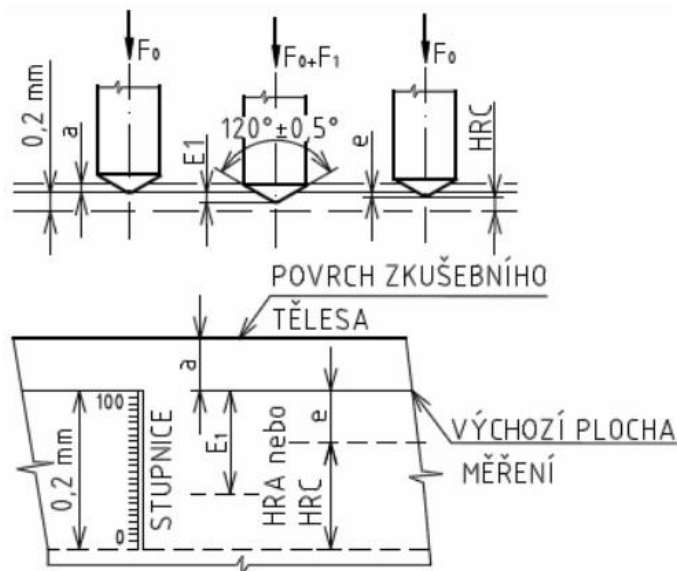
- *Měření mikrotvrdosti* – velikost zatěžovací síly je od 0,01 N do 9,807 N
- *Měření makrotvrdosti* - velikost zatěžovací síly je větší než 9,807 N [29].

2.1 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Tato měřicí zkouška je pojmenována po Stanley P. Rockwellovi, který ji vytvořil a je normována dle ČSN 42 0373. Zkouška je rychlá a umožňuje zkoušet materiály měkké, tvrdé případně i tenké povrchové vrstvy. Nejčastěji se používá při automatizované výrobě.

Indentorem může být buď kalená kulička, nebo diamantový kužel. Druh zkušebního tělesa se volí podle druhu stupnice, přičemž každá stupnice je určena pro určitý druh materiálu. Hodnota tvrdosti podle Rockwella se odečítá přímo ze stupnice tvrdoměru [28].

Jak je vidět na obr. 2.1 při zkoušce se měřený materiál umístí kolmo pod indentor a začne se na něj působit předběžným zatížením F_0 . Předběžné zatížení vyrovnává nerovnosti povrchu vzorku a hodnota tvrdoměru se nastaví na nulu. Následně je vzorek zatížen zkušební silou F_1 , která se po dosažení daného zatížení odlehčí a pomocí tvrdoměru se odečte hodnota tvrdosti vzorku, která je určena velikostí vtisku e [28][29].



Obr. 2.1 Princip zkoušky tvrdosti podle Rockwella (převzato z [28])

V tabulce 2.1 je uveden způsob označení tvrdosti podle Rockwella a význam jednotlivých parametrů. Například označení 62 HRC říká, že tvrdost materiálu je 62 a zkouška byla měřena na stupnici C, tedy pomocí jehlanu.

X HRY
X - naměřená hodnota tvrdosti pomocí tvrdoměru [-]
HR - hardness Rockwell tedy Rockwellovo tvrdostní číslo
Y - druh použité stupnice

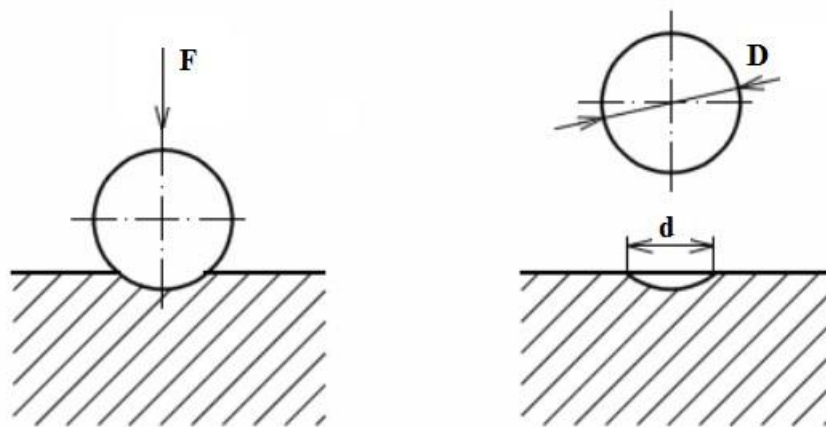
Tab. 2.1 Způsob označení tvrdosti podle Rockwella (převzato z [28])

2.2 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Autorem této zkoušky tvrdosti je Johan August Brinell a její správný průběh podléhá normě ČSN 42 0371.

Zkušebním tělesem je zakalená ocelová kulička, která je vtlačována do povrchu zkoušeného materiálu. Tvrdost podle Brinella je vyhodnocena pomocí poměru zkušebního zatížení vůči ploše vtisku jak popisuje vzorec (2.1), kde F je zatěžovací síla, D je průměr kuličky a d je průměr vtisku [29][30].

$$HB = 0,102 \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.1)$$



Obr. 2.2 Princip zkoušky tvrdosti podle Brinella (převzato z [28])

Brinellova zkouška tvrdosti je vhodná především pro měkké a středně tvrdé materiály, používá se proto pro měření tvrdosti odlitků, hrubozrnných materiálů či materiálů s texturou po tváření.

X HBY D/F/t
X - naměřená hodnota tvrdosti pomocí tvrdoměru [-]
HB - hardness Brinell tedy Brinellovo tvrdostní číslo
Y - druh materiálu zkušebního tělesa S = ocel, W = slinutý karbid
D - průměr zkušebního tělesa [mm]
F - velikost zátěžné síly [kp]
t - doba působení zařízení [s]

Tab. 2.2 Způsob označení tvrdosti podle Brinella (převzato z [28])

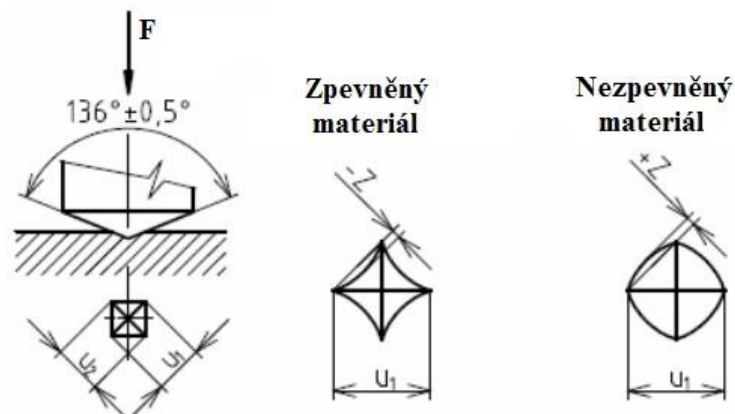
2.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Autory této zkoušky tvrdosti, jejíž název je odvozen od názvu tvrdoměru společnosti Vickers, jsou R.L Smith s G.E Sandlandem. Zkouška podléhá normě ČSN 42 0374.

Princip zkoušky se podobá zkoušce podle Brinella s tím rozdílem, že je použit diamantový jehlan o čtvercové podstavě s vrcholovým úhlem 136° jako zkušební těleso a jiná velikost zatížení. Tato metoda je velmi přesná používá se především pro laboratorní účely měření.

Zkušební těleso je vtlačováno do povrchu zkoušeného materiálu zatížením o hodnotě 293 N s dobou působení 10 až 15 vteřin. Tvrdost podle Vickerse se vyhodnocuje podle vzorce (2.2), který popisuje poměr působícího zatížení vůči ploše vtisku [28][30].

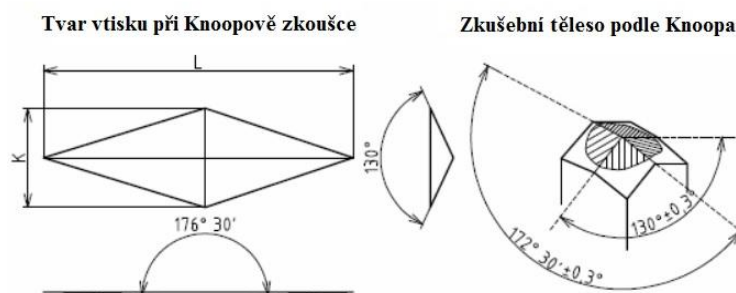
$$HV = 0,1891 \frac{F}{u^2} \quad (2.2)$$



Obr. 2.3 Princip zkoušky tvrdosti podle Vickerse (převzato z [31])

2.4 Zkouška tvrdosti podle Knoop

Knoopova metoda vychází z Vickersovy metody. Indentorem je diamantový jehlan se základnou ve tvaru protáhlého kosočtverce. Po provedení vtisku, se měří pouze délka delší úhlopříčky – L . Knoopova zkouška se využívá pro určování mikrotvrdosti materiálu a je stanovena normou ČSN ISO 4545 [28].



Obr. 2.4 Princip zkoušky tvrdosti podle Knoop (převzato z [32])

3 Matematický model úlohy

3.1 Způsoby přenosu tepla

Proces ohřevu výrobku a přenos (sdílení) tepla je velmi složitý děj, na němž se podílejí všechny jeho složky. Proto se pro matematický popis a tvorbu modelů sledovaných jevů zavádí celá řada zjednodušení [33].

3.1.1 Tepelná výměna vedením (kondukcí)

Pokud nemá těleso ve všech místech stejnou teplotu, dochází k jejímu vyrovnávání pomocí kinetické energie. Princip přenosu tepla vedením tedy spočívá v ději způsobeném vzájemným působením mezi bezprostředně sousedícími částicemi v daném tělese. Při přenosu tepla vedením rozlišujeme, zda-li se jedná o přenos při stacionárních nebo nestacionárních podmínkách. Při nestacionárních podmínkách se teplota v určitém místě tělesa mění v závislosti na čase. Šíření tepla vedením se uskutečňuje především v pevných látkách. V kapalinách a plynech se k tomuto sdílení tepla připojuje také sdílení tepla prouděním a u látek, které částečně propouštějí záření (např. sklo), také sdílení tepla sáláním. Při početním řešení sdílení tepla je třeba použít dva zákony, podle kterých se pak definují parciální diferenciální rovnice pro rozdělení teplot v tělesech:

- Zákon vedení tepla, který vyjadřuje závislost mezi tepelnými toky a teplotními spády
- Zákon o zachování energie, který bychom použili na tepelné jevy

Základním zákonem pro vedení tepla je Fourierův zákon, jehož matematický tvar je uveden v rovnici (3.1.1). Zákon vyplývá z experimentálně zjištěných skutečností, které J. B. Fourier při svých pokusech a měřeních zjistil a říká, že teplo prošlé tělesem, izotropním v každém místě, tedy homogenním a izotropním vzhledem k přenosu tepla, je přímo úměrné teplotnímu spádu, době a průtokové ploše kolmé na směr teplotního toku [3][33].

Vztah (3.1.1) platí při stacionárních podmínkách kde j_v je teplotní tok, S plocha, $\frac{dQ}{dt}$ je teplotní gradient a λ tepelná vodivost [3]

$$j_v = \frac{1}{S} \cdot \frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot \text{grad}T. \quad (3.1.1)$$

V nestacionárních podmínkách je sdílení tepla popsáno rovnicí (3.1.2) kde c je měrná tepelná kapacita, ρ je hustota, r jsou radiální souřadnice a Q'_v je rychlost vzniku nebo spotřeby vnitřního tepla ve výrobku [3]

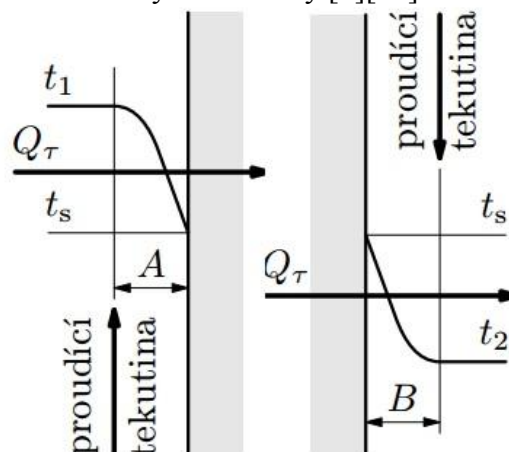
$$j_v = \frac{1}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{Q'_v}{c \cdot \rho}. \quad (3.1.2)$$

3.1.2 Přenos tepla prouděním (konvekce)

S přenosem tepla prouděním se setkáváme v praktickém životě velmi často, ať už jde o volné proudění v atmosféře či o tepelný přenos při obtékání nějakých těles. U přenosu tepla prouděním rozlišujeme, zda-li se jedná o proudění přirozené nebo proudění nucené.

Pokud je proudění např. vzduchu vyvoláno rozdílnými měrnými hmotnostmi, pak se jedná o proudění přirozené. V případě, že vznikne proudění vlivem vnějších vlivů např. pohybem vzduchu od ventilátoru, pak mluvíme o proudění nuceném – uměle vyvolaném. K přenosu tepla prouděním dochází také například při styku kapaliny nebo plynu s pevnou stěnou. Při tom dochází k ochlazování nebo ohřívání tenké vrstvy tekutiny při stěně (podle toho, je-li teplota stěny vůči tekutině vyšší nebo nižší). Vzniklý rozdíl teplot vrstev pak způsobuje přirozené proudění, které je znázorněno na obr. 3.3.

Na obr 3.1 oblast A značí přenos tepla prouděním z tekutiny do stěny, oblast B značí oblast přenosu tepla prouděním ze stěny do tekutiny [3][33].



Obr. 3.1 Přenos tepla prouděním (převzato z [33])

Tepelný tok při přenosu tepla prouděním z prostředí na výrobek je definován podle Newtonova zákona ve tvaru (3.2), kde α_p je součinitel přenosu tepla prouděním (např. pro vzduch s přirozenou konvekcí má hodnotu 2-25), T_p je teplota prostředí a T_v je teplota výrobku [3]

$$J_p = \alpha_p \cdot (T_p - T_v). \quad (3.2)$$

3.1.3 Přenos tepla sáláním (radiací)

Přenos tepla sáláním má spojitost s vnitřními změnami energie tělesa a následným vydáváním záření, které je emitováno v podobě elektromagnetických vln do okolního prostoru tělesa. Ve chvíli, kdy toto záření dopadne na povrch jiného tělesa a dojde-li k jeho pohlcení, pak také dojde ke zvýšení vnitřní energie tohoto tělesa. Souhrně se vzájemné sálání a pohlcování při dvou a více tělesech s rozdílnými teplotami nazývá sdílení tepla sáláním. Pro přenos tepla zářením není potřeba žádné hmotné prostředí (nevyžaduje žádný nosič energie) a může proto probíhat i ve vakuu.

Sálání tepla je přirozená vlastnost všech těles a každé těleso při něm vydává také záření. Toto záření je při dopadu na jiné těleso částečně pohlceno, částečně odraženo a částečně projde samotným tělesem [3][33].

Pohltivost a odrazivost záření je určena hlavně kvalitou jeho povrchu a barvou. Například bílá barva odrazí největší množství záření a naopak černá největší množství absorbuje.

Při přenosu tepla zářením je tepelný tok ze zařízení na výrobek vyjádřen pomocí Stefan-Boltzmannova zákona, který je uveden ve vztahu (3.3), kde C_0 je součinitel sálání pro absolutně černý povrch ($C_0 = 5,670400 \cdot 10^8 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$), ε je emisivita materiálu v rozmezí 0 až 1 ($\varepsilon = 1$ je dokonale černé těleso), T_z je teplota zařízení a T_v je teplota výrobku [3]

$$j_s = C_0 \cdot \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{T_z}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_v}{100} \right)^4 \right]. \quad (3.3)$$

3.2 Matematický model pro indukční ohřev

Matematický model popisující indukční ohřev pevných materiálů je obecně popsán pomocí dvou nelineárních parciálních diferenciálních rovnic. První rovnice definuje rozložení elektromagnetického pole, druhá rovnice popisuje rozložení teplotního pole. Obě pole jsou v rámci řešeného matematického modelu pomocí programu COMSOL vzájemně sdružena.

3.2.1 Matematický model teplotního pole [34][35]

Model teplotního pole indukčního ohřevu vychází z prvního zákona termodynamiky, podle kterého je celková energie izolované soustavy časově neměnná.

Celkovou energetickou bilanci systému lze tedy vyjádřit vztahem (3.4), kde P_{in} je vstupující tepelný tok, P_{out} je vystupující tepelný tok, $\frac{dU_{int}}{dt}$ představuje změnu vnitřní energie systému a P_g vyjadřuje výkon generovaný v objemu vnějším zdrojem, což jsou Jouleovy ztráty W_j

$$P_{in} - P_{out} = \frac{dU_{int}}{dt} + P_g. \quad (3.4)$$

Rozdíl tepelného toku P_{in} a P_{out} (3.6) lze souhrně vyjádřit pomocí integrace celkového tepelného toku \mathbf{q} (3.5) přes plochu elementární krychle dS a poté použitím Gaussovy věty

$$\mathbf{q} = -\lambda \text{grad } T \quad (3.5)$$

$$P_{in} - P_{out} = \oint_S \mathbf{q} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \text{div } \mathbf{q} \, dV = - \int_V \text{div } \lambda \text{grad } T \, dV. \quad (3.6)$$

Změna vnitřní energie systému akumulované v objemu dV je dána vztahem (3.7), kde ρ je hustota materiálu a c_p je tepelná kapacita

$$\frac{dU_{int}}{dt} = \int_V \rho \cdot c_p \frac{dT}{dt} \, dV. \quad (3.7)$$

Časovou derivaci lze dále rozepsat podle vztahu (3.8), kde člen $\frac{\partial T}{\partial t}$ vyjadřuje rychlost akumulace vnitřní energie a člen $\mathbf{v} \cdot \text{grad } T$ rychlost konvektivního toku vlivem pohybu média

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \text{grad } T. \quad (3.8)$$

Výkon generovaný vnějším zdrojem (Jouleovy ztráty) je popsán vztahem (3.9), kde p je měrný výkon dodaný vnějším zdrojem

$$P_g = \int_V p \, dV. \quad (3.9)$$

Pokud dosadíme všechny členy do bilanční rovnice, uvedené ve vztahu (3.4), dostaneme rovnici (3.10)

$$-\int_V \operatorname{div} \lambda \operatorname{grad} T \, dV = \int_V \rho \cdot c_p \frac{dT}{dt} \, dV + \oint_V p \, dV. \quad (3.10)$$

Po eliminaci elementárního objemu dV z rovnice (3.10) získáme nestacionární Fourierovu-Kirchohoffovu parciální diferenciální rovnici vedení tepla ve tvaru popsaném rovnicí (3.11), kde λ je měrná elektrická vodivost, T je termodynamická teplota, ρ je měrná hmotnost materiálu, c_p je tepelná kapacita a W_j jsou měrné Jouleovy ztráty

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) = \rho \cdot c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad} T \right) - w_j. \quad (3.11)$$

Na povrchu desky materiálu je třeba respektovat okrajovou podmínku pro přestup tepla prouděním (konvekci) (3.12) a sáláním (radiací) (3.13).

Hustota konvektivního tepelného toku je definována v rovnici (3.12), kde q_{conv} je hustota tepelného toku, α je koeficient přestupu tepla, T_s je teplota povrchu tělesa a T_{ext} je teplota okolního prostředí

$$q_{conv} = \alpha(T_s - T_{ext}). \quad (3.12)$$

Hustota tepelného toku vyzářeného radiací je popsána vztahem (3.13), kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,670400 \cdot 10^8 \, \text{Wm}^{-2} \, \text{K}^{-4}$), C je koeficient pro emisivitu povrchu, T_s je teplota povrchu tělesa a T_r je teplota povrchu okolních objektů ke kterým je teplo ze systému vyzařováno např. okolní stěny

$$q_{rad} = \sigma C(T_s^4 - T_r^4). \quad (3.13)$$

Výsledná rovnice pro okrajovou podmínku potom tedy je ve tvaru (3.14), kde n představuje směr vnější normály směrem k povrchu systému v daném bodě

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_s - T_{ext}) + \sigma C(T_s^4 - T_r^4). \quad (3.12)$$

3.2.2 Matematický model elektromagnetického pole [34][35]

Pro popis elektromagnetického pole indukčního ohřevu se vychází z první Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru, která je uvedena ve vztahu (3.13) a kde \mathbf{H} je intenzita magnetického pole a \mathbf{J} proudová hustota

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}. \quad (3.13)$$

Jelikož je z matematického hlediska výhodnější řešit elektromagnetické pole pomocí potenciálů, tak se zavádí vektorová veličina nazvaná vektorový magnetický potenciál \mathbf{A} (3.14) a veličina skalární elektrický potenciál φ (3.15)

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}. \quad (3.14)$$

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi. \quad (3.15)$$

Pro magnetický vektorový potenciál \mathbf{A} i skalární potenciál φ platí, že je všech bodech spojitou funkcí polohy a může se lišit o konstantu, je tedy nejednoznačný.

Navíc pro magnetický vektorový potenciál \mathbf{A} platí, že se může navíc lišit o gradient libovolné skalární funkce ψ . Proto je dále zaváděna doplňující podmínka, omezující třídu funkcí ψ . Tato podmínka se nazývá Coulombova podmínka a je uvedena ve vztahu (3.16)

$$\operatorname{div} \mathbf{A} = 0. \quad (3.16)$$

Proudová hustota \mathbf{J} je v elektromagnetickém poli definována vztahem (3.17), kde γ je konduktivita prostředí, \mathbf{E} je intenzita elektrického pole a $\mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A}$ je intenzita elektrického pole indukovaná pohybem nábojů v magnetickém poli

$$\mathbf{J} = \gamma \cdot \mathbf{E}' = \gamma \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A}) \quad (3.17)$$

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H}. \quad (3.18)$$

Ze znalosti vztahů (3.17) a (3.18), lze pak psát rovnici (3.13) ve tvaru (3.19)

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = \gamma \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A}). \quad (3.19)$$

Dosadíme-li vztah (3.14) pro magnetický vektorový potenciál \mathbf{A} do II. Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru, uvedeném v (3.20), tak po úpravě dostaneme rovnici (3.21)

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.20)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \operatorname{rot} \mathbf{A} = -\operatorname{rot} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (3.21)$$

$$\operatorname{rot} \left(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0.$$

Jelikož rovnice (3.21) má nulovou rotaci, lze ji proto vyjádřit jako gradient skalárního elektrického potenciálu φ a získat tak vztah pro elektrickou intenzitu \mathbf{E} ve tvaru (3.22)

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \operatorname{grad} \varphi. \quad (3.22)$$

Dosažením elektrické intenzity \mathbf{E} ze vztahu (3.13) do rovnice (3.10) získáme výslednou parciální diferenciální rovnici (3.23), která popisuje magnetické pole indukčního ohřevu

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) + \gamma \left[\left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \operatorname{grad} \varphi \right) - (\mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A}) \right] = \mathbf{J}_{ext}. \quad (3.23)$$

V rovnici (3.23) \mathbf{J}_{ext} značí proudovou hustotu vnějších proudů a $\gamma \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$ vyjadřuje transformační složku vířivých proudů. Pro zjednodušení výpočtu se předpokládá, že indukční ohřev neobsahuje žádné volné náboje, a proto může být složka $\gamma \cdot \operatorname{grad} \varphi$ zanedbána. Stejně tak modul rychlosti \mathbf{v} je v řádech milimetrů, nejvýše centimetrů za sekundu, a proto lze pohyblivou složku vířivých proudů $\gamma(\mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A})$ bez zanesení významné chyby do výpočtu také zanedbat. Výsledná rovnice proto potom přechází do tvaru (3.24)

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_{ext}. \quad (3.24)$$

I přes uvedená zjednodušení je numerické řešení modelu ve 3D velmi složité realizovatelné a náročné na výpočetní kapacitu. Důvodem je především velký nepoměr mezi kmitočtem budícího proudu, přenášeného induktorem a časy předehřevu (dohřevu), které se pohybují v řádech vteřin.

Způsobem jak dále zjednodušit model a jeho výpočet je předpoklad, že elektromagnetické pole je harmonické, což umožňuje řešení problému ve frekvenční oblasti s použitím Helmholtzovy rovnice pro fázor magnetického vektorového potenciálu $\underline{\mathbf{A}}$ ve tvaru (3.25), kde ω je úhlová frekvence a μ permeabilita materiálu. Permeabilita feromagnetických částí nemá konstantní hodnotu v každém bodě a její velikost je vždy přiřazena k místní hodnotě hustoty magnetického toku v každém elementu výpočetní sítě

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \underline{\mathbf{A}} + j \cdot \omega \gamma \mu \underline{\mathbf{A}} = \mu \cdot \underline{\mathbf{J}}_{ext}. \quad (3.25)$$

Proudová hustota indukovaných proudů, které vyvolalo magnetické pole je určena vztahem (3.26)

$$\underline{\mathbf{J}}_{ind} = -j \omega \gamma \underline{\mathbf{A}}. \quad (3.26)$$

Tyto indukované proudy způsobují měrné Joulovy ztráty, které jsou vyjádřeny rovnicí (3.27). Další ztráty, které vznikají v materiálu jsou hysterézní ztráty w_m , ale pro uvažovanou frekvenční oblast je jejich hodnota velmi malá a lze ji při výpočtu zanedbat

$$W_j = \frac{1}{2} \frac{|\underline{\mathbf{J}}_{ind}|^2}{\gamma}. \quad (3.27)$$

3.3 Matematický model teplotního pole pro laserový ohřev [35]

Na rozdíl od indukčního ohřevu při laserovém ohřevu nevzniká magnetické pole a proto je v matematickém modelu řešeno pouze pole teplotní.

Rovnice, která popisuje rozdělení teplotního pole vytvořeného laserovým svazkem, je uvedena ve vztahu (3.28). Tvar rovnice má velmi podobný tvar jako vztah uvedený v (3.11) pro indukční ohřev. Rozdíl v rovnicích je ten, že u ohřevu laserovým paprskem není vnitřní zdroj tepla

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) = \rho \cdot c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad} T \right). \quad (3.28)$$

Teplo je při laserovém ohřevu dodáváno v podobě tepelného toku q_{in} , který vstupuje do povrchu ohřivaného tělesa v místě kde laserový svazek dopadne na plochu materiálu. Tento děj je popsán okrajovou podmínkou popsanou v rovnici (3.29). Stejná podmínka může být použita i pro zjištění vystupujícího tepelného toku q_{out} v důsledku radiace a konvekce

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -|q_{in}|. \quad (3.29)$$

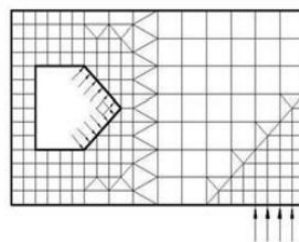
3.4 Numerické metody

Numerické řešení je řešení přibližné, při jehož aplikaci se převádí problém hledání spojitých funkcí na problém hledání konečného počtu neznámých parametrů, pomocí nichž se hledané funkce přibližně aproximují. Tento přechod se označuje jako diskretizace spojitého problému. Diskretizovaný problém je řešen algebraickými prostředky v konečném počtu kroků. Numerické řešení je dostupné pro každou matematicky popsanou úlohu, jakékoliv geometrie a jakkoliv komplikovanou. Jediným, ale o to významnějším omezením, je velikost dostupné výpočetní kapacity. Výsledky numerického řešení se však vztahují jen ke konkrétní úloze. Jakékoliv úpravy a optimalizace vyžadují opakování celého procesu tvorby a řešení modelu. V současnosti je nejrozšířenější metodou metoda konečných prvků (MKP), kterou využívá i program COMSOL Multiphysics[®], pomocí něhož je realizován matematický model v této práci. Další v současné době využívanou metodou je metoda hraničních prvků (MHP). Budoucností by mohly být například tzv. bezsíťové metody (Mesh Free Method) [37].

3.4.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků je numerická metoda sloužící například k simulaci proudění tepla, elektromagnetického pole, proudění kapalin a dalších fyzikálních jevů. Mezi největší výhodu této metody patří univerzálnost jejího využití, lze ji využít při tvorbě 2D i 3D modelů. Nevýhodou metody je, že se jedná o tzv. metodu odhadu, tedy její výsledky je nutné diskutovat a zvážit, zda jsou platné a dávají smysl.

Princip této metody spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého konečného počtu prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. Pro 2D úlohy probíhá diskretizace plochy většinou na trojúhelníky nebo čtverce, pro 3D úlohy je potom základním prvkem diskretizace hexaedr, ze kterého jsou odvozeny pak další druhy elementů. Každý element je spojen do uzlu, který je buď vnější a představuje proto okrajové podmínky úlohy, nebo vnitřní, které představují materiálové vlastnosti. Na obr. 3.2 je zobrazen postup diskretizace pro 2D úlohu řešenou pomocí MKP [34][37].



Obr. 3.2 Diskretizace výpočtové sítě u metody konečných prvků (převzato z [36])

Dalším podstatným krokem pro správné řešení pomocí metody konečných prvků je výběr správné analýzy pro řešení daného problému. Každá analýza je popsána soustavou rovnic, která poté přiřadí pro každý uzel diferenciální rovnici. Diferenciální rovnice jsou převedeny na algebraické a řešeny vhodnou numerickou metodou [34][37].

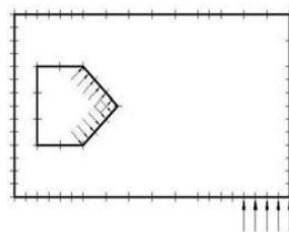
Důležitým krokem každého řešení pomocí numerických metod je konvergence řešení a uvědomění si možných chyb metody. Nejčastějšími chybami, které při MKP mohou nastat, jsou v oblasti diskretizace – elementy jsou příliš velké a nastává chyba při výpočtu. Pozornost je také třeba věnovat při tvorbě modelu a jeho zjednodušování.

3.4.2 Metoda hraničních prvků

Metoda hraničních prvků je druhou významnou v současnosti v praxi používanou numerickou metodou.

Hlavní rozdíl vůči metodě konečných prvků je v oblasti diskretizaci výpočetní sítě, která probíhá pouze pro povrch zkoumaného modelu, jak je vidět na obr. 3.3. Základním principem metody je transformace zadaného okrajového problému na hraniční integrální rovnice. Při řešení 2D úlohy se tedy redukuje na řešení integrální rovnice na 1D hranici oblasti, 3D úloha se převede na 2D hranici. Výsledkem řešení hraničních integrálních rovnic je nalezení neznámých hraničních hodnot funkcí resp. hodnot derivací těchto funkcí, které vystupují v původní diferenciální rovnici.

Společně s jednodušší diskretizací výpočtové sítě je redukce dimenze úlohy největší předností MHP, neboť významně snižuje počet rovnic potřebných k určení neznámých. Nevýhodou může být složitější nalezení řešení v nelineárním prostředí a také větší nároky na výpočtovou kapacitu zařízení [34][37].



Obr. 3.3 Diskretizace výpočetové sítě u metody hraničních prvků (převzato z [36])

3.5 Realizace modelu v COMSOL Multiphysics®

Program COMSOL Multiphysics® je softwarový inženýrský nástroj, určený k simulaci fyzikálních modelů na něž působí fyzikální vlivy.

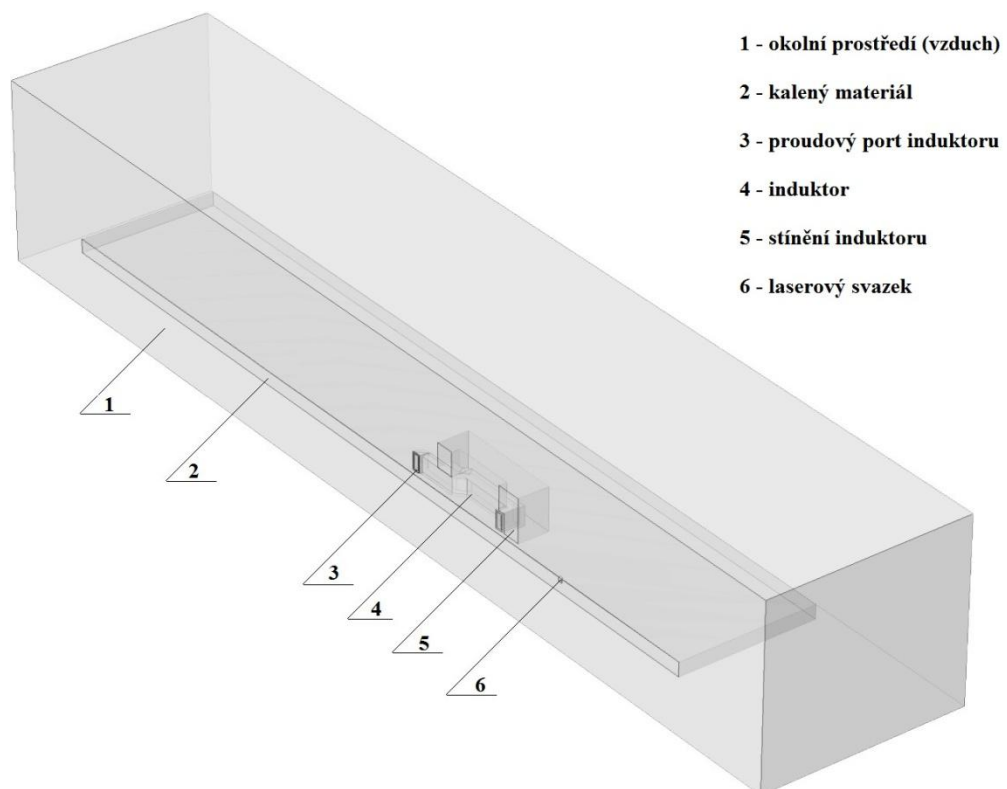
Postup tvorby modelu je rozdělen do několika kroků, které jsou stručně popsány v níže uvedených bodech.

3.5.1 Výběr prostorové dimenze modelu a řešení fyzikálních dějů

Pro mnou navrhovaný model jsem zvolil 3D dimenzi modelu, ve které je řešeno elektromagnetické pole sdružené s přenosem tepla v pevných látkách a časově závislou studií.

3.5.2 Návrh geometrie modelu

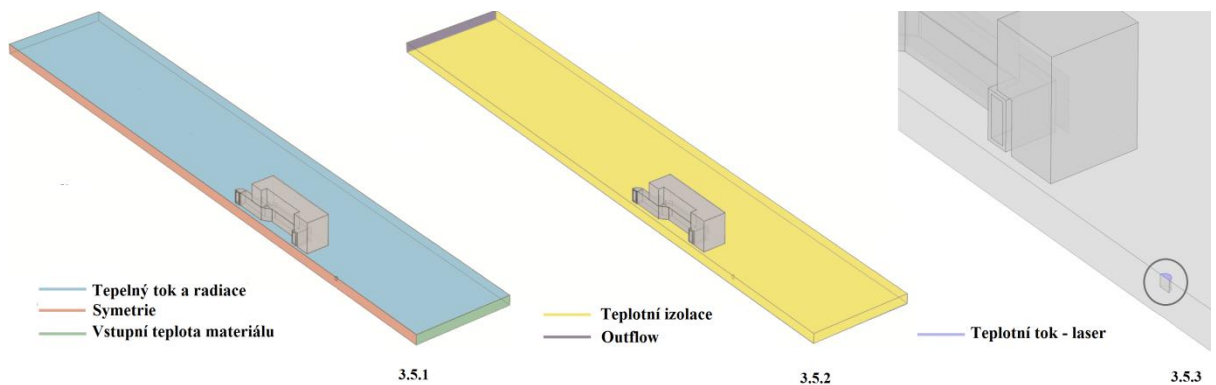
Prostředí CM umožňuje nakreslit geometrii pomocí vlastního grafického rozhraní, nebo ji importovat díky CAD import modulu, který podporuje velkou většinu používaných CAD formátů, což byl způsob, který jsem využil ve své práci já. Geometrie na obr. 3.4 byla nejdříve nakreslena v programu SOLIDWORKS® a následně importována do CM.



Obr. 3.4 Geometrie navrhovaného modelu pro posuvný laserový ohřev s indukčním dohřevem

3.5.3 Určení fyzikálních parametrů pro přenos tepla v pevných látkách

Definiční oblast pro model teplotního pole tvoří pouze oblast desky kaleného materiálu, na jejíchž hranicích je nutné předepsat a respektovat patřičné okrajové podmínky. Rozložení jednotlivých okrajových podmínek je barevně znázorněno na obr 3.5.



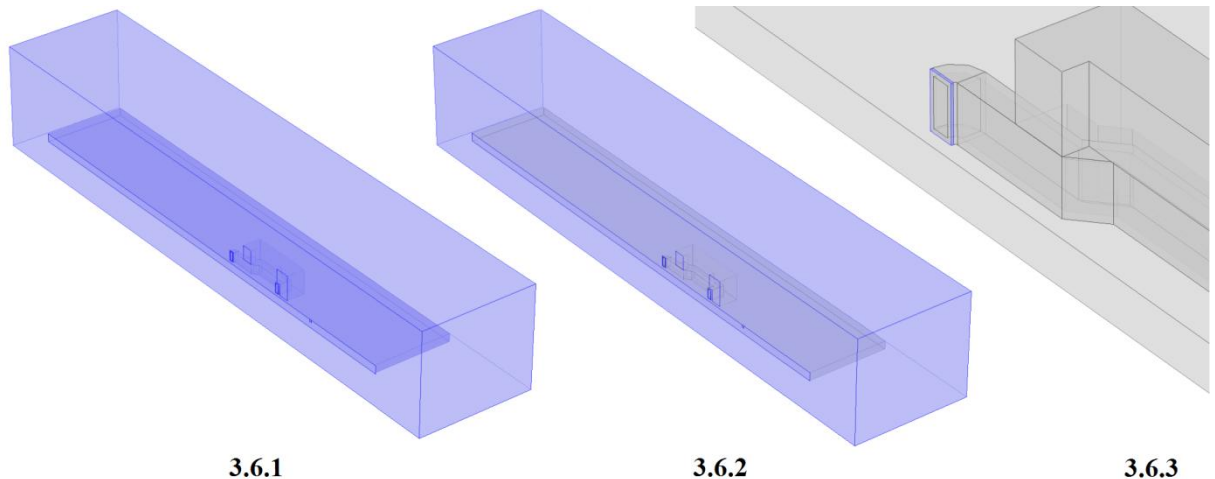
Obr. 3.5 Okrajové podmínky teplotního pole pro posuvný laserový ohřev s indukčním dohřevem

Použité okrajové podmínky pro teplotní pole:

- Symetrie (Symmetry)* – jelikož je geometrie modelu z důvodu zjednodušení kreslena v řezu, je třeba vytvořit okrajovou podmínku pro symetrii, která je na obr. 3.5.1 znázorněna červenou oblastí
- Tepelný tok (Heat Flux 1)* – je okrajová podmínka popisující hustotu konvektivního tepelného toku ve tvaru $q_{conv} = \alpha(T_s - T_{ext})$, viz rovnice (3.12). Na obr. 3.5.1 znázorněno modrou oblastí.
Radiace (Diffuse Surface) – je okrajová podmínka popisující hustotu tepelného toku, který je vyzářen radiací ve tvaru $q_{rad} = \sigma C(T_s^4 - T_r^4)$, viz rovnice (3.13). Na obr. 3.5.1 znázorněno modrou oblastí.
Celkový dopadající tepelný tok (Heat Flux 2) – je okrajová podmínka popisující celkový přenos tepla dodávaného laserovým svazkem ve tvaru $q_{tot} = \text{"výkon laseru"} (W)$. Na obr. 3.5.3 v detailu znázorněno modrou oblastí.
- Vstupní teplota materiálu (Temperature)* – je okrajová podmínka popisující velikost teploty materiálu před kalením v případě, že by byl materiál například již předehříván. V modelu je použita ve tvaru $T_0 = 293,15(K)$, tedy běžné pokojové teploty. Na obr. 3.5.1 znázorněno zelenou oblastí.
- Teplotní izolace (Thermal insulation)* – Na obr. 3.5.2 znázorněno žlutou oblastí.
- Outflow* – je okrajová podmínka symetrie, využitá pro popsání teoreticky nekonečně dlouhého modelu – kontinua. Na obr. 3.5.2 znázorněno fialovou oblastí.

3.5.4 Určení fyzikálních parametrů elektromagnetického pole

Definiční oblast pro model elektromagnetického pole, která je znázorněna na obr. 3.6.1, se sestává z oblasti induktoru, stínění induktoru, desky kaleného materiálu a okolní hranicí vzduchu.

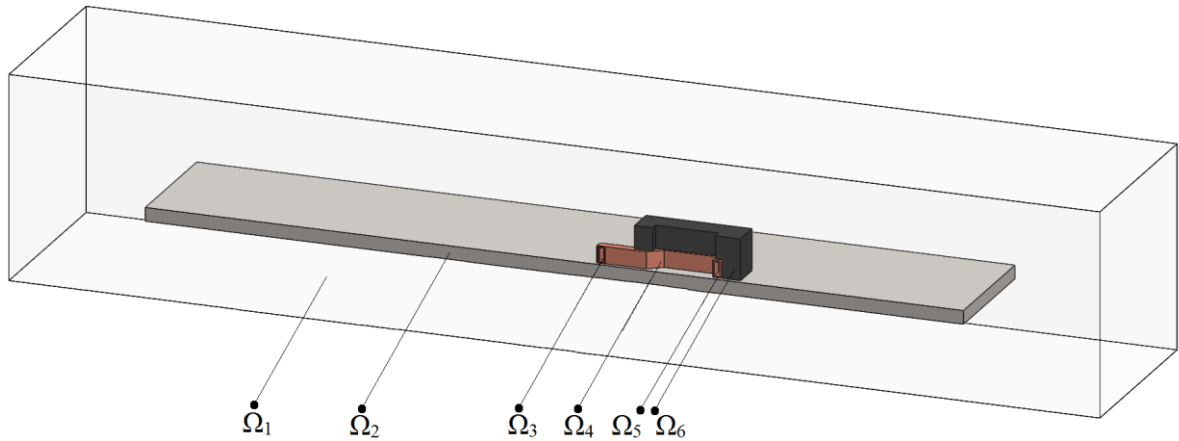


Obr. 3.6 Okrajové podmínky magnetického pole pro posuvný laserový ohřev s indukčním dohřevem

Použité okrajové podmínky pro elektromagnetické pole:

- a) *Dirichletova okrajová podmínka* – Po zavedení umělé hranice, která vymezuje oblast okolního vzduchu je nutné na jejích okrajích předepsat okrajové podmínky. Za předpokladu, že vymezená umělá hranice bude dostatečně vzdálena od magnetického obvodu bude hodnota magnetického vektorového potenciálu A na této hranici rovna nule. Jak je zobrazeno na obr. 3.6.2 tato podmínka platí také na ose symetrie.
- b) *Lumped port* – Nejedná se o okrajovou podmínku, ale o funkci programu CM zobrazenou na obr. 3.6.3, která umožňuje nastavení napájecího proudu induktoru. Pro definici portu je potřeba určit jeho obvod, šířku, elektrický proud a směr, ve kterém je orientován vůči induktoru.

3.5.5 Určení a přiřazení materiálových vlastností



Obr. 3.7 Rozložení materiálových oblastí pro řešený numerický model

Vzduch – relativní permeabilita $\mu_r = 1$
 relativní permitivita $\epsilon_r = 1$
 měrná elektrická vodivost $\gamma = 1$ [S/m]

je definován pro: Ω_1 (umělá hranice okolního prostředí)
 Ω_3 (lumped port)
 Ω_5 (dutá oblast induktoru)

Měď – relativní permeabilita $\mu_r = 1$
 relativní permitivita $\epsilon_r = 1$
 měrná elektrická vodivost $\gamma = 5,98 \cdot 10^7$ [S/m]

je definována pro: Ω_4 (induktor)

Ocel AM-355 relativní permeabilita $\mu_r = 500$
 relativní permitivita $\epsilon_r = 1$

chemické složení: 76,18% Fe, 15,7% Cr, 4,3% Ni, 0,12% C, 2,8% Mo, 0,9% Mn

je definována pro: Ω_2 (deska materiálu)

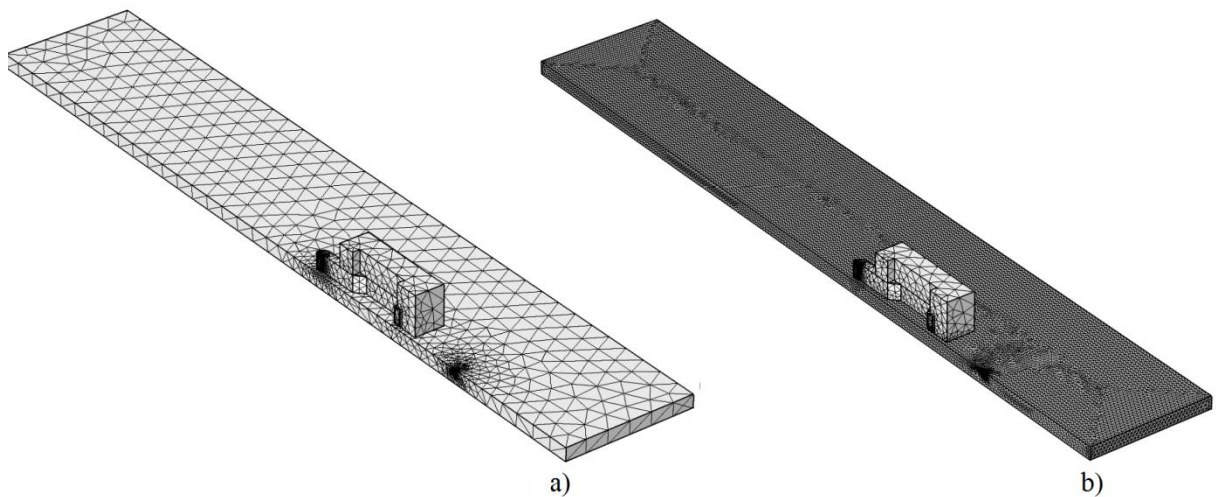
Ferit – relativní permeabilita $\mu_r = 80$
 relativní permitivita $\epsilon_r = 1$
 měrná elektrická vodivost $\gamma = 1$ [S/m]

je definován pro: Ω_6 (stínění induktoru)

3.5.6 Vytvoření výpočetní sítě a konvergence řešení

Při numerickém řešení matematického modelu je pro obdržení přesného řešení nutné vytvořit výpočetní síť s vhodnou hustotou elementů. Ukazatelem zjemnění výpočetní sítě jsou tzv. degrees of freedom (DOFs), neboli stupně volnosti. Platí, že čím vyšší počet stupňů volnosti, tím se zvyšuje náročnost na výpočetní kapacitu modelu a tedy prodlužuje i čas jeho řešení. Zjemnění výpočetní sítě se musí tedy provádět pouze v těch oblastech, ve kterých je daný fyzikální problém řešen.

Pro mnou navrhovaný model posuvného laserového ohřevu s indukčním dohřevem se jednalo o oblast desky materiálu a oblast dopadu laserového svazku na desku. Na obr. 3.8 je vidět rozdíl mezi výpočetní sítí s malým počtem DOFs (obr. 3.8.a) a výpočetní sítí se zjemněním v oblasti desky (obr. 3.8.b).



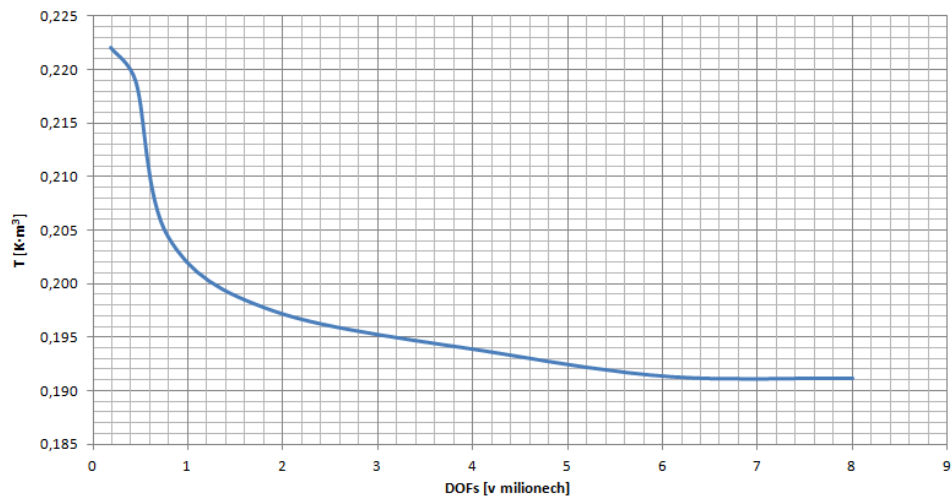
Obr. 3.8 Porovnání zjemnění výpočetní sítě numerického modelu

V tab. 3.1 jsou uvedeny hodnoty počtů stupňů volnosti $DOFs$, teploty T , Jouleovy ztráty P_j a doba výpočtu modelu t . Z hodnot je patrné, že řešení konverguje ke správnému matematickému řešení v oblasti hodnot $DOFs$ 6 milionů a více. Zároveň je ale očividný nárůst doby výpočtu, který se pro takto vysoké počty stupňů volnosti pohybuje v řádech desítek hodin a s tím spojené nároky na výpočetní kapacitu.

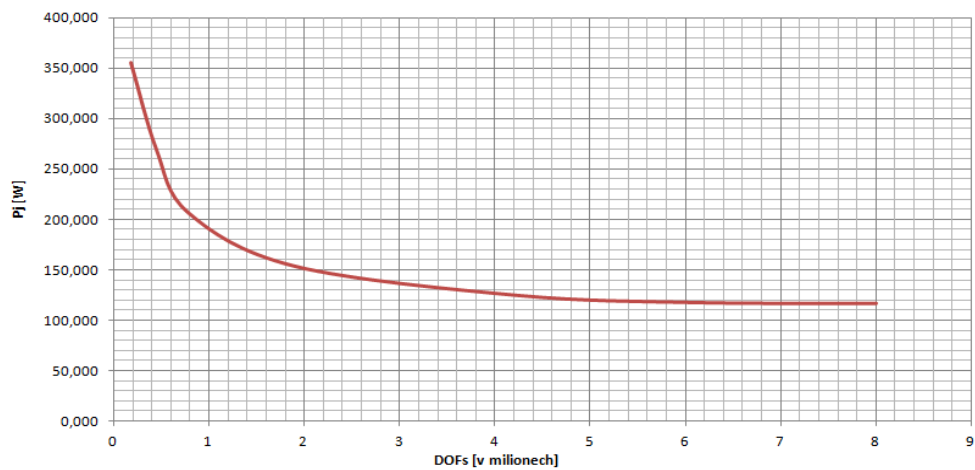
Právě z důvodů omezené výpočetní kapacity nebylo možné stanovit úplně přesnou hodnotu pro správné matematické řešení modelu, jelikož pro hodnoty přesahující 10 milionů $DOFs$ nedokázal PC (univerzitní výpočetní cluster) nalézt řešení. Na obr. 3.9 a 3.10 je vidět závislost hodnoty vypočítaných integrálních veličin na počtu stupňů volnosti.

DOFs [miliony]	T [K·m ³]	P _j [W]	t [h]
0,185	0,2221	355,682	0,5
0,45	0,21888	270,169	2
0,79	0,20436	206,587	5
1,9	0,19742	153,847	8,5
4,25	0,19349	124,744	17
6,1	0,19126	117,668	23
8	0,19113	116,883	29
10	-	-	-

Tab. 3.1 Konvergence výsledků



Obr. 3.9 Závislost numerického řešení teploty na počtu stupňů volnosti

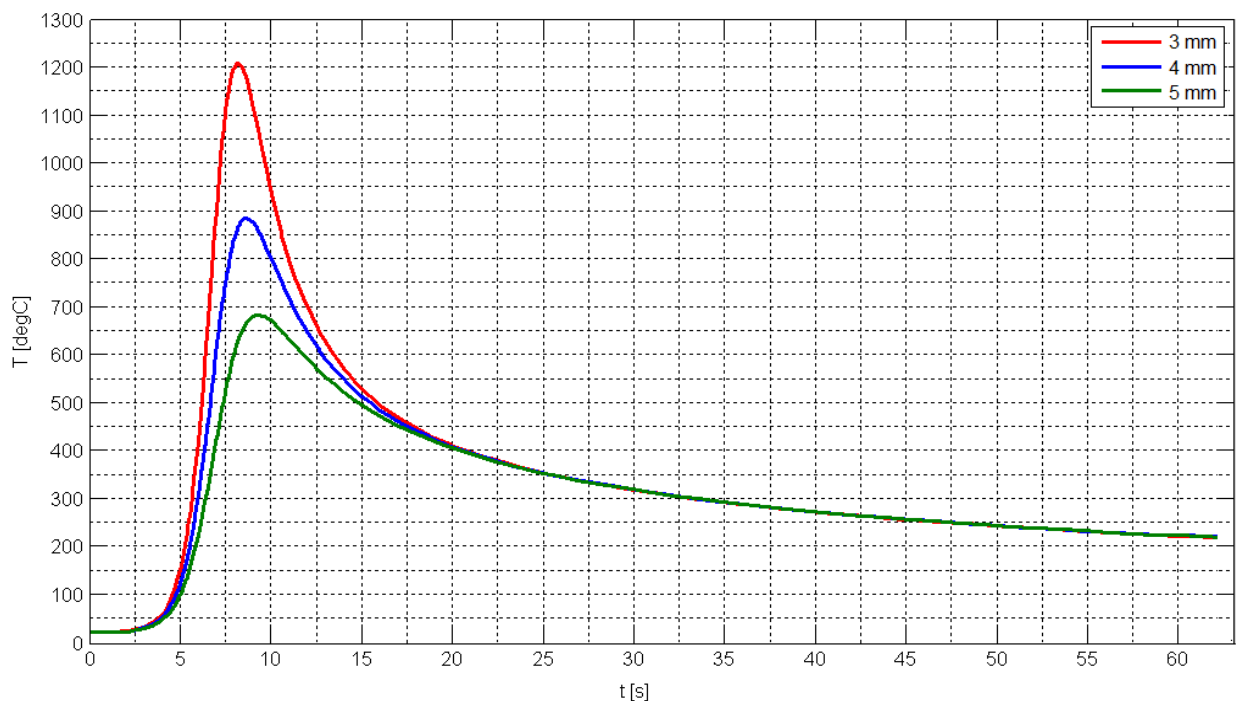


Obr. 3.10 Závislost numerického řešení velikosti činných ztrát na počtu stupňů volnosti

3.6 Výsledky numerického modelu pro laserové kalení

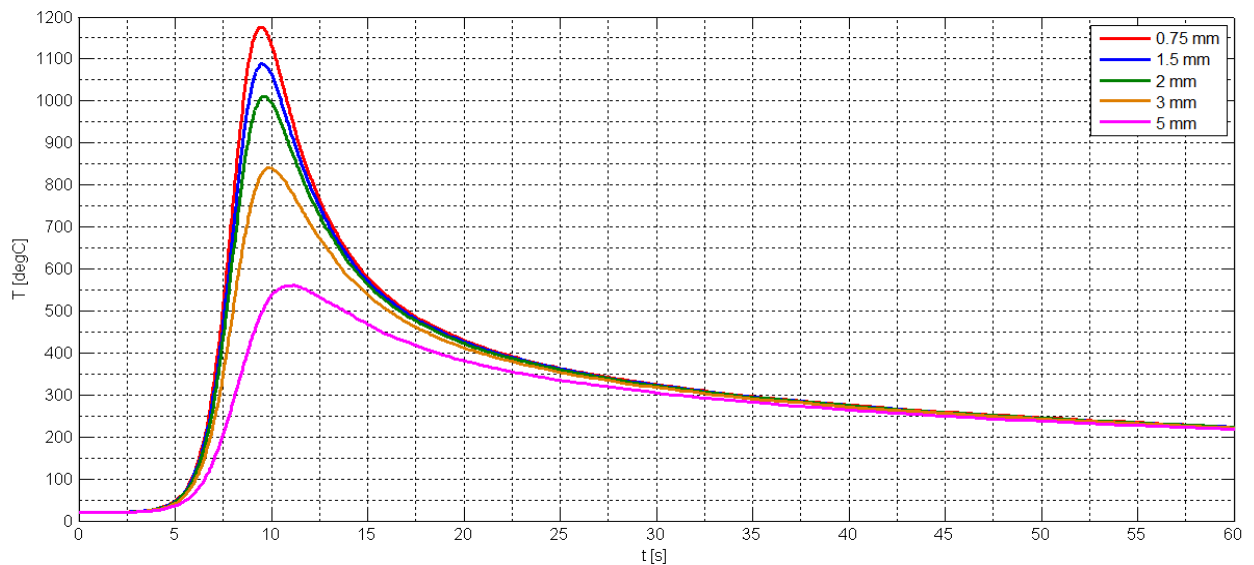
Numerický model měl následující parametry:

- laser měl kruhový profil s poloměrem $r = 1,5 \text{ mm}$
- rychlost pohybu laserové hlavice je $v = 2 \text{ mm/s}$
- výkon laseru $p = 550 \text{ W}$
- součinitel přenosu tepla prouděním $\alpha = 5$ (přirozená konvekce)
- emisivita materiálu $\varepsilon = 0,5$
- teplota okolí $T_{ext} = 293,15 \text{ K}$, vstupní teplota materiálu $T_0 = 293,15 \text{ K}$
- kalení materiál – ocel AM-355



Obr. 3.11 Hloubka prokalení laserového kalení s výkonem 550W a rychlostí posuvu 2 mm/s

Na obr. 3.11 je zobrazen průběh hloubky prokalení po laserovém povrchovém kalení. Obecně se hloubka prokalení v technické praxi pro laserové kalení pohybuje v rozmezí od 2 do 3 mm a teplota při které se materiál zakalí v rozmezí od 1000 °C do 1200 °C. Jak je z obr. 3.11 vidět v hloubce 3 mm dosahuje teplota hraničních 1200 °C a materiál tam bude zcela jistě zakalen, v hloubce 4 mm je dosažená teplota podstatně nižší, přibližně 870 °C a k zakalení již nedojde.



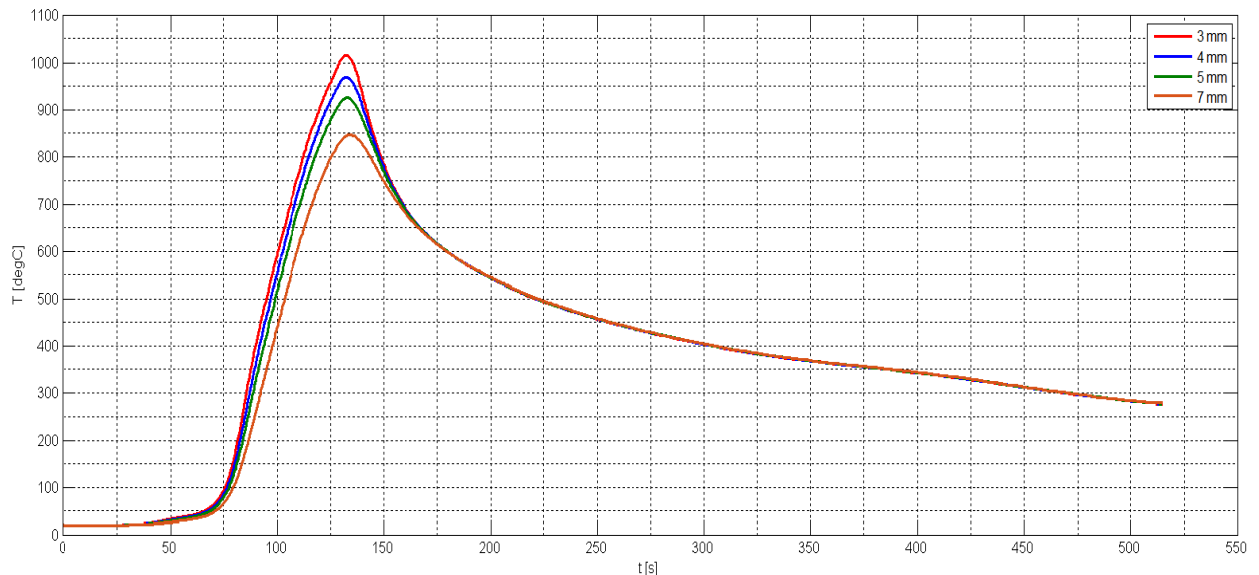
Obr. 3.12 Zakalená plocha při laserovém kalení s výkonem 550W a rychlostí posuvu 2 mm/s

Na obr. 3.12 jsou znázorněny průběhy teploty v závislosti na čase ve vzdálenosti od středu dopadajícího laserového svazku v hloubce 3 mm. Řešený laserový svazek měl poloměr 1,5 mm z obr. 3.12 je tedy patrné, že červený a modrý průběh zasahují stále ještě přímo do oblasti dopadajícího paprsku a teplota v těchto bodech bude dostatečná pro zakalení materiálu. Pokud bychom uvažovali teplotu 1000 °C jako minimální teplotu potřebnou pro zakalení, tak ve vzdálenosti 2 mm od středu dopadajícího paprsku, tedy 0,5mm od jeho kraje dosáhne teplota ještě dostatečné hodnoty pro jeho zakalení. Ve vzdálenosti větší již teplota rychle klesá a k zakalení nedojde. Tepelně ovlivněná oblast, ve které dojde k zakalení je tedy velice malá.

3.7 Výsledky numerického modelu pro indukční kalení

Numerický model měl následující parametry:

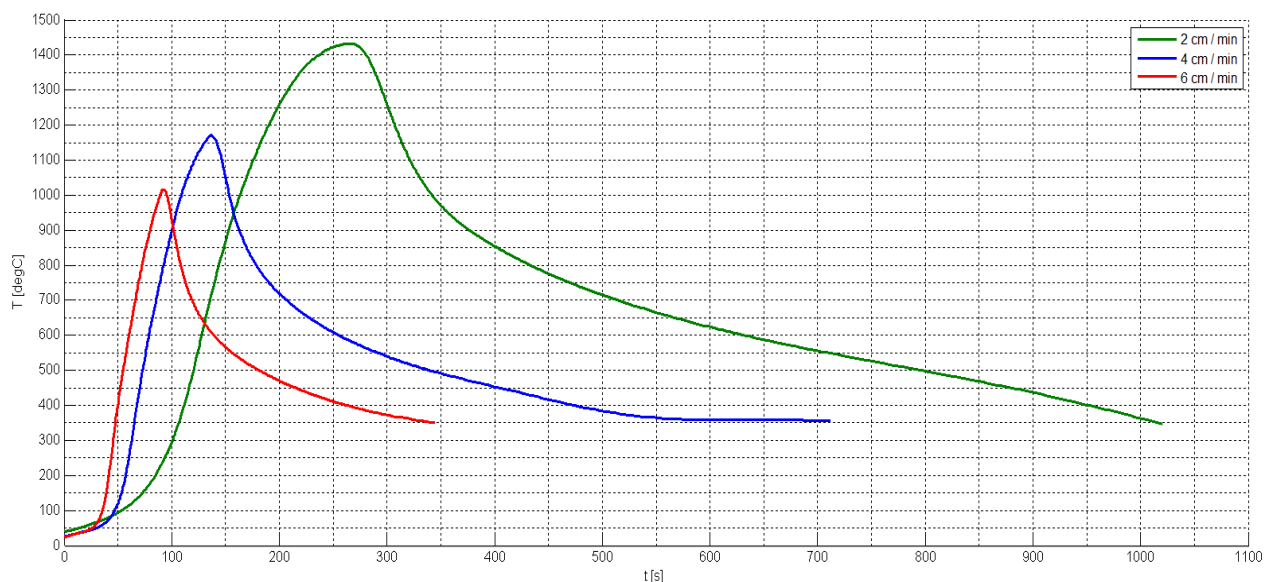
- rychlost pohybu induktoru $v = 1 \text{ mm/s}$
- napájecí proud induktoru $I = 1660 \text{ A}$
- frekvence zdroje $f = 50 \text{ kHz}$
- součinitel přenosu tepla prouděním $\alpha = 5$ (přirozená konvekce)
- emisivita materiálu $\varepsilon = 0,5$
- teplota okolí $T_{ext} = 293,15 \text{ K}$, vstupní teplota materiálu $T_0 = 293,15 \text{ K}$
- velikost vzduchové mezery byla 1 mm
- kalený materiál – ocel AM-355



Obr. 3.13 Hloubka prokalení pro indukční kalení při frekvenci 50 kHz, proudu 1660 A a rychlosti posuvu 1 mm/s

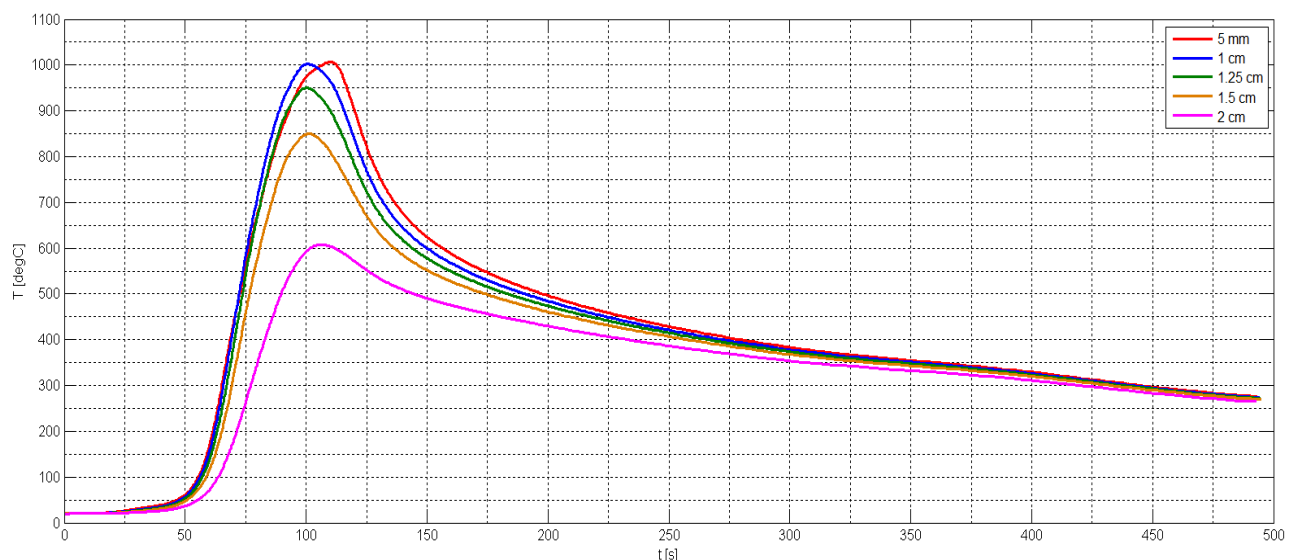
Na obr. 3.13 je znázorněna hloubka prokalení po indukčním povrchovém kalení. Z grafu je vidět, že pro dosažení teploty potřebné pro zakalení je nutný mnohem delší časový úsek, než pro laserový ohřev materiálu. Z toho vyplývá, že i chlazení materiálu trvá delší dobu, což má vliv na výslednou tvrdost materiálu. Velikost dosažené teploty lze ovlivnit několika následujícími způsoby.

Tvarem induktoru (navrhovaný induktor byl kreslen tak, aby odpovídal induktoru používanému v provozu společnosti MATEX PM s.r.o), zvýšením proudu induktoru či frekvence zdroje, nebo rychlostí posuvu induktoru nad kaleným materiálem. Závislost velikosti dosažené teploty na rychlosti posuvu je zobrazena na obr. 3.14.



Obr. 3.14 Závislost velikosti dosažené teploty na rychlosti pohybu induktoru při indukčním kalení

Jak je vidět z obr. 3.14 při stejných parametrech induktoru a zdroje, lze regulací rychlosti posuvu dosáhnout velkého navýšení dosažené teploty. Rozdíl v dosažené teplotě v hloubce materiálu 3 mm mezi rychlostí posuvu 6 cm/min a 2cm/min je více než 400°C, avšak za cenu snížení kalící rychlosti materiálu na třetinu. Naopak v případě, že jsme schopni dodat ze zdroje vyšší frekvenci nebo elektrický proud, lze rychlost ohřevu zvýšit. Indukční ohřev je tedy velmi dobře regulovatelný proces.



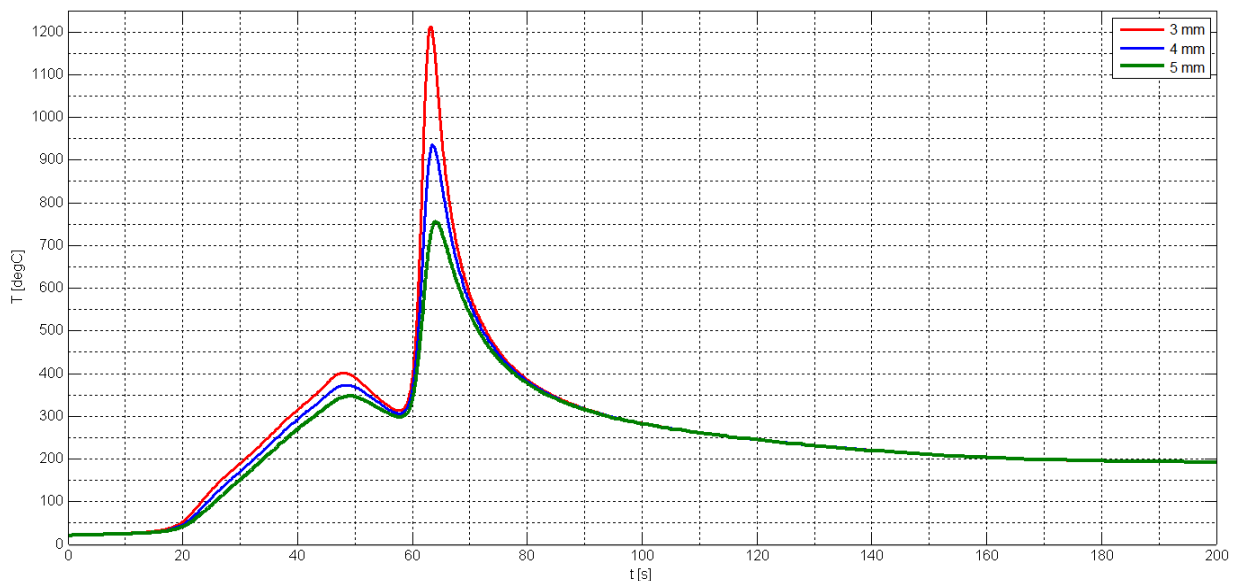
Obr. 3.15 Zakalená plocha při indukčním kalení při frekvenci 50 kHz, proudu 1660 A a rychlosti posuvu 1 mm/s

Plochu zakalené oblasti po indukčním kalení znázorňuje obr. 3.15. Jednotlivé křivky popisují teplotní průběh v závislosti na čase pro hloubku 3mm v uvedené vzdálenosti od osy symetrie modelu. Z hodnot je patrné, že velikost zakalené plochy je přibližně 5-6x větší než pro laserové kalení, ale zároveň za časový úsek 10x delší.

3.8 Výsledky numerického modelu pro laserové kalení s indukčním přehřevem

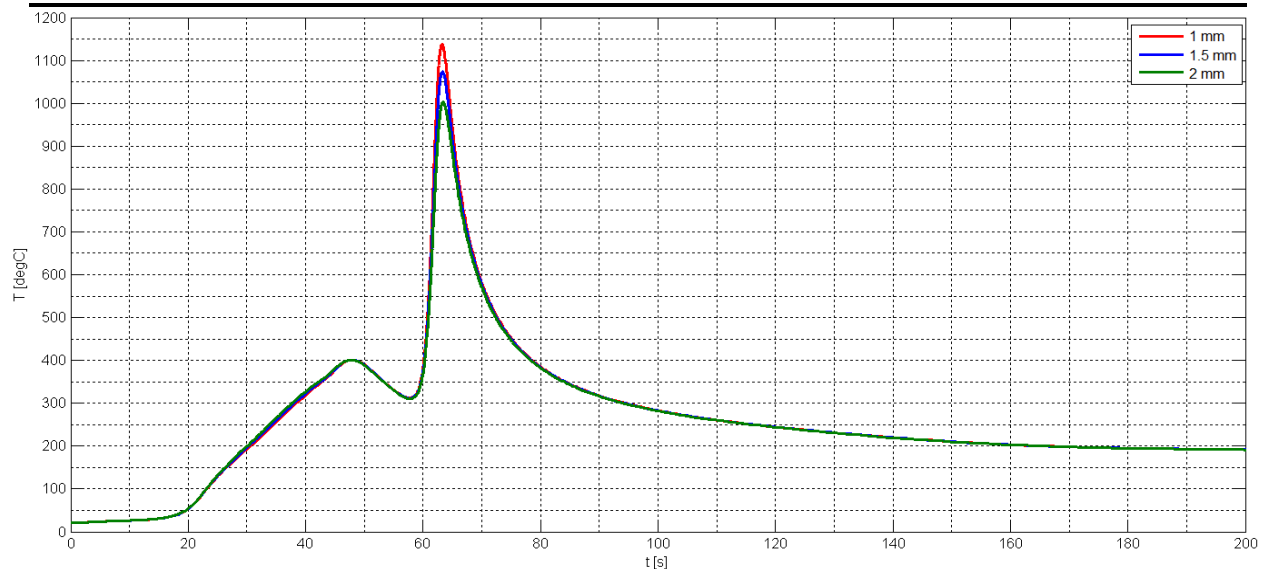
Numerický model měl následující parametry:

- rychlost pohybu $v = 2 \text{ mm/s}$
- napájecí proud induktoru $I = 1660 \text{ A}$
- frekvence zdroje $f = 30 \text{ kHz}$
- laser měl kruhový profil s poloměrem $r = 1,5 \text{ mm}$
- výkon laseru $p = 450 \text{ W}$
- součinitel přenosu tepla prouděním $\alpha = 5$ (přirozená konvekce)
- emisivita materiálu $\varepsilon = 0,5$
- teplota okolí $T_{ext} = 293,15 \text{ K}$, vstupní teplota materiálu $T_0 = 293,15 \text{ K}$
- velikost vzduchové mezery byla 1 mm
- kalený materiál – ocel AM-355



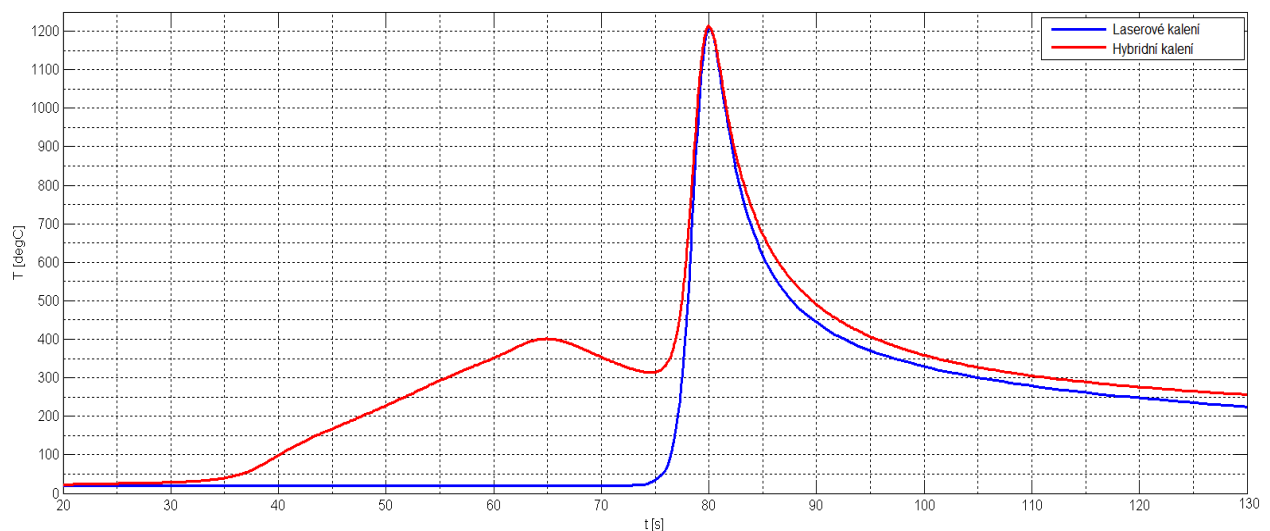
Obr. 3.16 Hloubka prokalení při hybridním kalení – přehřev

Na obr. 3.16 je znázorněna hloubka prokalení při posuvném laserovém kalení s indukčním přehřevem. Z uvedených grafů je zřejmé, že nad materiálem nejdříve prochází induktor, který materiál přehřeje na hodnotu přibližně 400 °C . Poté následuje paprsek výkonového laseru a dochází k zakalení materiálu v hloubce 3 mm . Jak je ze získaných průběhů vidět, hloubka prokalení je srovnatelná s hloubkou prokalení při laserovém kalení uvedenou na obr. 3.11. Rozdílem je použitý jmenovitý výkon laseru. Při hybridním kalení byl nutný výkon pro dosažení stejného výsledku téměř o 20% menší. Energetická úspornost a snížení teplotního gradientu po laserovém kalení je tedy největší výhodou hybridního kalení.



Obr. 3.17 Velikost zakalené oblasti při hybridním kalení – přehřev

Stejně jako hloubka prokalení i velikost zakalené plochy je pro laserové kalení a laserové kalení s indukčním přehřevem srovnatelná a prakticky identická. Indukční přehřev tedy nemá na velikost tepelně ovlivněné oblasti vůbec žádný vliv a proces kalení si zachovává svoji selektivitu tepelně ovlivněné oblasti. Průběhy zobrazené na obr. 3.17 opět odpovídají hloubce 3 mm, v dané vzdálenosti od osy symetrie modelu.



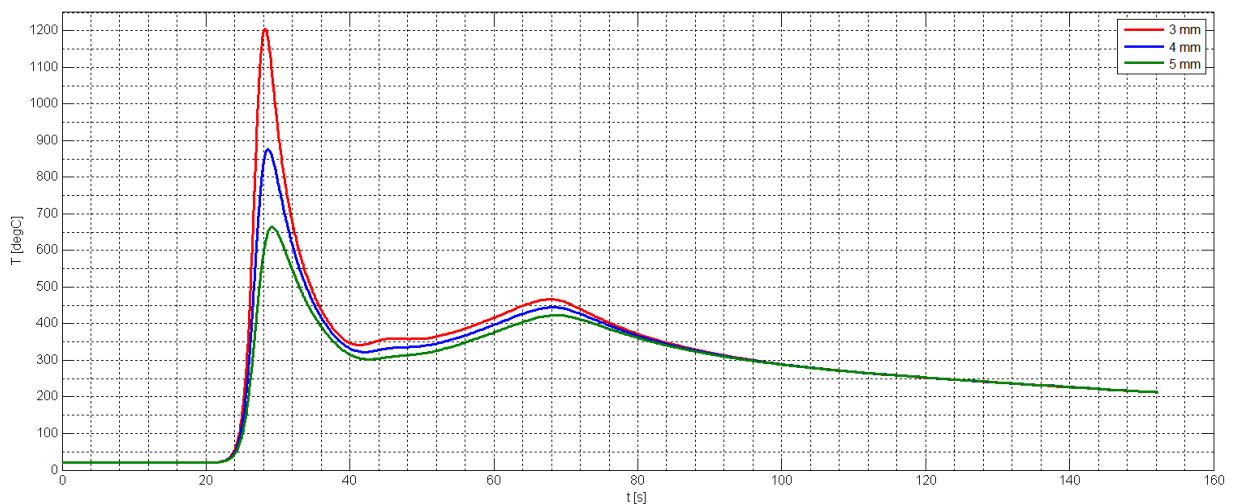
Obr. 3.18 Porovnání laserového kalení se jmenovitým výkonem laseru 550 W a laserového kalení se jmenovitým výkonem 450W a indukčním přehřevem

Vykreslené průběhy na obr. 3.18 odpovídají hloubce 3 mm pro laserové kalení i hybridní kalení. Z grafů lze vyčíst, že v důsledku přehřevu, dochází u hybridního kalení k mírnému prodloužení doby chladnutí materiálu. Tento rozdíl je řádově několik vteřin, ale má za důsledek významné snížení vzniklého teplotního gradientu a s tím spojené omezení vzniku nežádoucích jevů ve struktuře materiálu. Prodloužením doby chladnutí materiálu bude ovlivněna i jeho výsledná tvrdost, která bude dosahovat menších hodnot.

3.9 Výsledky numerického modelu pro laserové kalení s indukčním dohřevem

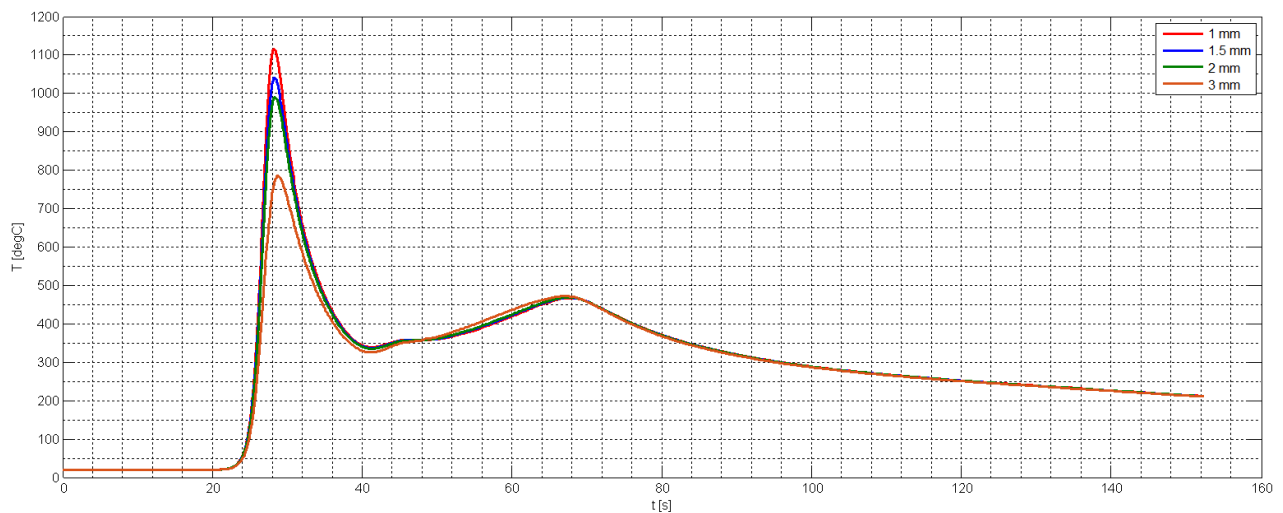
Numerický model měl následující parametry:

- rychlost pohybu $v = 2 \text{ mm/s}$
- napájecí proud induktoru $I = 1660 \text{ A}$
- frekvence zdroje $f = 30 \text{ kHz}$
- laser měl kruhový profil s poloměrem $r = 1,5 \text{ mm}$
- výkon laseru $p = 550 \text{ W}$
- součinitel přenosu tepla prouděním $\alpha = 5$ (přirozená konvekce)
- emisivita materiálu $\varepsilon = 0,5$
- teplota okolí $T_{ext} = 293,15 \text{ K}$, vstupní teplota materiálu $T_0 = 293,15 \text{ K}$
- velikost vzduchové mezery byla 1 mm
- kalený materiál – ocel AM-355



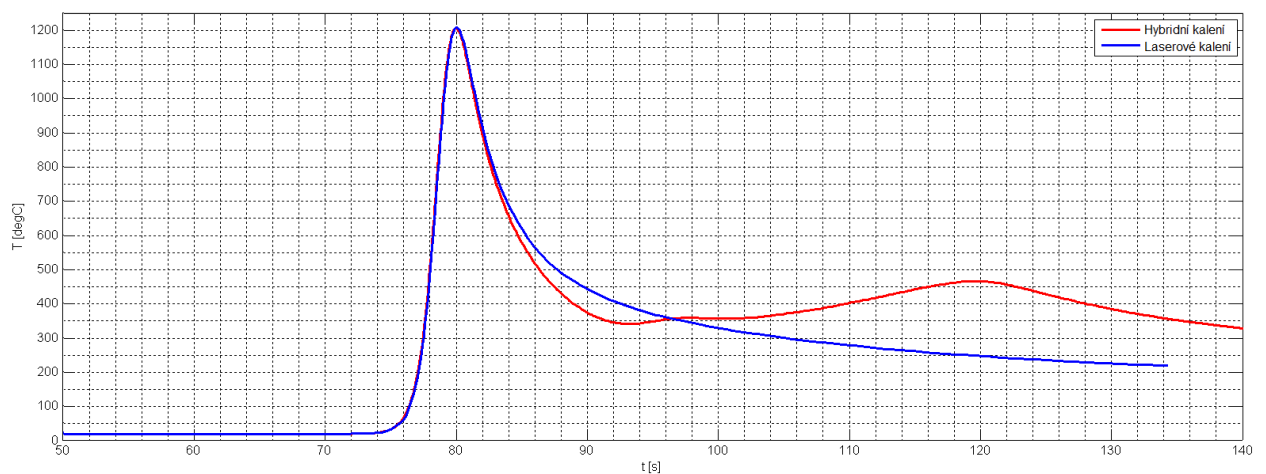
Obr. 3.19 Hloubka prokalení při hybridním kalení – dohřev

Na obr. 3.19 je zobrazena hloubka prokalení pro laserové kalení s indukčním dohřevem, jak je z průběhů vidět, velikost hloubky prokalení je závislá pouze na výkonu použitého laseru, který měl v simulovaném příkladě stejnou hodnotu jako pro laserové kalení, tedy hodnotu 550 W. Vrcholové hodnoty jsou identické jako v případě laserového kalení bez použitého indukčního dohřevu. Důvodem pro použití indukčního dohřevu je stejně jako u indukčního předehřevu snížení velikosti teplotního gradientu, v jehož důsledku může docházet k nežádoucímu zbytkovému pnutí v materiálu a vzniku trhlin.



Obr. 3.20 Velikost zakalené oblasti při hybridním kalení – dohřev

Stejně jako při použití indukčního předehřevu, ani u laserového kalení s indukčním dohřevem nedochází vlivem indukčního ohřevu ke změně velikosti tepelně ovlivněné plochy. K zakalení dojde pouze v malé oblasti v místě, kde dopadá laserový svazek. Obecně tedy pro laserové kalení a laserové kalení s indukčním dohřevem nebo předehřevem platí, že velikost zakalené plochy je dána pouze jmenovitým výkonem laseru a použitým profilem laseru.



Obr. 3.21 Porovnání laserového kalení a laserového kalení s indukčním dohřevem se stejnými jmenovitými výkony laseru 550W

Na obr. 3.21 je zobrazeno porovnání laserového kalení a laserového kalení s indukčním dohřevem pro hloubku 3 mm, se stejným použitým jmenovitým výkonem laseru. Z průběhů je patrný vliv induktoru, který prodlužuje dobu chladnutí materiálu po laserovém kalení a snižuje vzniklý teplotní gradient.

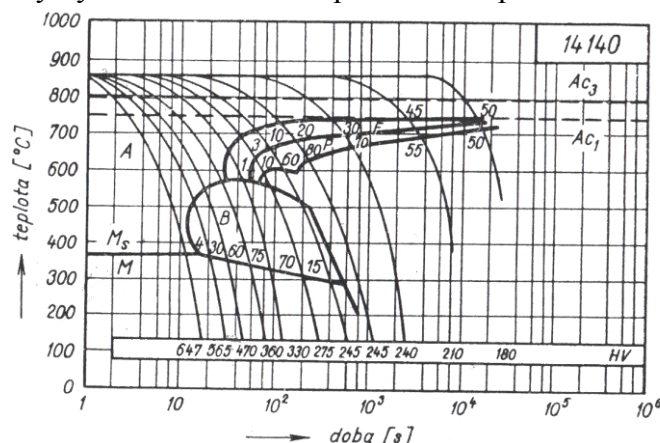
4 Návrh algoritmu pro predikci tvrdosti materiálu

Jelikož velikost hloubky prokalení lze velmi dobře odečíst z grafů nasimulovaných průběhů a její hodnota je porovnatelná pouze po provedení řezem materiálem a vyhotovení metalurgických zkoušek, zaměřil jsem svůj navrhovaný algoritmus na predikci tvrdosti, kterou lze z nasimulovaných dat porovnat s tabulkovými hodnotami.

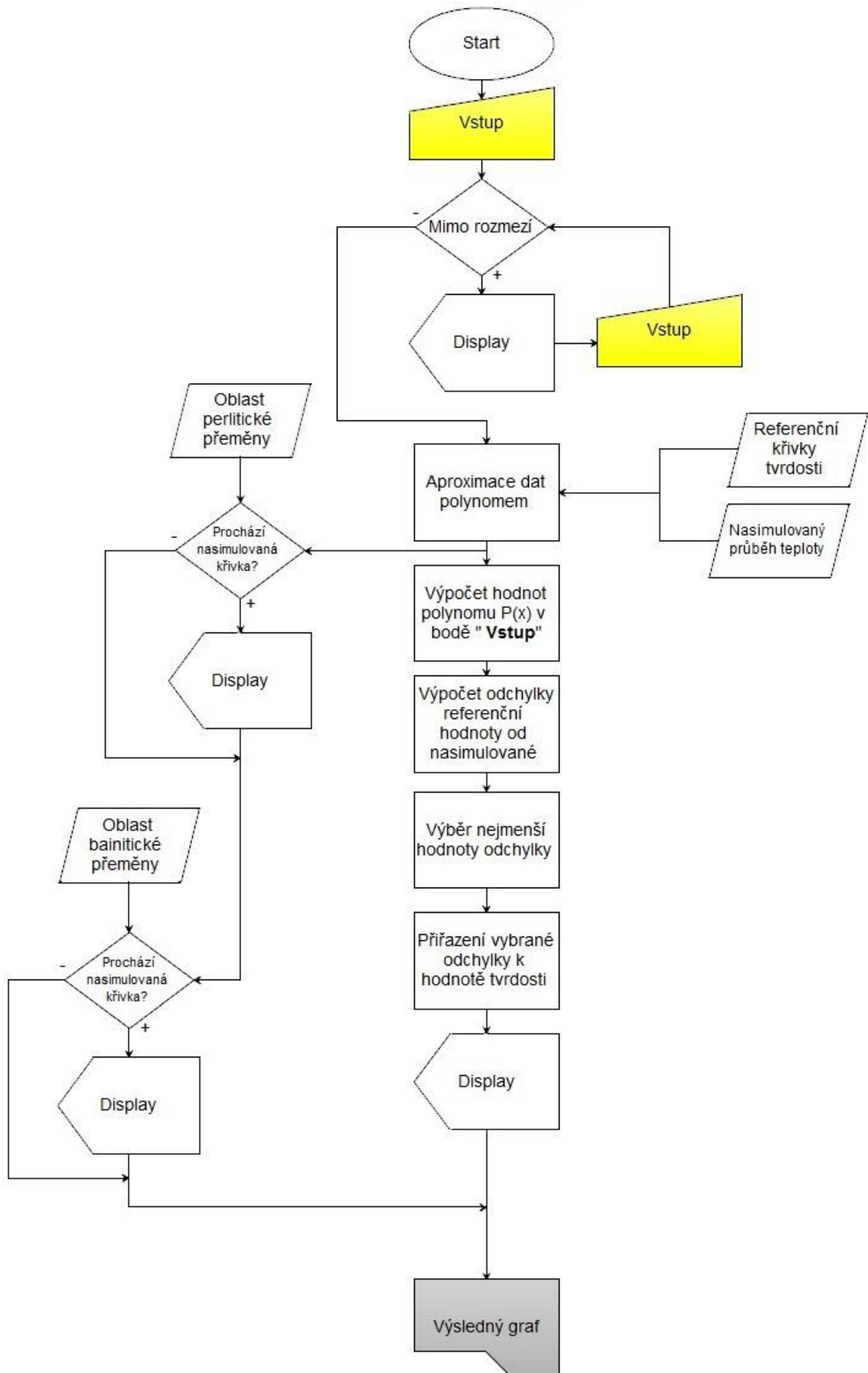
Algoritmus pro predikci tvrdosti materiálu byl vytvářen v programu MATLAB[®], který jsem zvolil z důvodu, že prostředí CM umožňuje v rámci služby LiveLink[™] propojení s MATLAB[®] a lze přímo přistupovat k výsledkům simulace. Možným úkolem do budoucna je toto spojení realizovat. Základ algoritmu tvoří referenční hodnoty pro křivky tvrdosti, které jsou dostupné například ve strojírenských tabulkách a data nasimulovaného průběhu, který byl získán pomocí programu CM. Zdrojový kód algoritmu je součástí přílohy A.

Prvním problémem při tvorbě algoritmu bylo vytvoření databáze s referenčními průběhy, které prakticky neexistují v žádné volně šiřitelné digitální podobě tak, aby bylo možné je použít jako data v prostředí MATLAB[®]. Křivky tvrdosti materiálu mají navíc pro každý druh materiálu unikátní průběh, nelze tedy vytvořit univerzální algoritmus, který bude generovat správné výsledky pro všechny zadané průběhy. V praxi by se tedy musela vytvořit obsáhlá knihovna s jednotlivými typy materiálů a jejich zpracování, nebo pouze vybrané typy např. ocelí, které daná firma využívá ve výrobě. Pro svůj algoritmus jsem použil dostupné křivky tvrdosti pro indukční kalení oceli 14 140, protože svým složením se nejvíce blíží oceli AM-S355, použité ve výpočtech numerického modelu.

Druhým problémem je fakt, že oblast dat vstupní nasimulované křivky musí být posunuta v čase tak, aby odpovídala referenčním křivkám. Průběh by měl tedy začínat v čase jedné vteřiny a v hodnotě od 0 do 1000 °C. Pro ukázkový příklad průběhu algoritmu jsem zvolil hodnoty průběhu pro indukční kalení s parametry $I_{induktoru} = 1660 \text{ A}$, $f_{zdroje} = 50 \text{ kHz}$ a $v_{posuvu} = 6 \text{ cm/min}$, který byl také znázorněn v předchozí kapitole.

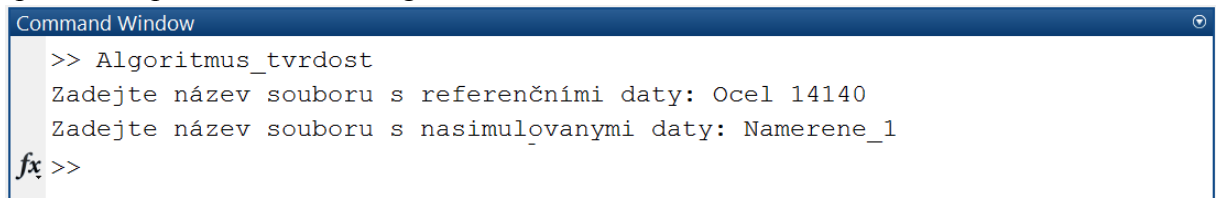


Obr. 4.1 Křivky tvrdosti pro indukční kalení oceli 14 140 (převzato z [38])



Obr. 4.2 Vývojový diagram algoritmu pro predikci tvrdosti

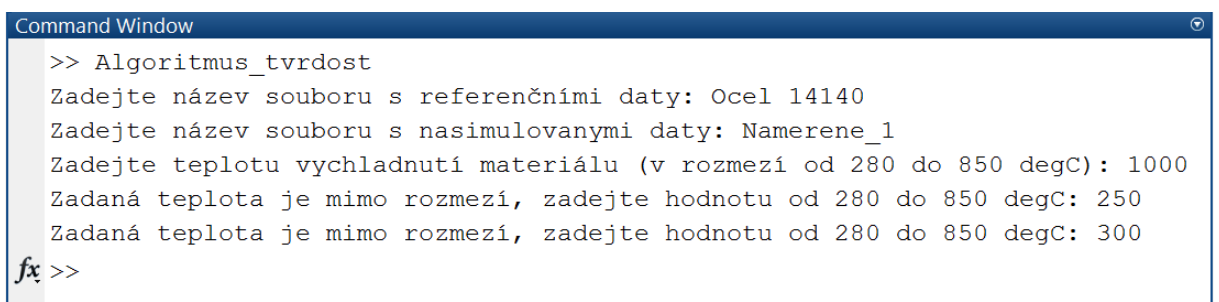
V prvním kroku algoritmu dojde k výzvě uživatele, k zadání názvů souborů se vstupními daty referenčních křivek tvrdosti a naměřenými daty. Tato data se načtou do prostředí určeného pro proměnné tzv. workspace. Pokud by byl v technické praxi podobný algoritmus využíván, bylo by nezbytné, aby proměnné ve vstupních datech měli přesně definované názvy pro jednotlivé proměnné tak, aby po jejich načtení došlo i k jejich správnému přiřazení v rámci algoritmu.



```
Command Window
>> Algoritmus_tvrдост
Zadejte název souboru s referenčními daty: Ocel 14140
Zadejte název souboru s nasimulovanými daty: Namerene_1
fx >>
```

Obr. 4.3 První krok algoritmu

Ve chvíli, kdy jsou všechny proměnné načteny, se algoritmus uživatele zeptá, který bod v naměřené křivce chce zvolit jako vychladnutou teplotu, tedy bod ze kterého se bude určovat tvrdost materiálu po tepelném zpracování. Tento krok je podmíněn zadáním teploty v takovém rozsahu, ve kterém jsou jednak referenční křivky a jednak naměřený průběh získaný např. z CM. Pokud je tedy zadaná hodnota teploty mimo stanovené rozmezí, algoritmus požádá uživatele o nový vstup do té chvíle, než je podmínka splněna.



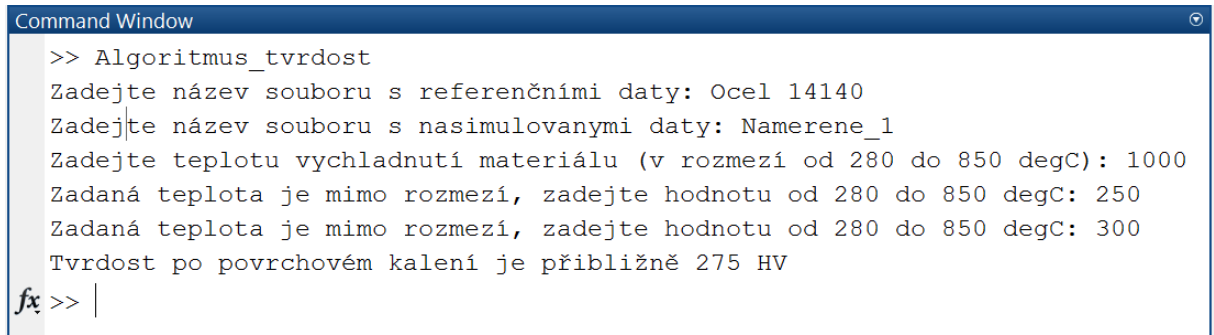
```
Command Window
>> Algoritmus_tvrдост
Zadejte název souboru s referenčními daty: Ocel 14140
Zadejte název souboru s nasimulovanými daty: Namerene_1
Zadejte teplotu vychladnutí materiálu (v rozmezí od 280 do 850 degC): 1000
Zadaná teplota je mimo rozmezí, zadejte hodnotu od 280 do 850 degC: 250
Zadaná teplota je mimo rozmezí, zadejte hodnotu od 280 do 850 degC: 300
fx >>
```

Obr. 4.4 Druhý krok algoritmu

Po zadání teploty, která splňuje podmínku pro stanovené rozmezí, algoritmus aproximuje zadaná data pomocí funkce *polyfit*, která je dána jako $p = \text{polyfit}(x,y,n)$, kde x je vektor hodnot nezávislé proměnné, y je vektor závislé proměnné a n je stupeň polynomu, jímž se budou aproximovat body $[x_i, y_i]$. Volba stupně polynomu je závislá především na fyzikální podstatě problému a na množství dat jednotlivých vektorů. Funkce *polyfit*, využívá k aproximaci metodu nejmenších čtverců, která zjednodušeně hledá takovou křivku, pro kterou je součet ploch čtverců odchylek minimální.

Pro zjištění funkčních hodnot aproximovaného polynomu, v uživateli stanovené vstupní hodnotě, je využita funkce *polyval*, která má funkční předpis $y_p = \text{polyval}(p,x)$, kde p je vektor koeficientů aproximačního polynomu a x je vektor hodnot nezávislé proměnné.

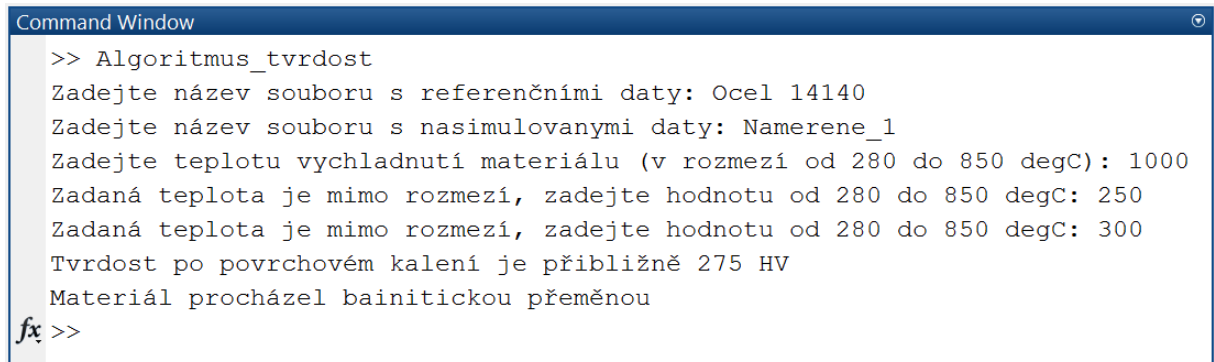
Z vypočítaných hodnot pomocí funkce *polyval* je algoritmem vytvořena odchylka v uživatelem stanoveném bodě na zkoumané křivce od referenčních hodnot křivek tvrdosti. Algoritmus poté vybere nejmenší hodnotu této odchylky, přiřadí hodnotu tvrdosti pro kterou je daná odchylka nejmenší a vypíše informaci zpět uživateli o hodnotě tvrdosti.



```
Command Window
>> Algoritmus_tvrdost
Zadejte název souboru s referenčními daty: Ocel 14140
Zadejte název souboru s nasimulovanými daty: Namerene_1
Zadejte teplotu vychladnutí materiálu (v rozmezí od 280 do 850 degC): 1000
Zadaná teplota je mimo rozmezí, zadejte hodnotu od 280 do 850 degC: 250
Zadaná teplota je mimo rozmezí, zadejte hodnotu od 280 do 850 degC: 300
Tvrdost po povrchovém kalení je přibližně 275 HV
fx >> |
```

Obr. 4.5 Třetí krok algoritmu

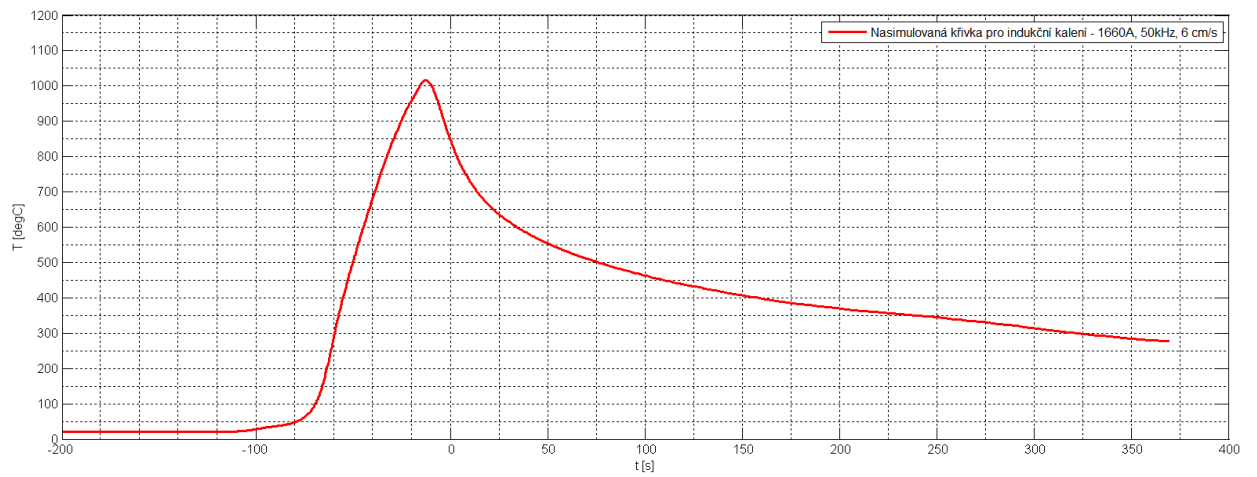
Naměřená křivka je také testována na to, zda její průběh procházel oblastí perlitické, nebo bainitické strukturní přeměny. Jelikož fázové přeměny mají vliv na výsledné vlastnosti materiálu, je informace o nich pro uživatele velmi důležitý parametr. V algoritmu je tento problém řešen pomocí několika kontrolních oblastí pro každou přeměnu zvlášť, kde se testují hodnoty vstupní naměřené křivky. V případě, že se alespoň jedna z testovaných hodnot nachází v dané oblasti, algoritmus vypíše informaci o tom, která oblast to byla zpět uživateli.



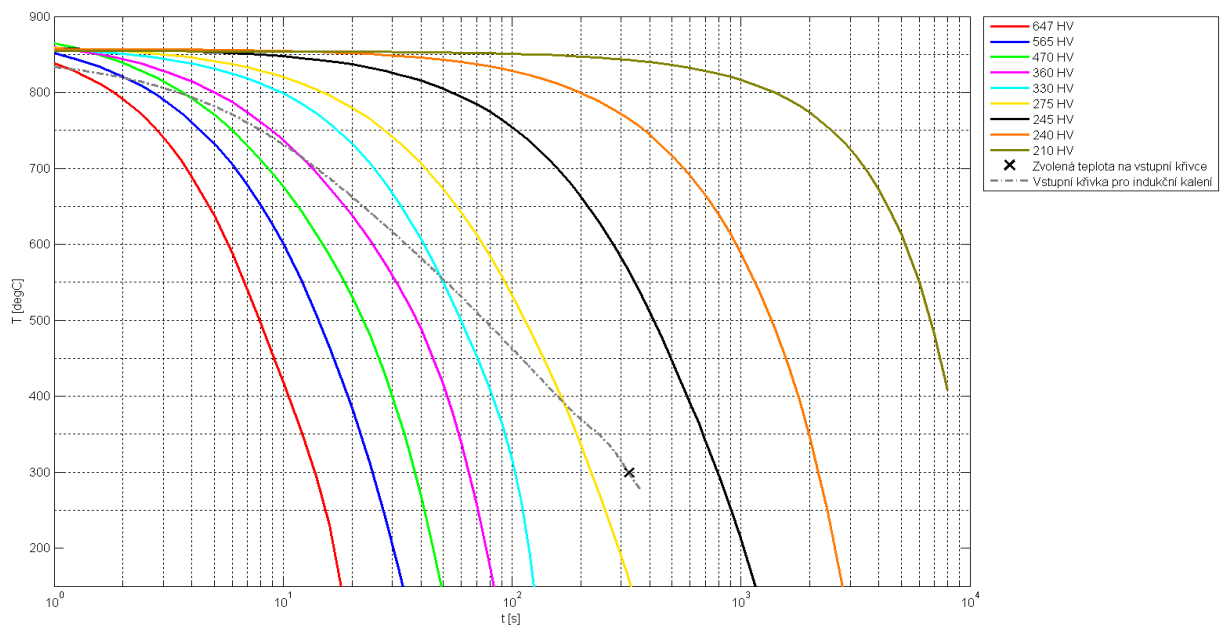
```
Command Window
>> Algoritmus_tvrdost
Zadejte název souboru s referenčními daty: Ocel 14140
Zadejte název souboru s nasimulovanými daty: Namerene_1
Zadejte teplotu vychladnutí materiálu (v rozmezí od 280 do 850 degC): 1000
Zadaná teplota je mimo rozmezí, zadejte hodnotu od 280 do 850 degC: 250
Zadaná teplota je mimo rozmezí, zadejte hodnotu od 280 do 850 degC: 300
Tvrdost po povrchovém kalení je přibližně 275 HV
Materiál procházel bainitickou přeměnou
fx >>
```

Obr. 4.6 Čtvrtý krok algoritmu

V posledním kroku je vykreslen graf obsahující referenční křivky, vstupní nasimulovanou křivku a uživatelem zvolený bod.



Obr. 4.7 Průběh vstupní nasimulované křivky posunuté v čase

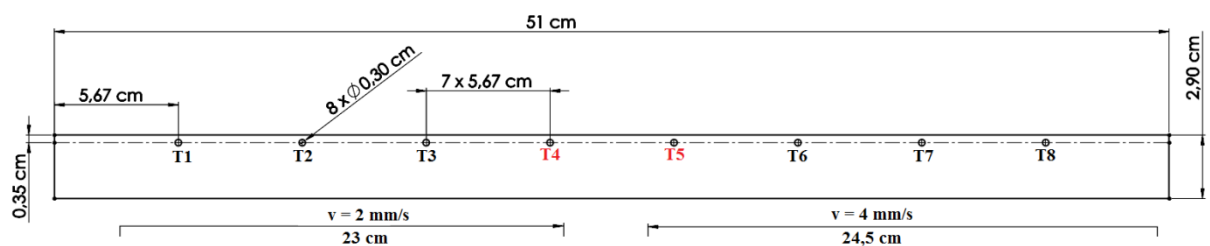


Obr. 4.8 Algoritmicky vykreslený výsledný vykreslený graf s průběhy

5 Srovnání matematického modelu s experimentem

Měření experimentu bylo umožněno díky spolupráci se společností MATEX PM, s.r.o., bohužel v domluveném termínu pro provedení měření společnost využívala induktor v jiné ze svých provozoven, a proto nebylo možné odměřit hodnoty pro laserové kalení s indukčním dohřevem nebo předehřevem, ale pouze pro samotné laserové kalení.

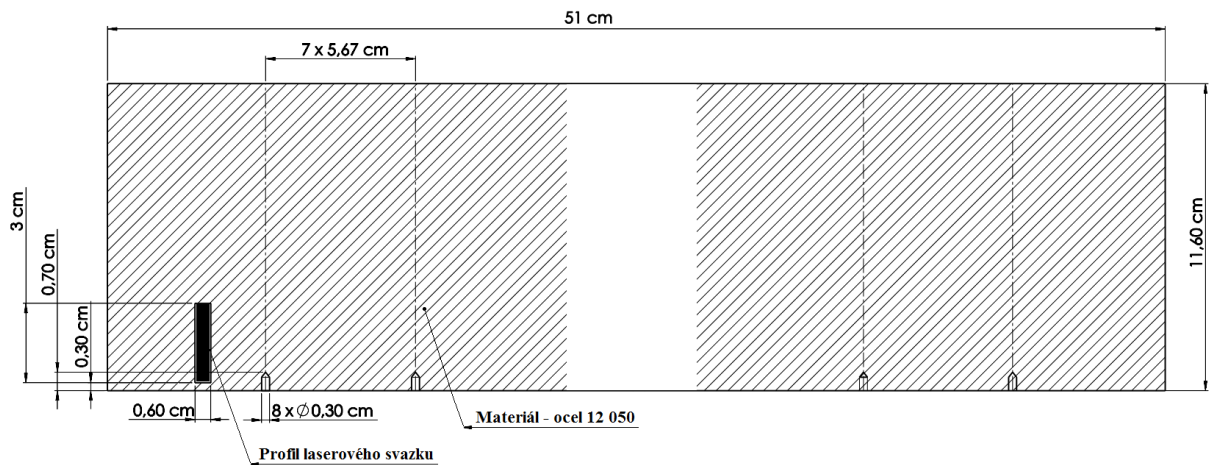
Proces laserového kalení byl prováděn na desce z oceli 12 050 o rozměrech 510 × 116 × 29 mm pomocí výkonového diodového laseru se jmenovitým výkonem 3,3kW. Pro samotné měření byly v hloubce 3,5mm vyvrtány otvory o délce 7 mm sloužící k umístění měřících termočlánků. Právě umístění měřících termočlánků se ukázalo jako největší potencionální problém měření, protože jejich přesné umístění je technicky velmi obtížně realizovatelné. Jelikož kontakty měřících termočlánků jsou navařeny až na samotné dno vyvrtaného otvoru, může při jejich připevňování dojít k nevhodnému umístění na některou ze stěn, nebo posunutí, což má za následek ovlivnění naměřených hodnot. Pro účely mého experimentu bylo zapojeno 8 teplotních sond, z nichž termočlánky T1, T2, T3 a T4 byly využity pro laserové kalení s rychlostí posuvu 2 mm/s a termočlánky T5, T6 a T8 pro rychlost posuvu 4 mm/s. Termočlánek T7 byl v průběhu měření nefunkční. Pro porovnání naměřených hodnot a hodnot nasimulovaných pomocí numerického modelu jsem si vybral vždy termočlánky na konci kalící stopy, tedy termočlánek T4 pro rychlost posuvu 2 mm/s a termočlánek T5 pro rychlost posuvu 4 mm/s.



Obr. 5.1 Umístění měřících termočlánků



Obr. 5.2 Deska s termočlánky před laserovým povrchovým kalením



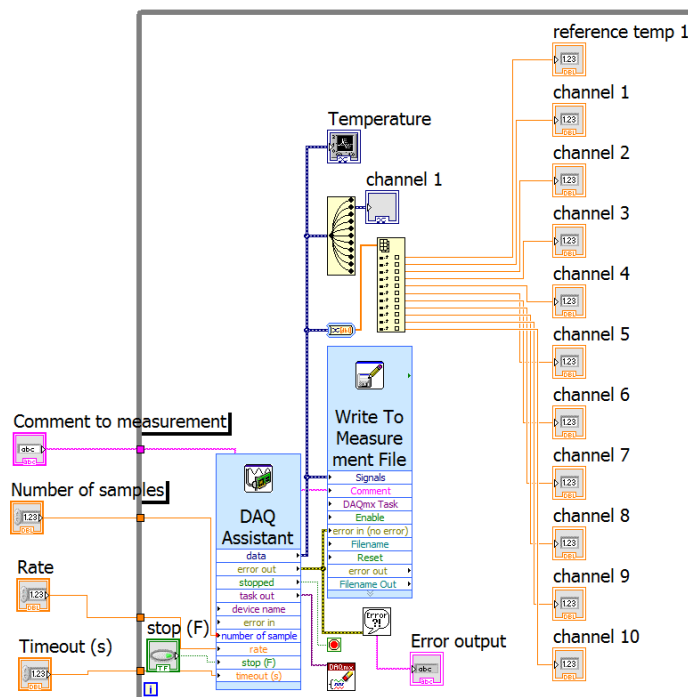
Obr. 5.3 Pohled shora na kalenou desku, rozmístění termočlánků a laserový svazek

Laser použitý při experimentu měl obdélníkový profil s rozměry 30 × 6 mm, začátek kalící stopy byl 3 mm od okraje desky. Povrchová teplota desky při kalení byla udržována pyrometrem na hodnotu 1150 °C (± 10 °C), výkon laseru při rychlosti 2 mm/s byl 62-63% P_n , při rychlosti 4 mm/s se výkon pohyboval v rozmezí 83-85% P_n .

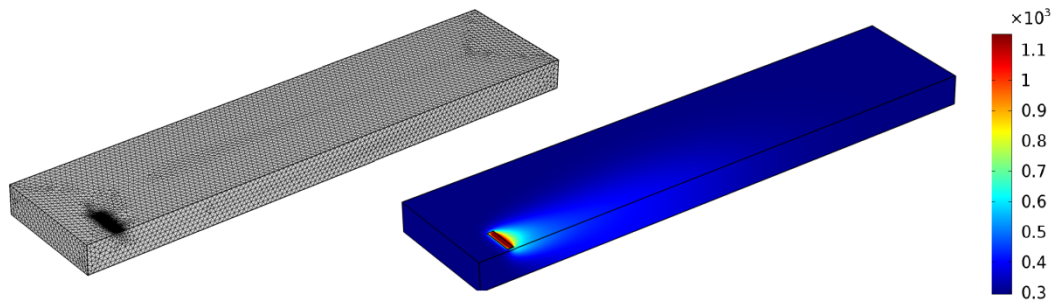
Měřicí software byl nastaven tak, aby zaznamenával deset vzorků za jednu vteřinu. Soubor vybraných naměřených dat je součástí přílohy B.

Použité přístroje:

- program LabVIEW
- výkonový diodový laser se jmenovitým výkonem 3,6 kW
- měřicí 16-ti kanálová karta pro termočlánky NI 9213
- termočlánky typu K
- šasi s datalogem NI cDAQ-9174



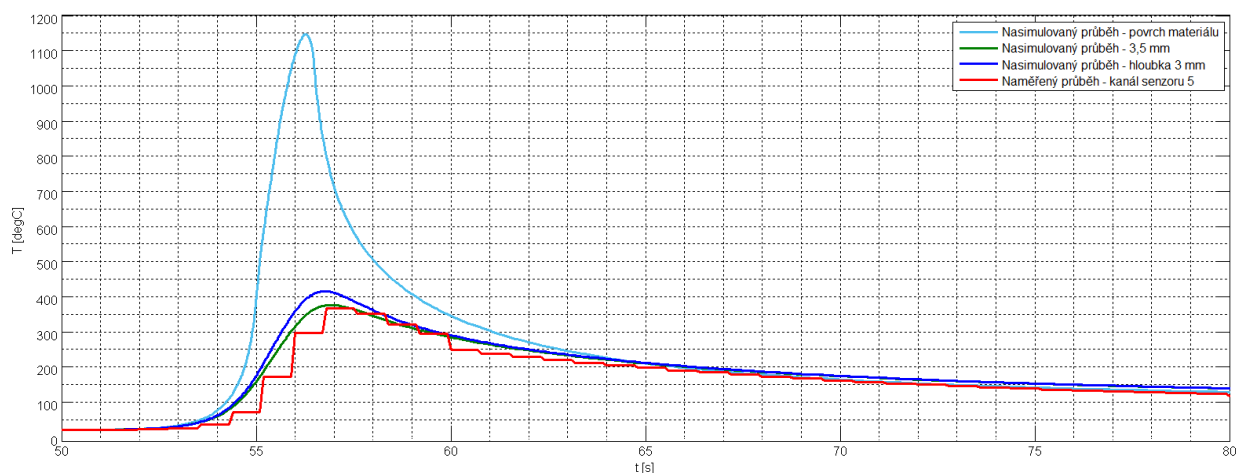
Obr. 5.4 Blokové schéma měřícího software (převzato z [35])



Obr. 5.5 Upravený numerický model pro experiment

Jak je vidět na obr. 5.5, numerický model pro účely porovnání modelu s experimentem byl upraven především v oblasti dopadu laserového svazku, kde bylo nutné reflektovat tvar a rozměry používaného profilu laserového svazku ve společnosti MATEX, PM s.r.o.

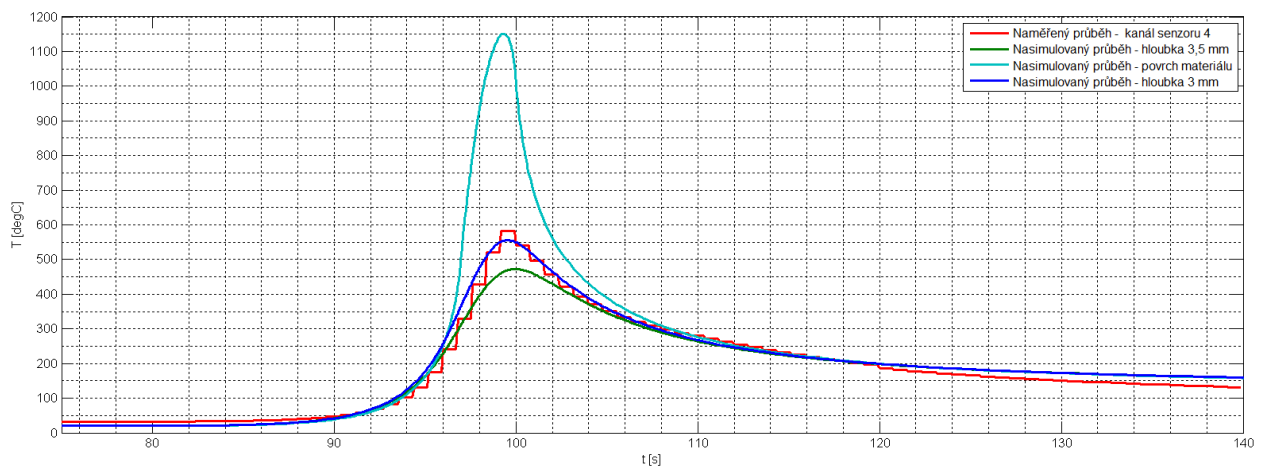
Jako teplota okolí T_{ext} byla použita běžná pokojová teplota 293.15[K], emisivita materiálu $\varepsilon = 0,5$, součinitel přenosu tepla $\alpha = 5$ což odpovídá přirozené konvekci a použitý výkon laseru se odvíjel od použité rychlosti posuvu tak, aby teplota povrchu byla 1150 °C.



Obr. 5.6 Porovnání experimentu a vypočítaných hodnot pro výkon laseru 2160 W a rychlost 4 mm/s

Z obr. 5.6 je vidět, že nasimulované hodnoty se s hodnotami naměřenými prakticky shodují v celé části průběhu teploty. Použitý dopadající výkon laseru pro numerický model byla hodnota 2160 W, při experimentu se výkon nutný pro udržení konstantní teploty 1150 °C na povrchu materiálu pohyboval v rozmezí od 83% do 85% P_n .

Z toho plyne, že nevyužitý (odražený) výkon byl přibližně 645 W, což odpovídá 19,5% dopadajícího výkonu. Odrazivost materiálu byla tedy velmi malá, což je pozitivní jev a zajímavá zpětná informace pro firmu.



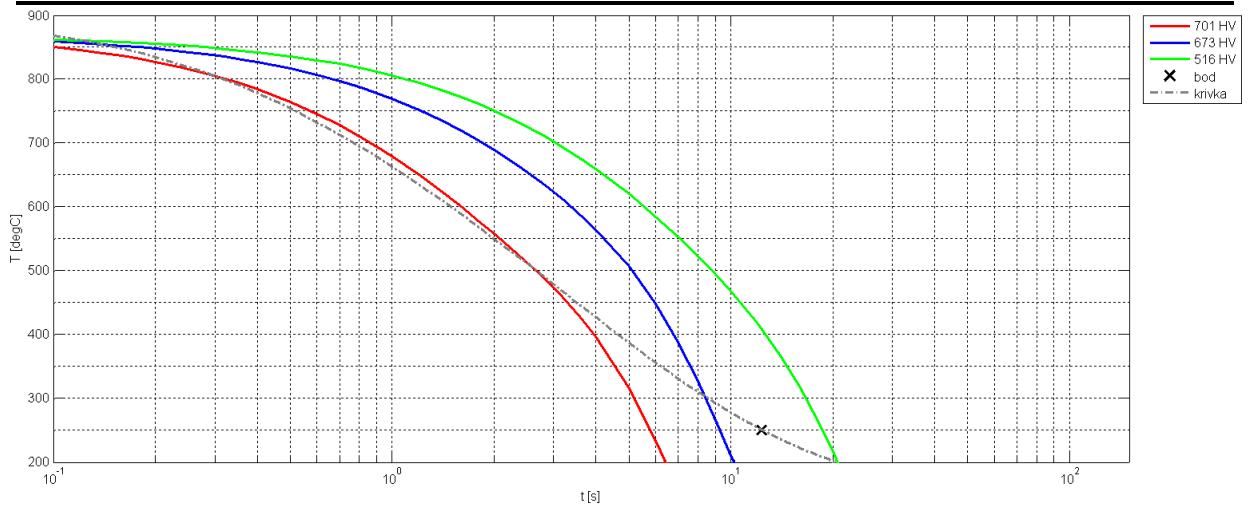
Obr. 5.7 Porovnání experimentu a vypočítaných hodnot pro výkon laseru 1675 W a rychlost 2 mm/s

Na obr. 5.7 je patrné, že nasimulované hodnoty pro rychlost kalení 2 mm/s se s hodnotami zjištěnými pomocí experimentu v hloubce 3,5 mm rozcházejí, tato nesymetrie je pravděpodobně způsobena výše zmíněnými problémy s přesným uchycením termočláčku v měřené hloubce. Nelze tedy s jistotou říct, že senzor byl umístěn přesně v hloubce 3,5 mm a to i z důvodu, že nasimulovaný průběh pro hloubku 3 mm se již velmi blíží hodnotám naměřeným.

Použitý dopadající výkon pro rychlost posuvu 2 mm/s v numerickém modelu byl 1675 W, při experimentu byla opět pyrometrem udržována konstantní povrchová teplota 1150 °C a využití laseru na udržení této teploty bylo v rozmezí 62% až 63% P_n . Nevyužitý (odražený) výkon odpovídá hodnotě 404 W, což je 19,43 % z dopadajícího výkonu laseru.



Obr. 5.8 Průběh laserového kalení při prováděném experimentu pro rychlost 2 mm/s



Obr. 5.9 Výsledné průběhy pro predikci tvrdosti kaleného vzorku s rychlostí posuvu 2 mm/s

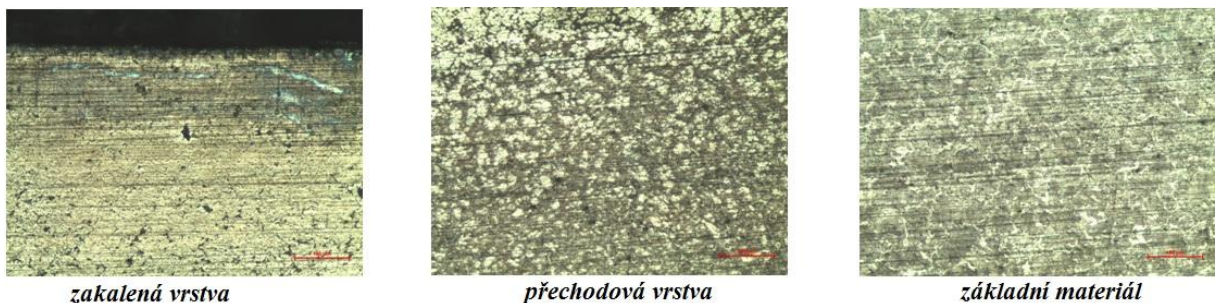
Pro predikci tvrdosti kaleného vzorku jsem využil algoritmus, který byl popsán v kapitole 4. Pro správný odhad, bylo nutné v algoritmu provést změny v oblasti dat referenčních křivek tvrdosti, oblasti perlitické a bainitické strukturní přeměny a omezení velikosti uživatelem zadané teploty podle rozmezí dat křivky získané z numerického modelu. Jako referenční křivky, byly použity průběhy pro tvrdost oceli 12 050. Tyto křivky jsou však primárně určeny pro určení tvrdosti po indukčním kalení, což vnáší do určení hodnoty tvrdosti určitou chybu. Algoritmem přiřazená přibližná hodnota tvrdosti, pro nasimulovanou křivku chlazení povrchu v hloubce 0,1 mm, byla 673 HV. Skutečná přesná hodnota podle průběhů mikrotvrdosti, vyhotovených společností MATEX PM, s.r.o byla v hloubce 0,1 mm pro rychlost kalení 2 mm/s hodnota 678 HV.

```

Command Window
>> Algoritmus_tvrdost_12050
Zadejte teplotu vychladnutí materiálu (v rozmezí od 200 do 850 degC): 250
Tvrdost po povrchovém kalení je přibližně 673 HV
Materiál procházel bainitickou přeměnou
fx >>

```

Obr. 5.10 Předpokládané výsledky zjištěné podle algoritmu pro predikci tvrdosti pro rychlost 2 mm/s

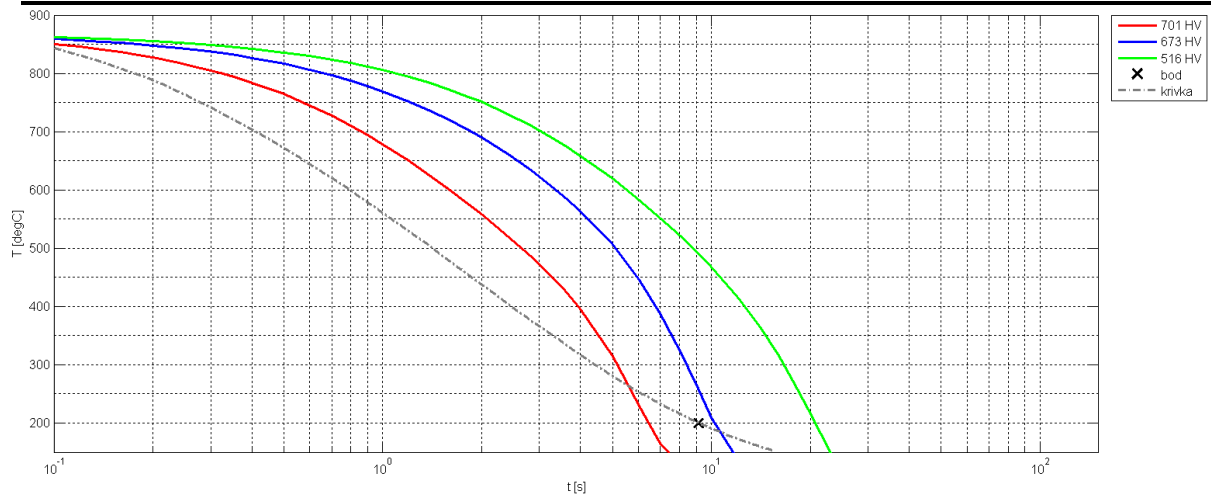


zakalená vrstva

přechodová vrstva

základní materiál

Obr. 5.11 Mikrostruktury měřeného vzorku pro rychlost posuvu laseru rychlostí 2 mm/s



Obr. 5.12 Výsledné průběhy pro predikci tvrdosti kaleného vzorku s rychlostí posuvu 4 mm/s

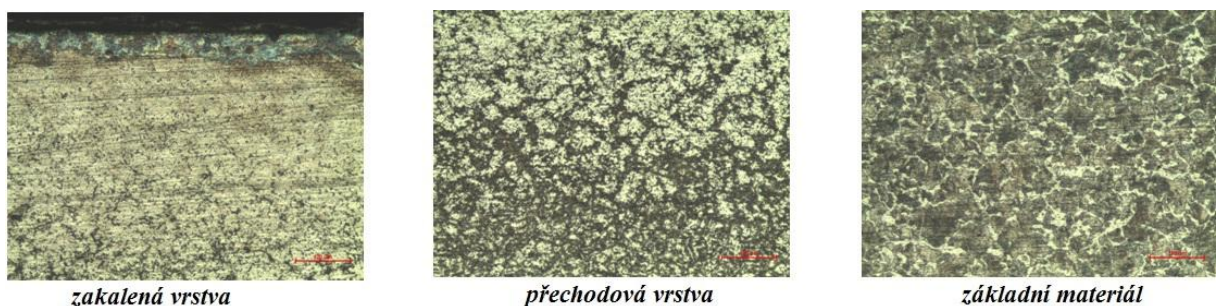
K predikci tvrdosti kaleného vzorku s rychlostí 4 mm/s jsem opět využil výše uvedený upravený algoritmus, jako vstupní křivka byla použita nasimulovaná hodnota pro stejnou rychlost v hloubce 0,1 mm. Pro takto zadaná data, byla algoritmem odhadnuta tvrdost 673 HV. Přestože odhad pro obě měřené hodnoty rychlosti byl stejný, tak při porovnání obou výsledných grafů je patrné, že pro rychlost posuvu laserového svazku 4 mm/s bude skutečná hodnota tvrdosti vyšší, než pro rychlost 2 mm/s. Tento předpoklad potvrzují i průběhy mikrotvrdosti, vyhotovené společností MATEX, PM s.r.o, které pro rychlost kalení 4 mm/s v hloubce materiálu 0,1 mm určily hodnotu tvrdosti 683 HV. Změřené průběhy mikrotvrdosti jsou součástí přílohy C.

```

Command Window
>> Algoritmus_tvrdost_12050
Zadejte teplotu vychladnutí materiálu (v rozmezí od 200 do 850 degC): 200
Tvrdost po povrchovém kalení je přibližně 673 HV
Materiál procházel bainitickou přeměnou
fx >>

```

Obr. 5.13 Předpokládané výsledky zjištěné podle algoritmu pro predikci tvrdosti pro rychlost 4 mm/s



zakalená vrstva

přechodová vrstva

základní materiál

Obr. 5.14 Mikrostruktury měřeného vzorku pro rychlost posuvu laseru rychlostí 4 mm/s

6 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo sestavit matematický model popisující rozložení teplotního pole při posuvném laserovém ohřevu s indukčním dohřevem, získaná data experimentálně ověřit a navrhnout způsob pro predikci tvrdosti a hloubky prokalení.

V úvodu práce byl kladen důraz na využití velkého množství zdrojů a získání dostatečného přehledu v oblasti technologie povrchového kalení. Jelikož se jedná o oblast velmi rozsáhlou, bylo možné uvést jen základní informace.

Matematický model byl definován pomocí aplikace COMSOL Multiphysics[®], která umožňuje výpočet parciálních diferenciálních rovnic a plně respektuje fyzikální děje teplotního a elektromagnetického pole ve sdružené úloze. Celkově bylo vytvořeno pět funkčních samostatných matematických modelů simulujících průběh laserového kalení, indukčního kalení, laserového kalení s indukčním dohřevem nebo předeřevem a upravený model laserového kalení pro účely experimentu ve společnosti MATEX PM, s.r.o. Porovnávanými veličinami v závislosti na vstupních parametrech byly hloubka prokalení a velikost zakalené oblasti. Hodnota tvrdosti pak byla definována podle navrženého algoritmu v závislosti na nasimulovaném průběhu, reflektující nejen předpokládanou dosaženou hodnotu tvrdosti, ale upozorňující také na fázové přeměny, které daný materiál při povrchovém kalení prodělal.

Ověření funkčnosti matematického modelu pro laserové kalení bylo provedeno pomocí experimentálního měření ve společnosti MATEX PM, s.r.o. Naneštěstí z provozních důvodů bylo upuštěno od původního měření laserového kalení s indukčním dohřevem a nahrazeno pouze samotným laserovým kalením. Z tohoto důvodu nebylo možno získané nasimulované data pro model laserového kalení s indukčním dohřevem porovnat. V porovnání výsledků získaných experimentálním měřením laserového kalení s jeho navrženým matematickým modelem je patrná velmi dobrá shoda. Vzniklé nepřesnosti v porovnání výsledků byly pravděpodobně způsobeny chybou měření vlivem nepřesného uložení měřících termočlánků v odpovídající hloubce.

Součástí experimentu bylo také vyhodnocení hodnot tvrdosti kalených vzorků pomocí metalurgických zkoušek, a jejich porovnání s predikovanými hodnotami pomocí navrženého algoritmu. Mezi predikovanými a skutečnými hodnotami tvrdosti je zřejmá velmi dobrá shoda, především grafický výstup algoritmu dává dobrou představu o predikované hodnotě tvrdosti. Jako referenční křivky algoritmu byly použity data pro indukční kalení, což vneslo do predikované hodnoty jistou chybu. Možným úkolem do budoucna by bylo rozšířit

algoritmus o knihovnu s referenčními daty pro jednotlivé druhy kalení a zpracovávané materiály. Další možností rozšíření by bylo využití funkce LiveLink™, která by umožnila přímý přístup k nasimulovaným datům.

Seznam použité literatury

- [1] RAJMONT s.r.o [online]. ©2005-2016 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.rajmont.cz/technologie-indukcni-ohrev/>
- [2] Induction Heating Machine Co.,Ltd [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.dw-inductionheating.com/pic/induction-heating.jpg>
- [3] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. ISBN 978-80-261-0260-1.
- [4] DOLEŽEL, Ivo, Pavel ŠOLÍN, Bohuš ULRYCH, Martin ŠKOPEK a Jerzy BARGLIK. *Modelování indukčního ohřevu kovových materiálů a souvisejících technologických procesů*. : FCC PUBLIC, 2011. ISSN 1210-0889.
- [5] VRÁNA, Václav. *Elektrické teplo* [online]. Ostrava, 2008, 22str. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/TEPLO_bc_08.pdf
- [6] LUCAS, Jean. *Electromagnetic induction and electric conduction in industry*. Paris: Centre Français de l'Électricité [u.a.], 1997. ISBN 29-106-6826-6.
- [7] DAVIES, John. *Conduction and induction heating*. London, U.K.: P. Peregrinus Ltd. on behalf of the Institution of Electrical Engineers, c1990. ISBN 0863411746.
- [8] MACEK, Karel, Petr ZUNA a Jiří JANOVEC. *Tepelné zpracování kovových materiálů*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04186-4.
- [9] NOVÁK, Zdeněk. *Zdroje pro vysokofrekvenční ohřevy*. Praha, 2012. Diplomová práce. Fakulta elektrotechnická, katedra Elektroenergetiky. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Jan Kyncl.
- [10] ŠULC, Jan. *Úvod do laserové techniky* [online]. Učební text. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/ult_sl_06.pdf
- [11] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi* [online]. Olomouc, 2010 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>. Univerzita Palackého.

- [12] TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG. *Laser processing – CO₂ laser* [online]. Technická dokumentace. Ditzingen, 2007 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://www.trumpf-laser.com/fileadmin/DAM/trumpf-laser.com/Technische_Infos/TI_Laser_processing_CO2-Lasers.PDF
- [13] BUCHFINK, Gabriela. *Fascination of sheet metal: a material of limitless possibilities* [online]. 1st ed. Würzburg, Germany: Vogel Buchverlag, 2007 [cit. 2016-04-24]. ISBN 978-383-4330-710.
- [14] MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky* [online]. Učební text. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zaklady__laserove_techiky_2013__mrna.pdf
- [15] NOVÁK, Miroslav. *Lasery a optika* [online]. 2011 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni->
- [16] NĚMEC, Miroslav. *Optika a moderní fyzika* [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://docplayer.cz/8347050-5-1-svetlo-jako-elektromagneticke-vlneni.html#show_full_text
- [17] TOTTEN, George E. a Maurice A.H. HOWES. *Steel heat treatment handbook*. New York: Marcel Dekker, c1997. ISBN 08-247-9750-7.
- [18] NĚMEČEK, Stanislav a Michal MÍŠEK. *Optimalizace laserového povrchového zpracování strojních součástí pro zvýšení jejich užitných vlastností: Laserové kalení forem a nástrojů* [online]. Brno, 2011 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2011/sbornik/lists/papers/917.pdf>
- [19] KŘÍŽ, Antonín. *Strojírenské materiály* [online]. Učební text. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tep_zprac.pdf
- [20] ŠEBESTOVÁ, Hana a Petr SCHOVÁNEK. *Krystalizace ocelí a litin* [online]. Univerzita Palackého v Olomouci, 2015 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm1-p-2.pdf>.
- [21] KRAUS, Václav. *Tepelná zpracování a slinování ocelí* [online]. Učební text. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2015 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://tzs.kmm.zcu.cz/premeny.pdf>

- [22] *Tepelná zpracování oceli* [online]. Učební text. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta chemicko-inženýrská, 2008 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_tepelne_zprac_oceli/teorie2.htm
- [23] Aquastic Engineering Solutions. *Temperature Instruments* [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://aquastic.tradeindia.com/-50-to-550-degc-ir-pyrometer-1735618.html>
- [24] *Laserové zpracování materiálů* [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://dp.bajaja.net/05.html>
- [25] BORLINGHAUS, T. Rolf. *Leica Microsystems: Lasers for Confocal* [online]. 2011 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.leica-microsystems.com/science-lab/lasers-for-confocal/>
- [26] FODREK, Peter, Bernard BENKO a Miroslav KOSEČEK. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
- [27] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Vienala, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [28] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-7043-417-1.
- [29] PLUHAŘ, J. a kol.: *Nauka o materiálu, Laboratorní cvičení*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2001, 287 s., ISBN 80-01-02770-8.
- [30] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [31] *Zkoušky tvrdosti* [online]. Učební text. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf
- [32] *Mineralogical Society of America: THE KNOOP MICROHARDNESS TESTER AS A MINERALOGICAL TOOL* [online]. cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://www.minsocam.org/MSA/collectors_corner/arc/knoop.htm

- [33] VOLF, Ivo, Miroslava JAREŠOVÁ a Miroslav OUHRABKA. *Přenos tepla*. [online]. Učební text. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/texttz.pdf>
- [34] KARBAN, Pavel. *Přednášky z předmětu Aplikace Teoretické Elektrotechniky*. Učební text. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická
- [35] KOTLAN, Václav, David PÁNEK, Roman HAMAR a Ivo DOLEŽEL. *Model of laser heating with induction pre- and post-heating and its experimental verification*. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická
- [36] MAN, Vojtěch. *Metoda hraničních prvků v inženýrské praxi*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Tomáš Profant, Ph.D.
- [37] FUSEK, Martin a Radim HALAMA. *Metoda konečných prvků a metoda hraničních prvků*. [online]. Učební text. Technická univerzita Ostrava, Vysoká škola báňská. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/mkpamhp_obr.pdf
- [38] *Zjišťování fázových přeměn* [online]. Učební text. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/zjistovani_fazovych_premen.pdf

Seznam příloh

Příloha A *Zdrojový kód pro predikci tvrdosti v prostředí MATLAB[®]*

Příloha B *Ukázka vybraného souboru naměřených dat pro termočlánek T1*

Příloha C *Průběhy mikrotvrdosti kaleného vzorku vyhotovené společností MATEX, PM s.r.o*

Příloha A: Zdrojový kód pro predikci tvrdosti v prostředí MATLAB®

```
vstupni_data=input('Zadejte název souboru s referenčními daty: ','s');
load(vstupni_data);
vstupni_data_comsol=input('Zadejte název souboru s nasimulovanými daty: ','s');
load(vstupni_data_comsol);
vstup=input('Zadejte teplotu vychladnutí materiálu (v rozmezí od 280 do 850 degC): ');
rozmezi_teplot=280:850;
vstup_zaokrouhlo=round(vstup);
vstupni_podminka=ismember(vstup_zaokrouhlo, rozmezi_teplot);
while vstupni_podminka==0
    vstup=input('Zadaná teplota je mimo rozmezí, zadejte hodnotu od 280 do 850 degC: ');
    vstup_zaokrouhlo=round(vstup);
    vstupni_podminka=ismember(vstup_zaokrouhlo, rozmezi_teplot);
end;
```

```
X647 = X_647;
Y647 = Y_647;
p647 = polyfit(Y647,X647,2);
p647_vstup = polyval(p647,vstup);
X565 = X_565;
Y565 = Y_565;
p565 = polyfit(Y565,X565,2);
p565_vstup = polyval(p565,vstup);
X470 = X_470;
Y470 = Y_470;
p470 = polyfit(Y470,X470,2);
p470_vstup = polyval(p470,vstup);
X360 = X_360;
Y360 = Y_360;
p360 = polyfit(Y360,X360,2);
p360_vstup = polyval(p360,vstup);
X330 = X_330;
Y330 = Y_330;
p330 = polyfit(Y330,X330,2);
p330_vstup = polyval(p330,vstup);
X275 = X_275;
Y275 = Y_275;
p275 = polyfit(Y275,X275,2);
p275_vstup = polyval(p275,vstup);
X245 = X_245;
Y245 = Y_245;
p245 = polyfit(Y245,X245,2);
p245_vstup = polyval(p245,vstup);
X240 = X_240;
Y240 = Y_240;
p240 = polyfit(Y240,X240,2);
p240_vstup = polyval(p240,vstup);
```

```
X210 = X_210;
Y210 = Y_210;
p210 = polyfit(Y210,X210,2);
p210_vstup = polyval(p210,vstup);
promenna_X = VarName1;
promenna_Y = VarName2;
p_promenna = polyfit(VarName2,VarName1,7);
p_promenna_vstup = polyval(p_promenna,vstup);

perlit_promenna_700 = polyval(p_promenna,700);
perlit_promenna_690 = polyval(p_promenna,690);
perlit_promenna_650 = polyval(p_promenna,650);
perlit_promenna_620 = polyval(p_promenna,620);
perlit_promenna_600 = polyval(p_promenna,600);
perlit_promenna_570 = polyval(p_promenna,570);
perlit_zaokrouhlena_700 = round(perlit_promenna_700);
perlit_zaokrouhlena_690 = round(perlit_promenna_690);
perlit_zaokrouhlena_650 = round(perlit_promenna_650);
perlit_zaokrouhlena_620 = round(perlit_promenna_620);
perlit_zaokrouhlena_600 = round(perlit_promenna_600);
perlit_zaokrouhlena_570 = round(perlit_promenna_570);
perlit700 = 400:6000;
perlit690 = 180:600;
perlit650 = 80:600;
perlit620 = 60:240;
perlit600 = 50:180;
perlit570 = 50:80;
N_perlit=ismember(perlit_zaokrouhlena_700,perlit700);
O_perlit=ismember(perlit_zaokrouhlena_690,perlit690);
P_perlit=ismember(perlit_zaokrouhlena_650,perlit650);
Q_perlit=ismember(perlit_zaokrouhlena_620,perlit620);
R_perlit=ismember(perlit_zaokrouhlena_600,perlit600);
S_perlit=ismember(perlit_zaokrouhlena_570,perlit570);

bainit_promenna_570 = polyval(p_promenna,570);
bainit_promenna_540 = polyval(p_promenna,540);
bainit_promenna_510 = polyval(p_promenna,510);
bainit_promenna_450 = polyval(p_promenna,450);
bainit_promenna_400 = polyval(p_promenna,400);
bainit_promenna_370 = polyval(p_promenna,370);
bainit_promenna_330 = polyval(p_promenna,330);
bainit_promenna_300 = polyval(p_promenna,300);
bainit_zaokrouhlena_570 = round(bainit_promenna_570);
bainit_zaokrouhlena_540 = round(bainit_promenna_540);
bainit_zaokrouhlena_510 = round(bainit_promenna_510);
bainit_zaokrouhlena_450 = round(bainit_promenna_450);
bainit_zaokrouhlena_400 = round(bainit_promenna_400);
bainit_zaokrouhlena_370 = round(bainit_promenna_370);
bainit_zaokrouhlena_330 = round(bainit_promenna_330);
bainit_zaokrouhlena_300 = round(bainit_promenna_300);
```

```
bainit570 = 28:70;
bainit540 = 18:120;
bainit510 = 14:240;
bainit450 = 12:320;
bainit400 = 14:360;
bainit370 = 16:400;
bainit330 = 70:500;
bainit300 = 320:550;
N_bainit=ismember(bainit_zaokrouhlena_570,bainit570);
O_bainit=ismember(bainit_zaokrouhlena_540,bainit540);
P_bainit=ismember(bainit_zaokrouhlena_510,bainit510);
Q_bainit=ismember(bainit_zaokrouhlena_450,bainit450);
R_bainit=ismember(bainit_zaokrouhlena_400,bainit400);
S_bainit=ismember(bainit_zaokrouhlena_370,bainit370);
T_bainit=ismember(bainit_zaokrouhlena_330,bainit330);
U_bainit=ismember(bainit_zaokrouhlena_300,bainit300);

p_graf_647 = polyfit(X647,Y647,4);
p_graf_565 = polyfit(X565,Y565,4);
p_graf_470 = polyfit(X470,Y470,4);
p_graf_360 = polyfit(X360,Y360,4);
p_graf_330 = polyfit(X330,Y330,4);
p_graf_275 = polyfit(X275,Y275,4);
p_graf_245 = polyfit(X245,Y245,3);
p_graf_240 = polyfit(X240,Y240,3);
p_graf_210 = polyfit(X210,Y210,2);

y_aprox647=polyval(p_graf_647,X647);
y_aprox565=polyval(p_graf_565,X565);
y_aprox470=polyval(p_graf_470,X470);
y_aprox360=polyval(p_graf_360,X360);
y_aprox330=polyval(p_graf_330,X330);
y_aprox275=polyval(p_graf_275,X275);
y_aprox245=polyval(p_graf_245,X245);
y_aprox240=polyval(p_graf_240,X240);
y_aprox210=polyval(p_graf_210,X210);

semilogx(X647,y_aprox647,'r-','LineWidth',2);
hold on
semilogx(X565,y_aprox565,'b-','LineWidth',2);
hold on
semilogx(X470,y_aprox470,'g-','LineWidth',2);
hold on
semilogx(X360,y_aprox360,'m-','LineWidth',2);
hold on
semilogx(X330,y_aprox330,'c-','LineWidth',2);
hold on
semilogx(X275,y_aprox275,'-','LineWidth',2, 'color', [1 0.89 0.01]);
hold on
semilogx(X245,y_aprox245,'k-','LineWidth',2);
```

```

hold on
semilogx(X240,y_aprox240,'-', 'LineWidth',2, 'color', [1 0.47 0]);
hold on
semilogx(X210,y_aprox210,'-', 'LineWidth',2, 'color', [0.5 0.5 0]);
hold on
semilogx(p_promenna_vstup,vstup,'kx','markers',12,'LineWidth',2);
hold on
semilogx(VarName1,VarName2,'-', 'LineWidth',2, 'color', [0.5 0.5 0.5]);
hold off
xlabel('t [s]');
ylabel('T [degC]');
legend('647 HV','565 HV','470 HV','360 HV','330 HV','275 HV','245 HV','240 HV','210 HV','Zvolená teplota na vstupní křivce','Vstupní křivka pro indukční kalení',-1);
grid minor
osa_x_rozsah=[1 10000];
osa_y_rozsah=[150 900];
xlim(osa_x_rozsah);
ylim(osa_y_rozsah);

vysledek = abs(p647_vstup - p_promenna_vstup);
vysledek2 = abs(p565_vstup - p_promenna_vstup);
vysledek3 = abs(p470_vstup - p_promenna_vstup);
vysledek4 = abs(p360_vstup - p_promenna_vstup);
vysledek5 = abs(p330_vstup - p_promenna_vstup);
vysledek6 = abs(p275_vstup - p_promenna_vstup);
vysledek7 = abs(p245_vstup - p_promenna_vstup);
vysledek8 = abs(p240_vstup - p_promenna_vstup);

B = [vysledek ; vysledek2 ; vysledek3 ; vysledek4 ; vysledek5 ; vysledek6 ; vysledek7 ;
vysledek8];
M = min(B);

if M==vysledek;
    disp('Tvrdost po povrchovém kalení je přibližně 647 HV')
elseif M==vysledek2;
    disp('Tvrdost po povrchovém kalení je přibližně 565 HV')
elseif M==vysledek3;
    disp('Tvrdost po povrchovém kalení je přibližně 470 HV')
elseif M==vysledek4;
    disp('Tvrdost po povrchovém kalení je přibližně 360 HV')
elseif M==vysledek5;
    disp('Tvrdost po povrchovém kalení je přibližně 330 HV')
elseif M==vysledek6;
    disp('Tvrdost po povrchovém kalení je přibližně 275 HV')
elseif M==vysledek7;
    disp('Tvrdost po povrchovém kalení je přibližně 245 HV')
elseif M==vysledek8;
    disp('Tvrdost po povrchovém kalení je přibližně 240 HV')
end;

```



```
if N_perlit==1
    disp('Materiál procházel perlitickou přeměnou')
elseif O_perlit==1
    disp('Materiál procházel perlitickou přeměnou')
elseif P_perlit==1
    disp('Materiál procházel perlitickou přeměnou')
elseif Q_perlit==1
    disp('Materiál procházel perlitickou přeměnou')
elseif R_perlit==1
    disp('Materiál procházel perlitickou přeměnou')
elseif S_perlit==1
    disp('Materiál procházel perlitickou přeměnou')
end;
```

```
if N_bainit==1
    disp('Materiál procházel bainitickou přeměnou')
elseif O_bainit==1
    disp('Materiál procházel bainitickou přeměnou')
elseif P_bainit==1
    disp('Materiál procházel bainitickou přeměnou')
elseif Q_bainit==1
    disp('Materiál procházel bainitickou přeměnou')
elseif R_bainit==1
    disp('Materiál procházel bainitickou přeměnou')
elseif S_bainit==1
    disp('Materiál procházel bainitickou přeměnou')
elseif T_bainit==1
    disp('Materiál procházel bainitickou přeměnou')
elseif U_bainit==1
    disp('Materiál procházel bainitickou přeměnou')
end;
```

Příloha B Ukázka vybraného souboru naměřených dat pro termočlánek T1

Time	T1	Time	T1	Time	T1	Time	T1	Time	T1	Time	T1
0	26,70912	5,9	28,26336	11,8	50,01598	17,7	367,4766	23,6	310,2018	29,7	246,5634
0,1	26,70912	6	28,26336	11,9	50,01598	17,8	367,4766	23,7	310,2018	29,8	246,5634
0,2	26,70912	6,1	28,26336	12	60,05269	17,9	367,4766	23,8	310,2018	29,9	246,5634
0,3	26,70912	6,2	28,26336	12,1	60,05269	18	367,4766	23,9	310,2018	30	246,5634
0,4	26,70912	6,3	28,26336	12,2	60,05269	18,1	367,4766	24	299,4191	30,1	246,5634
0,5	26,70912	6,4	29,11383	12,3	60,05269	18,2	367,4766	24,1	299,4191	30,2	246,5634
0,6	26,70912	6,5	29,11383	12,4	60,05269	18,3	367,4766	24,2	299,4191	30,3	246,5634
0,7	26,70912	6,6	29,11383	12,5	60,05269	18,4	397,3761	24,3	299,4191	30,4	240,9258
0,8	26,7722	6,7	29,11383	12,6	60,05269	18,5	397,3761	24,4	299,4191	30,5	240,9258
0,9	26,7722	6,8	29,11383	12,7	60,05269	18,6	397,3761	24,5	299,4191	30,6	240,9258
1	26,7722	6,9	29,11383	12,8	75,11463	18,7	397,3761	24,6	299,4191	30,7	240,9258
1,1	26,7722	7	29,11383	12,9	75,11463	18,8	397,3761	24,7	299,4191	30,8	240,9258
1,2	26,7722	7,1	29,11383	13	75,11463	18,9	397,3761	24,8	289,7001	30,9	240,9258
1,3	26,7722	7,2	30,36724	13,1	75,11463	19	397,3761	24,9	289,7001	31	240,9258
1,4	26,7722	7,3	30,36724	13,2	75,11463	19,1	397,3761	25	289,7001	31,1	240,9258
1,5	26,7722	7,4	30,36724	13,3	75,11463	19,2	409,7236	25,1	289,7001	31,2	235,6305
1,6	26,87382	7,5	30,36724	13,4	75,11463	19,3	409,7236	25,2	289,7001	31,3	235,6305
1,7	26,87382	7,6	30,36724	13,5	75,11463	19,4	409,7236	25,3	289,7001	31,4	235,6305
1,8	26,87382	7,7	30,36724	13,6	95,03192	19,5	409,7236	25,4	289,7001	31,5	235,6305
1,9	26,87382	7,8	30,36724	13,7	95,03192	19,6	409,7236	25,5	289,7001	31,6	235,6305
2	26,87382	7,9	30,36724	13,8	95,03192	19,7	409,7236	25,6	280,9969	31,7	235,6305
2,1	26,87382	8	32,20013	13,9	95,03192	19,8	409,7236	25,7	280,9969	31,8	235,6305
2,2	26,87382	8,1	32,20013	14	95,03192	19,9	409,7236	25,8	280,9969	31,9	235,6305
2,3	26,87382	8,2	32,20013	14,1	95,03192	20	366,223	25,9	280,9969	32	230,6515
2,4	27,02074	8,3	32,20013	14,2	95,03192	20,1	366,223	26	280,9969	32,1	230,6515
2,5	27,02074	8,4	32,20013	14,3	95,03192	20,2	366,223	26,1	280,9969	32,2	230,6515
2,6	27,02074	8,5	32,20013	14,4	125,0564	20,3	366,223	26,2	280,9969	32,3	230,6515
2,7	27,02074	8,6	32,20013	14,5	125,0564	20,4	366,223	26,3	280,9969	32,4	230,6515
2,8	27,02074	8,7	32,20013	14,6	125,0564	20,5	366,223	26,4	273,0386	32,5	230,6515
2,9	27,02074	8,8	34,8093	14,7	125,0564	20,6	366,223	26,5	273,0386	32,6	230,6515
3	27,02074	8,9	34,8093	14,8	125,0564	20,7	366,223	26,6	273,0386	32,7	230,6515
3,1	27,02074	9	34,8093	14,9	125,0564	20,8	350,64	26,7	273,0386	32,8	225,9465
3,2	27,1357	9,1	34,8093	15	125,0564	20,9	350,64	26,8	273,0386	32,9	225,9465
3,3	27,1357	9,2	34,8093	15,1	125,0564	21	350,64	26,9	273,0386	33	225,9465
3,4	27,1357	9,3	34,8093	15,2	176,555	21,1	350,64	27	273,0386	33,1	225,9465
3,5	27,1357	9,4	34,8093	15,3	176,555	21,2	350,64	27,1	273,0386	33,2	225,9465
3,6	27,1357	9,5	34,8093	15,4	176,555	21,3	350,64	27,2	265,7542	33,3	225,9465
3,7	27,1357	9,6	38,37142	15,5	176,555	21,4	350,64	27,3	265,7542	33,4	225,9465
3,8	27,1357	9,7	38,37142	15,6	176,555	21,5	350,64	27,4	265,7542	33,5	225,9465
3,9	27,1357	9,8	38,37142	15,7	176,555	21,6	335,8459	27,5	265,7542	33,6	221,5405
4	27,37222	9,9	38,37142	15,8	176,555	21,7	335,8459	27,6	265,7542	33,7	221,5405
4,1	27,37222	10	38,37142	15,9	176,555	21,8	335,8459	27,7	265,7542	33,8	221,5405
4,2	27,37222	10,1	38,37142	16	246,1171	21,9	335,8459	27,8	265,7542	33,9	221,5405
4,3	27,37222	10,2	38,37142	16,1	246,1171	22	335,8459	27,9	265,7542	34	221,5405
4,4	27,37222	10,3	38,37142	16,2	246,1171	22,1	335,8459	28	258,9455	34,1	221,5405
4,5	27,37222	10,4	43,28844	16,3	246,1171	22,2	335,8459	28,1	258,9455	34,2	221,5405
4,6	27,37222	10,5	43,28844	16,4	246,1171	22,3	335,8459	28,2	258,9455	34,3	221,5405
4,7	27,37222	10,6	43,28844	16,5	246,1171	22,4	322,0427	28,3	258,9455	34,4	217,3775
4,8	27,73162	10,7	43,28844	16,6	246,1171	22,5	322,0427	28,4	258,9455	34,5	217,3775
4,9	27,73162	10,8	43,28844	16,7	246,1171	22,6	322,0427	28,5	258,9455	34,6	217,3775
5	27,73162	10,9	43,28844	16,8	315,0989	22,7	322,0427	28,6	258,9455	34,7	217,3775
5,1	27,73162	11	43,28844	16,9	315,0989	22,8	322,0427	28,7	258,9455	34,8	217,3775
5,2	27,73162	11,1	43,28844	17	315,0989	22,9	322,0427	28,8	252,5567	34,9	217,3775
5,3	27,73162	11,2	50,01598	17,1	315,0989	23	322,0427	28,9	252,5567	35	217,3775
5,4	27,73162	11,3	50,01598	17,2	315,0989	23,1	322,0427	29	252,5567	35,1	217,3775
5,5	27,73162	11,4	50,01598	17,3	315,0989	23,2	310,2018	29,1	252,5567	35,2	213,4523
5,6	28,26336	11,5	50,01598	17,4	315,0989	23,3	310,2018	29,2	252,5567	35,3	213,4523
5,7	28,26336	11,6	50,01598	17,5	315,0989	23,4	310,2018	29,3	252,5567	35,4	213,4523
5,8	28,26336	11,7	50,01598	17,6	367,4766	23,5	310,2018	29,4	252,5567	35,5	213,4523

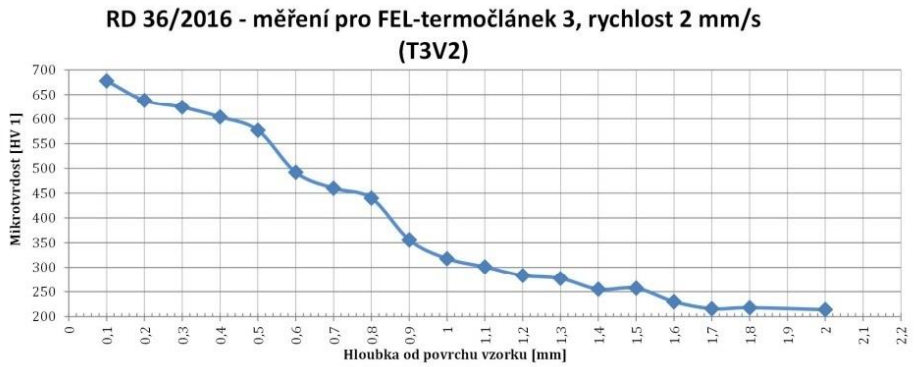
Příloha C: Průběhy mikrotvrdosti kaleného vzorku vyhotovené společností MATEX, PM s.r.o




Tel.: +420 371 707 213
 E-mail: info@matexpm.com
 www.matexpm.com

identifikace zakázky:	charakter datového listu:	součástka: zákazník:					
RD 36/2016	Průběh mikrotvrdosti kaleného vzorku	"vzorek 12 050"					
vzorek:	jakost materiálu:	kalicí teplota:	rychlost laseru:	optika:	poznámka:	chlazení po zakalení:	kaleno dne:
RD36/2016-T3V2	12 050	1150 [°C]	2 [mm·s⁻¹]	30x6 [mm]	P = 62-63 %	-	05.05.2016
požadavky: → (xx÷xx)HRC v hl.(x÷x)[mm]		makrofoto leptaného výbrusu:		makrostruktura kal. oblasti (po měření HV 1):			

Hl. [mm]	HV 1
0,1	678
0,2	638
0,3	624
0,4	604
0,5	577
0,6	492
0,7	460
0,8	440
0,9	356
1,0	318
1,1	301
1,2	283
1,3	277
1,4	255
1,5	257
1,6	230
1,7	216
1,8	218
2,0	214





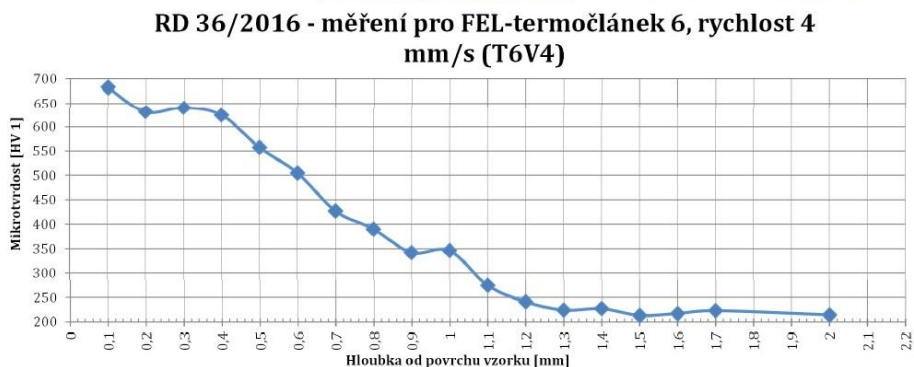
Matex PM, s. r. o.
 Morseova 5, 301 00 Pízeň
 IČ: 26390906
 DIČ: CZ26390906



Tel.: +420 371 707 213
 E-mail: info@matexpm.com
 www.matexpm.com

identifikace zakázky:	charakter datového listu:	součástka: zákazník:					
RD 36/2016	Průběh mikrotvrdosti kaleného vzorku	"vzorek 12 050"					
vzorek:	jakost materiálu:	kalicí teplota:	rychlost laseru:	optika:	poznámka:	chlazení po zakalení:	kaleno dne:
RD36/2016-T6V4	12 050	1150 [°C]	4 [mm·s⁻¹]	30x6 [mm]	P = 82-83 %	-	05.05.2016
požadavky: → (xx÷xx)HRC v hl.(x÷x)[mm]		makrofoto leptaného výbrusu:		makrostruktura kal. oblasti (po měření HV 1):			

Hl. [mm]	HV 1
0,1	683
0,2	631
0,3	640
0,4	624
0,5	557
0,6	505
0,7	427
0,8	390
0,9	342
1,0	346
1,1	275
1,2	241
1,3	224
1,4	227
1,5	213
1,6	217
1,7	223
2,0	214





Matex PM, s. r. o.
 Morseova 5, 301 00 Pízeň
 IČ: 26390906
 DIČ: CZ26390906