TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Možnosti využití přístroje Gleeble pro simulace dějů v tepelně ovlivněné oblasti svarů

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: **Martin Najman**
Vedoucí práce: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.

Liberec 2016

Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Martin Najman**
Osobní číslo:	**S12000144**
Studijní program:	**B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor:	**Strojní inženýrství**
Název tématu:	**Možnosti využití přístroje Gleeble pro simulace dějů v tepelně ovlivněné oblasti svarů**
Zadávající katedra:	**Katedra strojírenské technologie**

Zásady pro vypracování:

1. Teoreticky se seznamte a popište děje k nimž dochází v tepelně ovlivněné oblasti svarů.
2. Seznamte se s možnostmi a obsluhou teplotně-napěťového simulátoru Gleeble 3500 a popište možnosti jeho využití pro simulace dějů k nimž dochází v TOO.
3. Navrhněte a realizujte experimentální program pro materiál S355 J2, zaměřený na tvar teplotního gradientu ve vzorku s ohledem na odchylky způsobené rozdílnými rychlostmi ohřevu.
4. Proveďte vyhodnocení experimentů a sumarizujte získané poznatky.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**

Rozsah pracovní zprávy: **cca 30 stan**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení.* **ISBN 80-85771-81-0. ZEROSS.**
2. MORAVEC, J., BRADÁČ, J. *Možnosti a využití teplotně-napěťového simulátoru Gleeble při výzkumu technologické zpracovatelnosti materiálů.* **1. vyd. Technická univerzita v Liberci, 2014.**
3. *AWS Welding Handbook: Welding Science and Technology.* **9th Ed., Vol.1, 2001.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: **31. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31. ledna 2017**

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. listopadu 2015

Prohlášení

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

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

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

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

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

Datum:

Podpis:

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta Strojní

Katedra strojírenské Technologie

Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství

Student: Martin Najman

Téma práce: Možnosti využití přístroje Gleeble pro simulace dějů, k nimž dochází v tepelně ovlivněné oblasti svarů

Abstrakt: Cílem této bakalářské práce je ukázat, jaký vliv má volná délka a rychlost ohřevu vzorku na tvar a strmost teplotních gradientů při materiálových testech v přístroji Gleeble 3500. Experimenty byly provedeny na vzorcích z nízkouhlíkové konstrukční oceli S355J2 o průměru 10 mm. Měření byla provedena na vzorcích s volnou délkou 9; 19; 29 a 39 mm a s rychlostmi ohřevu odpovídajícími 1; 10 a 100 °C.s^{-1}.

Abstract: This bachelor thesis shows the influence of free span and heating speed on the shape and steepness temperature gradient during the material tests in Gleeble 3500. Experiments were performed on specimens carbon steel S355J2 of 10 mm diameter. Gauge were performed on specimens with a free span 9, 19, 29, 39 mm and heating speed corresponding with 1; 10 and 100 °C.s^{-1}.

.

Klíčová slova: teplotní gradient, Gleeble 3500, rychlost ohřevu, volná délka

Key words: temperature gradient, Gleeble 3500, heating speed, free span

Obsah

1. Historie 3
2. Teoretická část 5
2.1 Definice svařování 5
2.1.1 Tavné svařování 5
2.1.2 Tlakové svařování 6
2.2 Svařitelnost, posouzení vhodných vlastností svaru 7
2.2.1 Strukturu svaru 8
2.3 Teplotní cyklus svařování 8
2.3.1 Teplotní cykly při svařování 9
2.4 Pásma v TOO 14
2.4.1 První pásmo – rozmezí teplot A_{C1} až A_{C3} 15
2.4.2 Druhé pásmo – rozmezí A_{C3} až hranice přehřáté oblasti 16
2.4.3 Třetí pásmo – přehřátá oblast 16
2.5 Simulace teplotních dějů 18
2.5.1 Systém Gleeble 18
2.5.2 Systém Gleeble 3500 19
2.5.3 Základní součásti systému Gleeble 21
2.5.4 Systém ohřevu a ochlazování 22
2.5.5 Teplotní pole vzorku 22
3. Experimentální část 27
3.1 Návrh experimentů 27
3.2 Tvorba programu 30
3.3 Realizace experimentu 31
3.4 Naměřené hodnoty 32
3.4.1 Vyhodnocení experimentů (volná délka vzorku 9 mm) 32
3.4.2 Vyhodnocení experimentů pro volné délky 19 mm, 29 mm a 39 mm 39
3.4.3 Teplotní gradienty při velmi vysokých rychlostech ohřevu 45
4. Závěr 49
5. Seznam použité literatury 50
Seznam příloh 51

1. Historie

Svařování mnoho lidí považuje za objev posledních pár let, ale opak je pravdou. První údaje o svařování pocházejí již ze starověku. Nejranější případy svařování pocházejí z doby bronzové. Je prokázáno, že již v době železné se Egypťané a sousední národy naučili svařovat železo. Svařování má tedy hluboké kořeny.

Postupem času s rozvojem kovářství, se začínalo vyrábět mnoho předmětů kovářským svařováním, což je způsob, kdy se dva předměty zahřejí na vysokou teplotu a následně skovají do jednoho celku.

Ovšem první průmyslové aplikace svařování, tak jak je známe dnes, sahají do bližší doby. V 18. století bylo první železo řezáno a svařováno směsí hořlavého plynu s kyslíkem. První tavné svařování probíhalo za použití směsi vzduch – vodík, později kyslík – vodík a po objevu výroby karbidu vápníku dnes stále používaná směs kyslík – acetylén.

Svařování elektrickým obloukem zase bylo podmíněno vynálezem elektrického generátoru. Zřejmě první použití elektrického oblouku ke svařování se datuje do roku 1881 a svařování se týkalo olověných desek pro akumulátory uhlíkovou elektrodou. První patent na svařování však získal Rus Nikolaj Nikolajevič Benardos, který prokázal rovněž možnost svařování pod vodou. Americký technik Elihu Thomson patentoval v roce 1885 svařování elektrickým odporem, tato technologie se však rozvinula až ve 20. století. Svařování odtavující se holou kovovou elektrodou patentoval v roce 1891 Nikolaj Gavrilovič Slavjanov. Svůj postup nazval svařování kovů odléváním a tento nápad předváděl již v roce 1888. Kolem roku 1900 představil první obalenou kovovou elektrodu v Británii Strohmenger. Elektroda obalena v silné vrstvě jílu nebo vápna měla tu výhodu, že oblouk byl stabilnější. O několik let později (1907-1914) Švéd Oscar Kjellberg vynalezl obalenou elektrodu podobnou té dnešní. Krátké tyčky namáčené ve směsi oxidů a křemičitanů a později vysušené.

V roce 1926 Obdrželi H. M. Hobard a P. K. Devers patent na svařování v ochranné atmosféře argonu a hélia. Tento způsob svařování začal být průmyslově využíván ve 40. letech 20. století pro svařování hořčíkových a hliníkových slitin a vysokolegovaných ocelí. V roce 1948 byl podobný způsob odzkoušen s ocelovou tenkou elektrodou ve formě drátu. K význačnému objevu došlo v roce 1953, když Ljubavskij a Novošilov oznámili použití ocelových elektrod pro svařování v atmosféře CO_2. Metoda se velmi rychle ujala, protože představovala výhodný kompromis mezi kvalitou svarů a ekonomikou. Další vylepšení přišlo na přelomu let 1958 a 1959. V roce 1953 — ruský vědec Nikolaj Fedotovič Kazakov

navrhnul použití metody difuzního svařování a v roce 1958 bylo představeno elektrostruskové svařování.

Jedním ze zásadních vlivů na rozvoj metod svařování byly také objevy vysoce koncentrovaných zdrojů tepla jako je plazma, laser a elektronový svazek. V roce 1957 vynalezl Gage plazmové svařování, které je výhodné v tom, že dosahuje teplot vyšších než je teplota tání wolframu. Po vynálezu laseru v roce 1960 nastal velký rozvoj především pro automatizované svařování vysokou rychlostí. Svařování třením s promíšením (FSW) vynalezl v roce 1991 Wayne Thomas v „The Welding Institute" ve Velké Británii. Tím, aspoň prozatím, skončily objevy jednotlivých metod svařování. Vývoj však pokračuje dál a to především v oblasti svařovací techniky a zdokonalení jednotlivých metod svařování. [9]

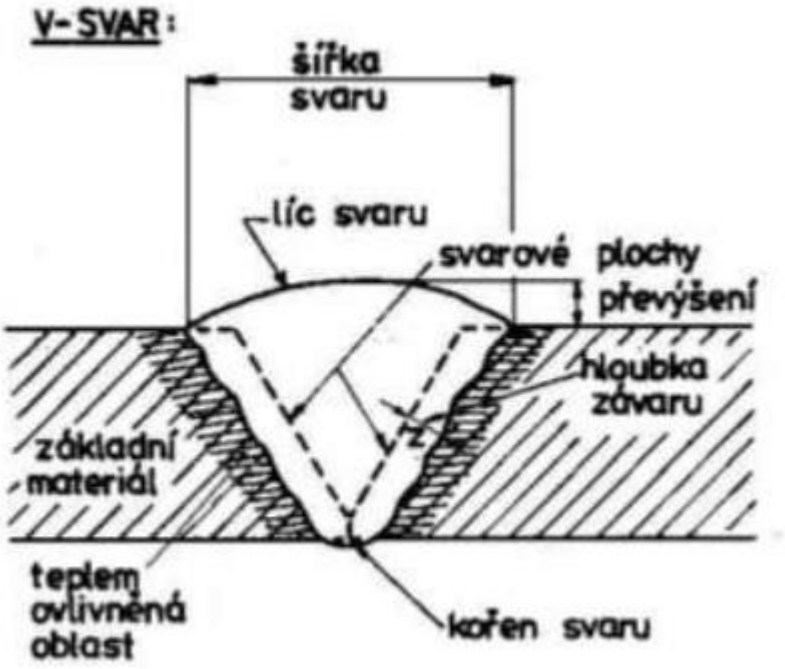
2. Teoretická část

2.1 Definice svařování

Svařování je proces, který slouží k vytvoření trvalého, nerozebíratelného spoje strojních součástí i celých konstrukcí ze součástí jednoduchých tvarů. Tyto součásti jsou většinou z hutních polotovarů (tyče, pásy, plechy, profily) případně výkovků nebo odlitků. Obecným požadavkem na proces svařování je vytvoření takových termodynamických podmínek, při kterých je umožněn vznik nových meziatomárních vazeb. Jelikož je prakticky velmi obtížné dosáhnout spojení na úrovni meziatomárních vazeb za okolních podmínek, kdy je termodynamický stav materiálů stabilní resp. metastabilní, je nutné tento termodynamický stav změnit. Proto se při svařování nejčastěji používá termická (teplo) nebo mechanická (tlak) aktivace svařovaných povrchů, nebo jejich kombinace. Pokud je použito pro vytvoření svarového spoje pouze teplo do té míry, že se oba spojované povrchy a přídavný materiál nataví, mluvíme o tzv. tavném svařování. Pokud je využit pouze tlak, jde o tlakové svařování za studena (zde jsou nutné vysoké tlaky a svařují se jen plastické materiály). Velice často se pro svařování používá kombinace obou uvedených veličin. Potom mluvíme o svařování teplem a tlakem. U tohoto způsobu spojení není podmínkou natavení materiálu. [9] [12]

2.1.1 Tavné svařování

Tavné svařování lze charakterizovat jako postup, kdy se přivádí energie ve formě tepla a ke spojení materiálů dochází při jejich natavení ve svarové lázni bez použití vnější síly. Svar pak vzniká krystalizací svarového kovu spoje. Protože intenzivní ohřev probíhá jen v okolí svarových ploch, liší se krystalizace kovu tavné lázně od pochodů probíhajících při tuhnutí odlitků. Krystalizace probíhá ve velmi malém objemu taveniny v těsném spojení s tuhým základním kovem, přičemž rozmezí teplot mezi likvidem a solidem je velmi úzké. Obvykle, ne však nezbytně, se přidává a nataví také přídavný materiál. Názvosloví svarového spojení dvou svařovaných dílů zachycuje obrázek 1.



Obr. 1 Názvosloví svarového spoje [1]

Roztavený kov má tendenci metalurgicky reagovat s prvky obsaženými v okolní atmosféře, zejména kyslíkem a dusíkem nebo znečištěním na svarové ploše sírou, fosforem. Pro ochranu před vlivem prvků v atmosféře se používají takové způsoby, které zabraňují těmto nežádoucím plynným prvkům v reakci se svarovou lázní.

Použití rozdílných metod tavného svařování je dáno vhodností každé jedné metody pro různé druhy svařovaných materiálů, typů spoje, poloh při svařování, kvality svaru, velikosti vnitřních napětí a deformací. [4] [12]

2.1.2 Tlakové svařování

Při svařování tlakem vzniká spoj v důsledku silového přiblížení spojovaných ploch na vzdálenost působení meziatomových sil, tzn. téměř na vzdálenost odpovídající rozměru atomové mřížky. Ke spojení dochází v tuhém, nebo částečně nataveném stavu. Ohřev do oblasti kovacích teplot je realizován z důvodu snížení sil potřebných k přiblížení materiálů na meziatomové vzdálenosti. Způsob vzniku tepla na svarových plochách závisí na fyzikálním způsobu použité metody svařování. U většiny metod svařování, patřící do této skupiny, nedojde k překročení teploty solidu. Ve svaru tak nevzniká licí struktura, jako u tavného svařování.

Technologické procesy svařování tlakem jsou ovládány částečně nebo úplně následujícími pěti parametry: tlakem (deformací), teplotou, časem, prostředím (složením plynné fáze),

rychlostí vzájemného přemísťování (třením). Některé parametry jsou natolik svázány, že nemohou být samostatně regulovány a kontrolovány.

Ve skutečnosti je vznik svarového spoje při tlakovém svařování mnohem složitější. V průběhu svařování mohou na stykových plochách a v přilehlých vrstvách kovu probíhat další procesy. Jsou to např. elastická a plastická deformace, zpevnění, odpevnění, objemová a povrchová difuze, rekrystalizace, překrystalizace, precipitace a rozpuštění nových fází, vznik a rozpuštění oxidických blan aj.

Jejich úloha při vzniku spoje a také vliv na vlastnosti spoje jsou dány technologickým charakterem procesu. Obecně lze všechny procesy probíhající při svařování kovů rozdělit na základní a průvodní. Základní procesy jsou ty, které jsou bezprostředně odpovědné za formování svarového spoje. Například při tlakovém svařování za studena je základní proces plastická deformace. Všechny ostatní procesy, např. zpevnění, vznik textury atp., jsou procesy průvodní. [12]

2.2 Svařitelnost, posouzení vhodných vlastností svaru

Svařitelnost - je technologická vlastnost vyjadřující komplexní charakteristiku materiálu určující vhodnost kovu pro požadované svařované spoje předepsané jakosti a konstrukční spolehlivosti.

Vhodnost kovu ke svařování - je charakteristika, která vyjadřuje změnu vlastností kovu v důsledku svařování. Je podmíněna těmito základními činiteli:

- chemickým složením
- metalurgickým způsobem výroby
- způsobem lití a sváření
- tepelným zpracováním

Technologická možnost svařování kovu - je charakteristika vyjadřující vliv použitého druhu svařování na vlastnosti svarového spoje.

Hodnocením svařitelnosti se určuje:

1) vhodnost materiálu na svařování za určitých technologických, případně konstrukčních podmínek,
2) jaké jsou technologické podmínky svařování určitého materiálu na dosažení funkčně vyhovujícího spoje.

Svařitelnost jednotlivých kovových materiálů a jejich slitin je velmi rozdílná a je uváděna v příslušných atestech a materiálových listech. Závisí především na chemickém složení,

způsobu výroby, tepelném zpracování, ale také na tloušťce svařovaných materiálů, případně na konstrukci svarového spoje. Je definována následujícími čtyřmi stupni:

- Svařitelnost zaručená,
- svařitelnost podmíněná,
- svařitelnost dobrá,
- svařitelnost obtížná. [1] [11] [2]

2.2.1 Struktura svaru

Při svařování dochází k tavení základního materiálu a případně i přídavného materiálu, tím vzniká svarový kov (SK). Od svarové lázně je ovlivňován základní materiál v oblasti nazvané tepelně ovlivněná oblast (TOO). V TOO dochází v důsledku působení zdroje tepla od svařování ke změně mikrostruktury, změně velikosti zrna a tím i ke změně mechanických vlastností. Mikrostruktura SK i TOO je závislá na chemickém složení materiálu, vneseném teplu a s ním spojeném teplotním cyklu.

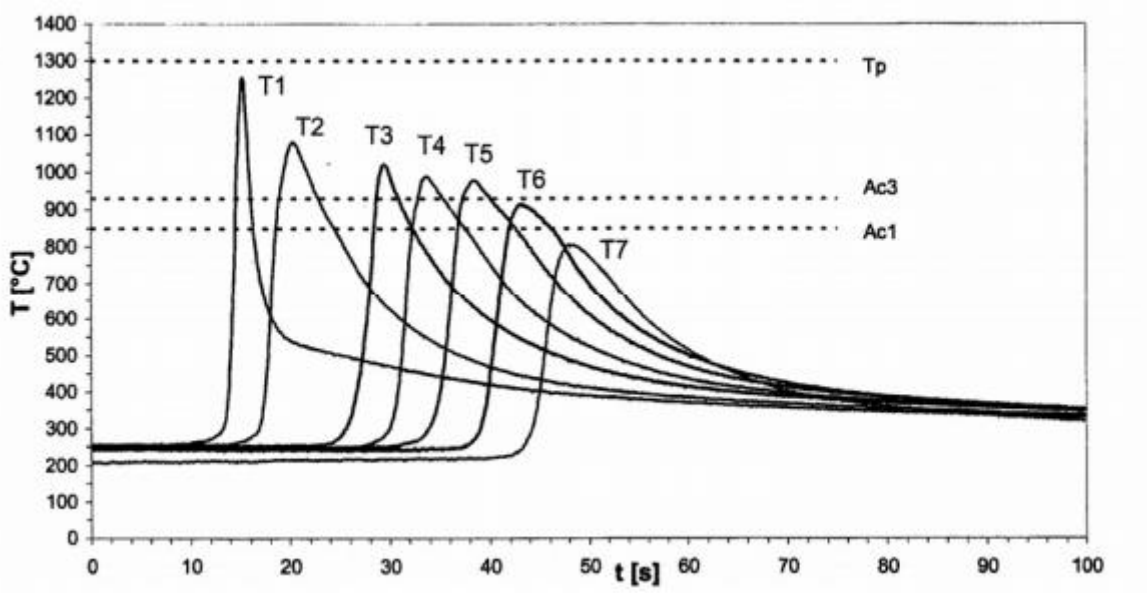
2.3 Teplotní cyklus svařování

Pomocí tak zvaných teplotních cyklů při svařování je posuzován vliv koncentrovaných zdrojů tepla na strukturu a vlastnosti svarových spojů. Znalost teplotních cyklů při svařování je dále využívána pro výzkum a vývoj svařitelnosti materiálů, studium praskavosti svarových spojů a detailní studium chování materiálů při popisu mikrostrukturních změn a změn mechanických vlastností v TOO svarových spojů. Znalost teplotních cyklů při svařování je také základním předpokladem pro modelování svařovacích procesů a teplotních polí za pomoci numerických simulací.

Znalost teplotních cyklů při svařování dále umožňuje detailní studium mikrostruktury a mechanických vlastností jednotlivých oblastí TOO svarových spojů na vzorcích definovaných průřezů pomocí simulovaných teplotních, případně teplotně – napěťových cyklů. Některé z těchto dějů je obtížné studovat přímo na reálných svarových spojích s ohledem na malé rozměry TOO a jejich částí, proto jsou využívány speciální teplotně - napěťové simulátory podmínek při svařování. Mezi ně patří zejména simulátory, jako jsou Gleeble a Thermorestor. Tato technika zkvalitňuje a usnadňuje studium svařitelnosti kovů a jejich slitin. [8]

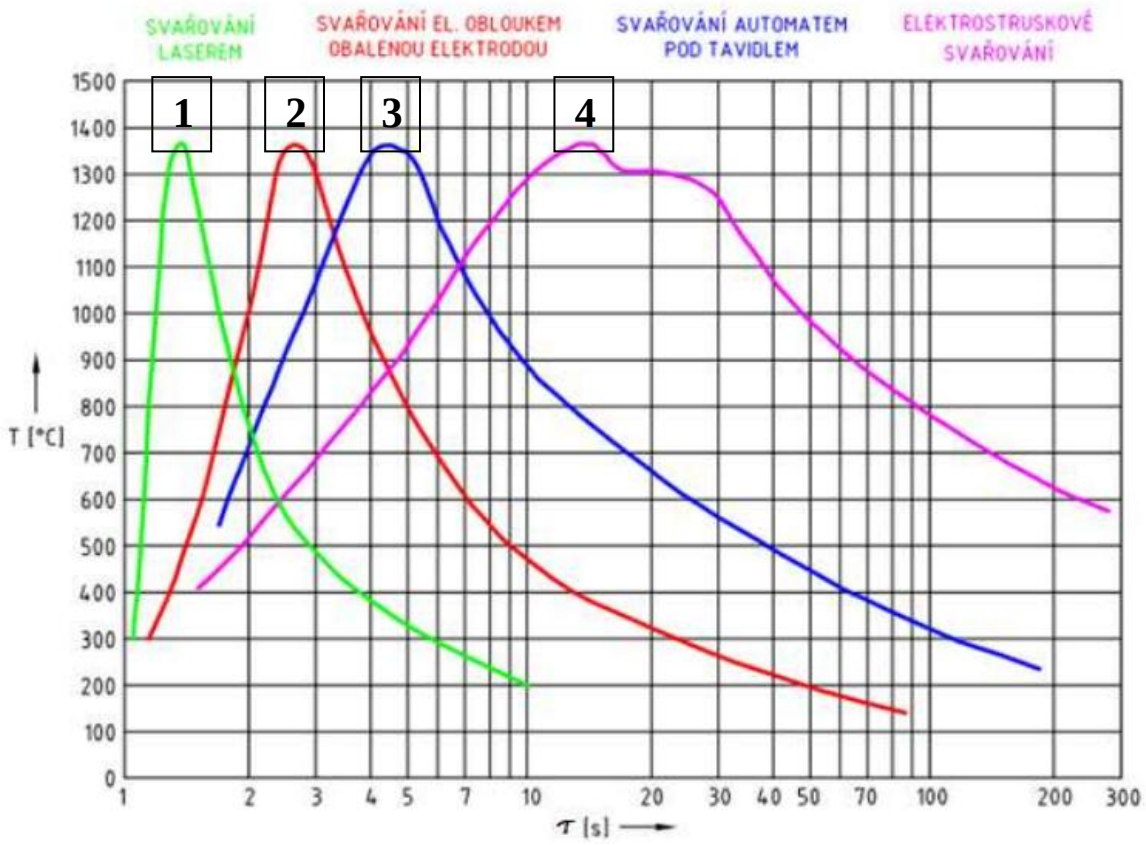
2.3.1 Teplotní cykly při svařování

Příčinou vzniku teplotního cyklu při svařování je zdroj tepla, který musí působit v oblasti svarového spoje, aby byla zajištěna termická aktivace svařovaných povrchů. Přiváděné teplo a jeho další vedení materiálem jsou pak příčinou vzniku teplotních cyklů. Teplotní cyklus vyjadřuje závislost průběhu teploty na čase v určitém místě svarového spoje. Pro představu je na obrázku 2 uveden příklad typického průběhu teplotních cyklů v TOO svarového spoje oceli P91 v různých vzdálenostech od hranice nastavení.



Obr. 2 Průběh teplotních cyklů [4]

Teplotní cyklus je charakterizován oblastí ohřevu, tedy nárůstem teploty z počáteční teploty materiálu, až na maximální teplotu. Rychlost ohřevu na maximální teplotu je dána fyzikálními vlastnostmi svařovaného materiálu, použitou technologií svařování a intenzitou (teplotním gradientem) použitého zdroje tepla. Po dosažení maximální teploty dochází k ochlazovací fázi teplotního cyklu, ve které rovněž změna teploty závisí na fyzikálních vlastnostech materiálu, použité technologii (šířka TOO), množství vneseného tepla a na podmínkách okolního prostředí. Příklady charakteristických tvarů teplotních cyklů naměřených v jednom bodě TOO při svařování různými technologiemi svařování jsou ukázány na obrázku 3. [4]



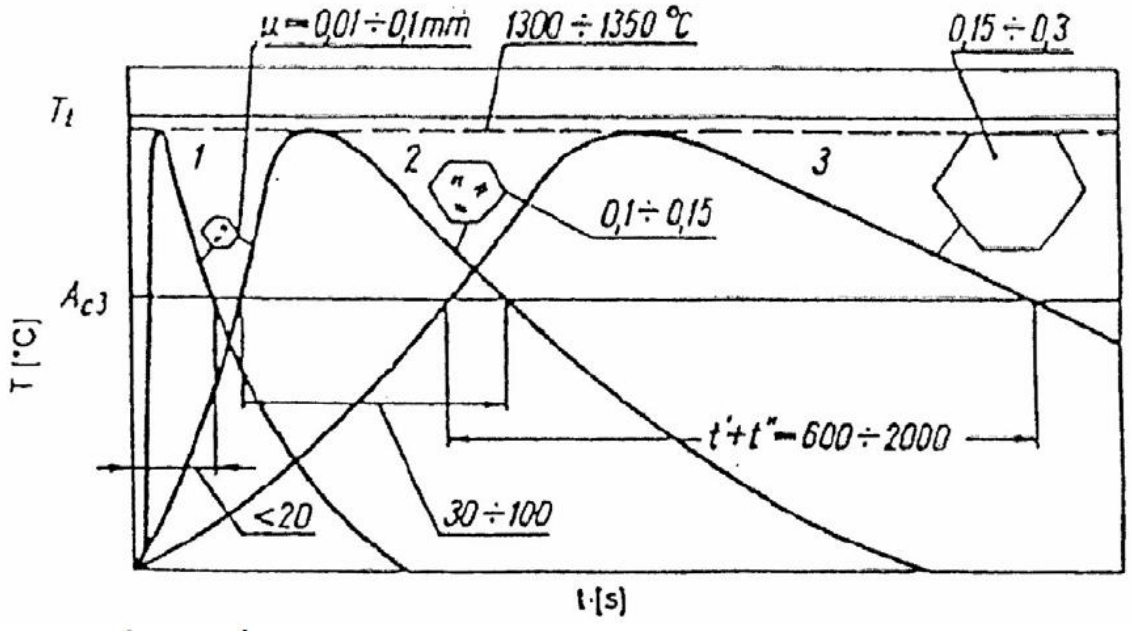
Obr. 3 Teplotní cykly podhousenkové oblasti

1 – svařování laserem, 2 – svařování el. obloukem, 3 – svařování automatem pod tavidlem, 4 – elektrostruskové svařování [3]

Protože u většiny ocelí je strukturní přeměna α→γ tepelně aktivovaným procesem, který prochází etapami nukleace zárodků a jejich růstu, působí velká rychlost ohřevu teplotní hysterezi bodů přeměny. Rychlost ohřevu tedy ovlivňuje velikost teplotní hystereze bodů přeměny a posouvá transformační body austenitizace k vyšším teplotám (o 50-300°C v závislosti na rychlosti ohřevu). Vysoká rychlost ohřevu ovlivňuje kromě teplotní hystereze bodů přeměny i kinetiku této přeměny a stupeň homogenizace tuhého roztoku. Při dostatečně vysokých rychlostech ohřevu (±1000 °C.s^{-1}) může existovat ve struktuře netransformovaný ferit ještě při teplotě 1000°C. Perlit transformuje na austenit. Chemické složení se vyrovnává difuzí uhlíku z perlitu do austenitu. Následně dochází k transformaci feritu na austenit. I když je koeficient difuze uhlíku ve feritu při těchto teplotách mnohem vyšší než koeficient difuze uhlíku v austenitu, je homogenizace austenitu i při vysokých rychlostech ohřevu dostatečná a jemné zrno struktury zůstává zachováno.

Dalším vlivem teplotního cyklu, při teplotách přesahujících 1000 °C, je růst (zhrubnutí) austenitického zrna. Intenzita a míra růstu zrna závisí na maximálně dosažené teplotě a čase, který materiál stráví nad teplotou 1000°C. Čím je maximální teplota a doba expozice

na teplotě větší, tím intenzivnější je i kinetika růstu zrna. Růst zrna v pásmu přehřátí TOO svarového spoje v závislosti na době výdrže nad teplotou přehřátí je znázorněn schematicky na obrázku 4. [4]

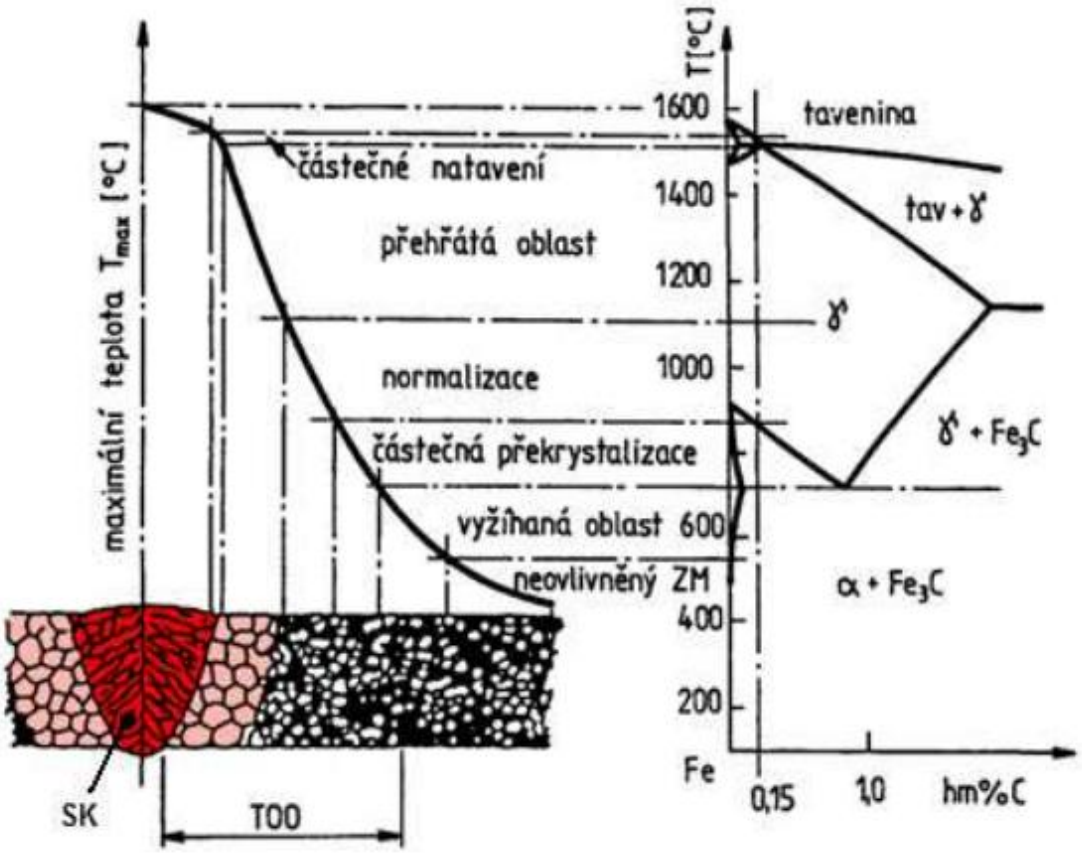


Obr. 4 Růst zrna při svařování: 1- svařování obalenou elektrodou; 2- svařování automatem pod tavidlem; 3- elektrostruskové svařování. [4]

Ochlazovací část teplotního cyklu ovlivňuje zejména strukturní přeměnu γ→α a difuzi plynů, zejména vodíku. Čím je rychlost ochlazování v oblasti transformačních teplot vyšší, tím větší je pravděpodobnost získání nerovnovážných strukturních složek (martenzit, bainit). Podle maximální dosažené teploty T_{max} lze oblasti svarového spoje ocelí rozdělit na následující části:

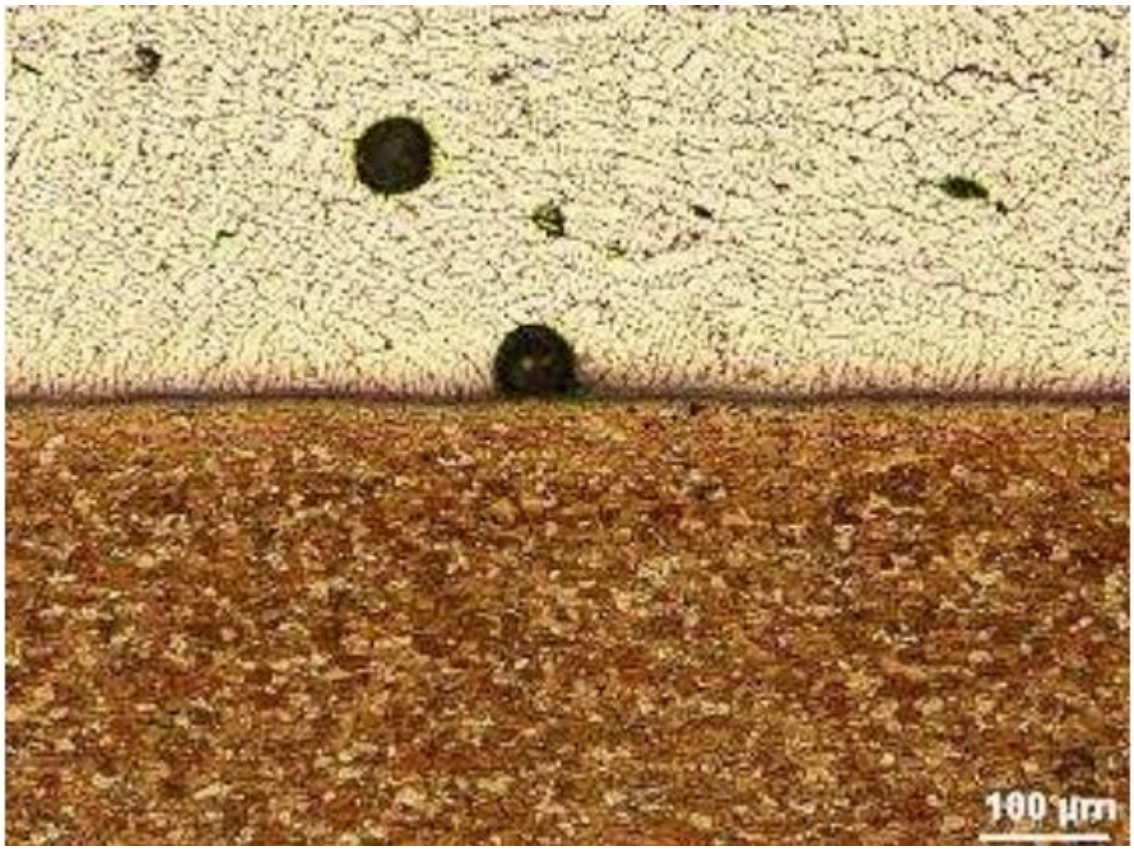
- Svarový kov — část svarového spoje zahřátá nad teplotu likvidu a tvořená buď základním materiálem, nebo promíšeným základním a přídavným materiálem s poměrem promíšení odpovídajícím zvolené metodě svařování.
- Přechodové pásmo hranice ztavení (natavení) — úzká zóna zahřátá na teplotu mezi teplotou solidu a teplotou likvidu.
- Tepelně ovlivněná oblast svarového spoje (TOO) – s následujícími dílčími pásmy:
  - ❖ Pásmo přehřátí definované rozmezím daném teplotou solidu a teplotou převyšující 1100°C.
  - ❖ Pásmo normalizace definované rozmezím teplot cca 1100°C – A_{C3}.
  - ❖ Pásmo částečné překrystalizace definované rozmezím teplot A_{C1} – A_{C3}.
  - ❖ Pásmo ovlivněné teplotami nižšími než A_{C1}. [4]

Schematické znázornění rozdělení svarového spoje na dílčí oblasti v závislosti na teplotním cyklu je ukázáno na obrázku 5.

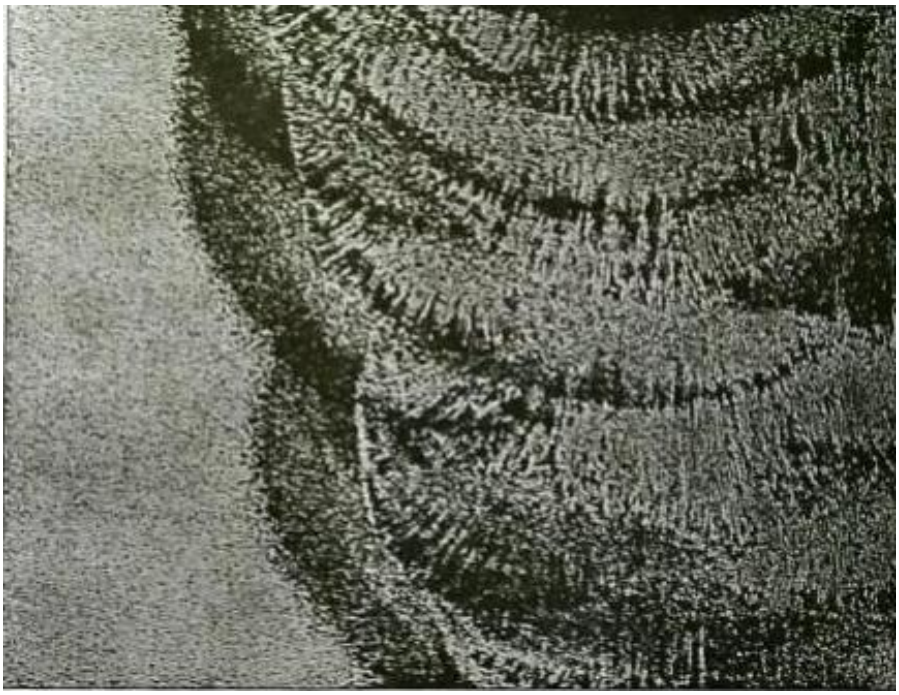


Obr. 5 Vliv teplotního cyklu svařování na strukturu svarového spoje. [7]

Jednotlivé oblasti tavných svarových spojů lze zřetelně identifikovat na makro a především na mikrovýbrusech svarových spojů (obr. 6) po naleptání a dostatečném zvětšení. Na makrovýbrusech svarových spojů (obr. 7) je zřetelně viditelná šířka tepelně ovlivněné oblasti svarových spojů.



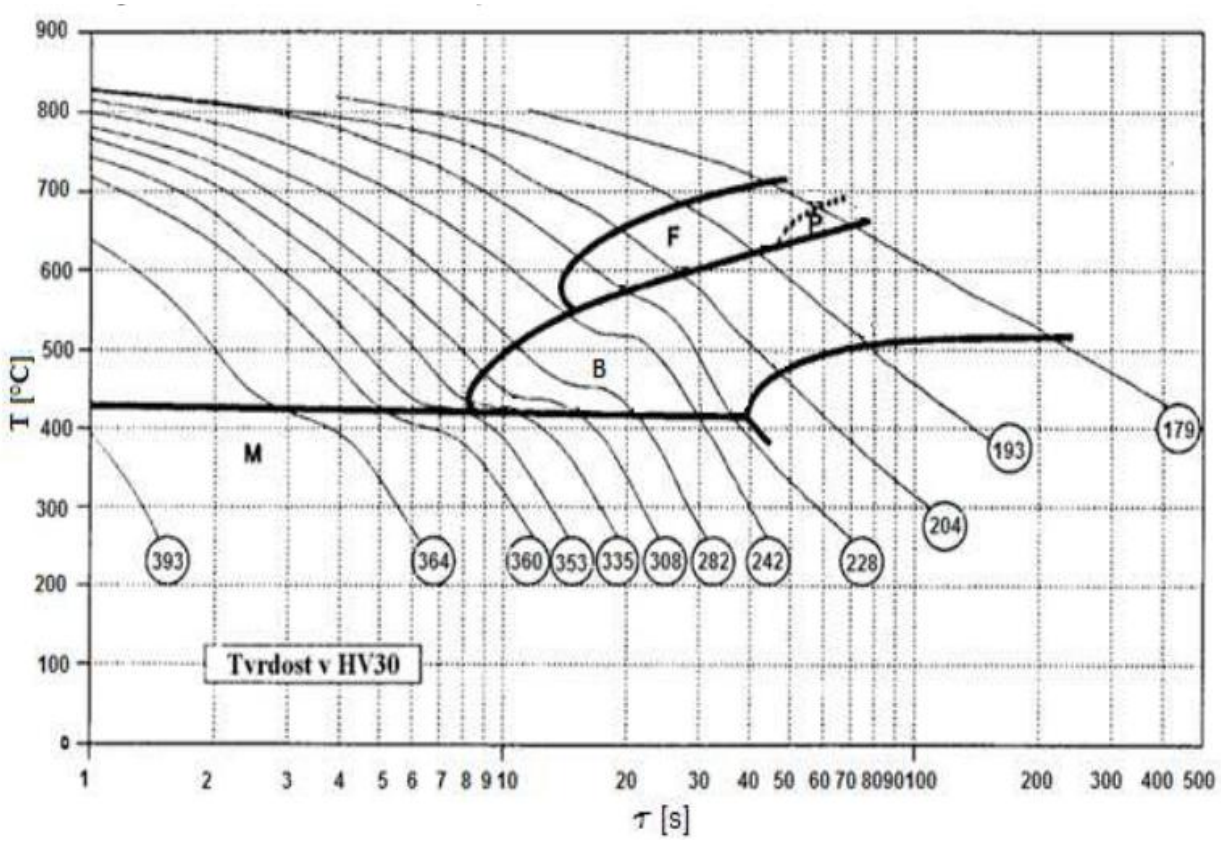
Obr. 6 Mikrofotografie – rozhraní svarový kov/ocelový základ



Obr. 7 Makrofotografie nepopuštěného svarového spoje oceli 15 229 [4]

Výslednou strukturu dosaženou v tepelně ovlivněné oblasti lze přibližně určit pomocí ARA diagramu. Klasické diagramy jsou ale sestaveny pro jiné podmínky rychlosti ohřevu na austenitizační teplotu a jinou výdrž na této teplotě. Pro přesnější odhady mikrostruktur

v TOO je nutné používat ARA diagramy konstruované pro podmínky svařování. Jsou to diagramy, které mají na vodorovné ose čas (obr. 8) nebo parametr t8/5, ten vyjadřuje rychlost ochlazování mezi teplotami 800 a 500°C. Nazýváme je ARA „in Situ“. Takovéto diagramy jsou z hlediska svařování mnohem výhodnější, protože dosažené struktury i jejich tvrdosti lépe odpovídají reálným podmínkám. Z hlediska informací o materiálových změnách jsou mnohem výhodnější ARA diagramy s vyznačenými hodnotami tvrdosti, odpovídající strukturám dosaženým při jednotlivých rychlostech ochlazování.



Obr. 8 ARA diagram pro ocel 15 216 [4]

2.4 Pásma v TOO

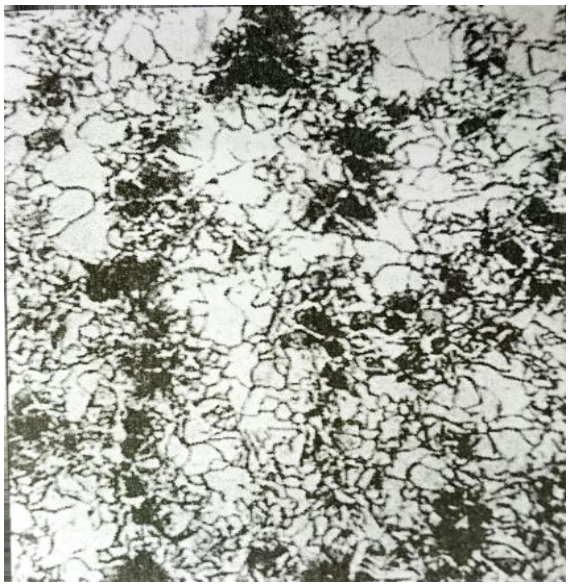
Při svařování kovů a slitin bez polymorfní přeměny (Cu, Ni, Al, austenitické vysokolegované oceli) se mikrostruktura v TOO nemění. U těchto materiálů dochází pouze ke změnám substruktury, rekrystalizaci nebo růstu zrn. Při svařování kovů a slitin s polymorfní přeměnou (např. při svařování ocelí) dochází v TOO k výrazným změnám mikrostruktury, které mají zásadní vliv na vlastnosti svarových spojů. Tavné svařování výrazně ovlivňuje mikrostrukturní charakteristiky v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) svarů svařitelných ocelí. Tyto změny závisí zejména na chemickém složení oceli, na maximální dosažené teplotě v definovaném místě TOO a na rychlosti následného ochlazování. Při

studiu mikrostruktury tepelně ovlivněné oblasti svarů svařitelných ocelí směrem od hranice ztavení do základního materiálu lze očekávat výskyt následujících pásem:

- První pásmo – rozmezí teplot A_{C1} až A_{C3}
- Druhé pásmo – rozmezí A_{C3} až hranice přehřáté oblasti
- Třetí pásmo – přehřátá oblast

2.4.1 První pásmo – rozmezí teplot A_{C1} až A_{C3}

V nízkouhlíkových nelegovaných ocelích s feriticko-perlitickou strukturou začíná transformace perlitu na austenit při teplotě vyšší než A_{C1}. Nastávající teplotní hystereze je tím větší, čím větší je rychlost ohřevu v první fázi teplotního cyklu. Na dosažené teplotě přeměny transformuje perlit postupně na austenit. Tato přeměna je závislá na rychlosti difuze, a proto je i k částečné transformaci potřebný určitý čas. Čas je ale omezený, proto transformace neprobíhá v celém objemu zrna perlitu najednou. Z již přetransformovaného austenitu difunduje uhlík do okolního dosud netransformovaného feritu. Postupující difuze by pokračovala v přeměně $\alpha \rightarrow \gamma$, až by skončila na teplotě A_{C3}. S ohledem na teplotní cyklus pásma částečné překrystalizace, však neproběhne tento proces zpravidla až do konce. Při rychlosti ochlazování odpovídající svařování elektrickým obloukem pak v tomto pásmu TOO nestačí proběhnout difuze uhlíku zpět do bývalého perlitického zrna (to doposud netransformovalo). Při takto omezené transformaci $\gamma \rightarrow \alpha$ vzniká charakteristická forma perlitu zvaná „načechraný perlit" nebo „chomáčková struktura", protože okamžitý stav struktury se rychlým ochlazením zpravidla zachová viz obr. 9.



Obr. 9 Mikrostruktura oblasti svarového spoje — tepelně ovlivněná oblast [4]

Při větších rychlostech ochlazování může dojít k zakalení zbylého perlitu na martenzit eutektoidní koncentrace popřípadě na přechodové struktury. Účinkem difuze uhlíku přes hranice zrn dochází k drobení původního zrna feritu. Zároveň lze ve struktuře pozorovat určitý objem původní netransformované struktury, která je vysoce popuštěna. V důsledku těchto změn vzniká v prvním pásmu nehomogenní struktura co do velikosti zrn i produktů transformace po ochlazení.

2.4.2 Druhé pásmo – rozmezí A_{C3} až hranice přehřáté oblasti

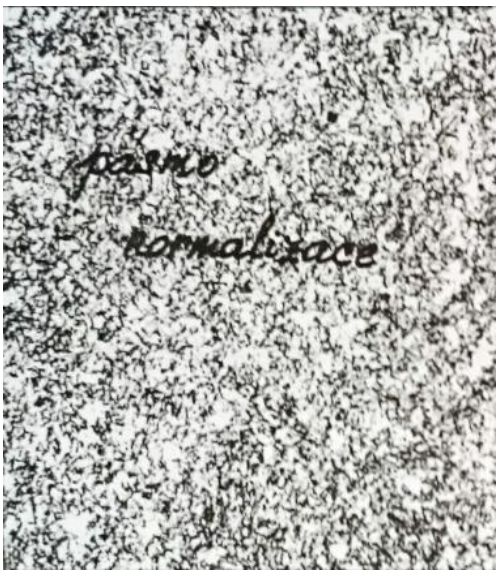
Při teplotách nad teplotou A_{C3} vzniká úplná přeměna $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$. V průběhu ohřevu je mikrostruktura v tomto pásmu čistě austenitická s polyedrickými zrny. Při ochlazování ovlivňuje mikrostrukturu dosažená rychlost, vznikat tak může celá škála mikrostruktur jako — martenzitická, bainitická, feriticko-perlitická nebo mikrostruktury smíšené. Podle rychlosti ochlazování lze z ARA, nebo In-situ diagramů určit typ vzniklé mikrostruktury. Při nižších teplotách, než je teplota přehřátí a krátkém čase setrvání nad teplotou A_{C3} nestačí austenitické zrno zhrubnout a také vznikající struktury mají obdobnou velikost zrn.

2.4.3 Třetí pásmo – přehřátá oblast

Podobně jako ve druhém, dochází také v tomto pásmu k úplné transformaci $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$. Kromě toho zde však dochází k růstu zrn a to prakticky u všech metod svařování. U běžných uhlíkových ocelí je teplota přehřátí, t.j. teplota nad kterou je pozorován růst zrna 1050°C. U nízkolegovaných ocelí je teplota přehřátí v podmínkách svařování přibližně 1200°C. U mikrolegovaných ocelí se tato teplota může zvýšit až na 1350°C. Míra růstu zrn závisí nejen na chemickém složení oceli, ale také intenzitě tepelného ovlivnění. To charakterizuje především měrný tepelný příkon, nebo hodnota vneseného tepla na jednotku délky svaru Q [$kJ.cm^{-1}$]. Podle rychlosti ochlazování mohou v tomto pásmu TOO vzniknout martenzitická struktura, bainitická struktura, feriticko-perlitická struktura, nebo struktury smíšené. Příklady mikrostruktur ve svarovém spoji jsou ukázany na obrázku 10.

a)

b)



c)

d)

e)

Obr. 10 TOO nepopouštěného svaru na oceli 15 128

a) Základní materiál

b) Pásmo přehřátí

c) Pásmo normalizace

d) Pásmo částečné překrystalizace

e) Svarový kov

[4]

2.5 Simulace teplotních dějů

Teplotní cykly při simulacích umožňují detailní studium makro a mikrostruktury i mechanických vlastností materiálů. Při simulacích dějů v TOO svarových spojů je možné získat relevantní informace o vybraných místech vzorku, které by, s ohledem na malé rozměry v TOO, nebylo možné studovat na reálných svarových spojích. Jde o metodu simulování (modelování) teplotních nebo teplotních a deformačních cyklů pomocí speciálních simulátorů, schopných simulovat reálné podmínky, k nimž dochází při svařování ve vybraných dílčích místech svaru. Tato technika zkvalitňuje a usnadňuje studium svařitelnosti kovů a jejich slitin.

Fyzikální simulace zpracování materiálů zahrnují přesné reprodukce tepelných a mechanických procesů, kterým je materiál vystaven ve výrobě nebo provozním zatížení, v laboratorním prostředí. K simulaci je používám malý vzorek skutečného materiálu. Materiál sleduje stejný tepelný a mechanický profil, jaký nastává v průběhu celého rozsahu výroby nebo konečném použití tohoto materiálu. V závislosti na schopnostech zařízení provádět simulace, mohou být výsledky velmi užitečné. Pokud je simulace přesná, mohou být výsledky snadno přeneseny z laboratoře do plného výrobního procesu.

Simulátory podmínek při svařování umožňují nasimulovat (namodelovat) různé varianty teplotních cyklů v TOO svarových spojů a superponovat je s napěťovými cykly na zkušebních tělesech, které svými rozměry odpovídají zkušebním tělesům pro zkoušky mikrostruktury, mechanických vlastností a odolnosti proti různým typům praskavosti svarových spojů. Teplotní cykly se modelují na válcových vzorcích, obdobných jako jsou pro zkoušku tahem. Používají se vzorky o průměrech 6, 8, 10 a 12 mm a čtvercové průřezy o straně 10 až 14 mm a délce 50 až 110 mm. Simulátory podmínek při svařování používají pro simulování teplotních cyklů elektrického odporového, případně indukčního ohřevu. V současnosti jsou používány například simulátory Smitweld nebo Gleeble využívající ohřevu elektrickým odporem nebo simulátor Thermorestor využívající elektrického indukčního ohřevu. [4] [10]

2.5.1 Systém Gleeble

Přístroj Gleeble je dynamické testovací zařízení, umožňující testovat širokou škálu tepelných, mechanických a metalurgických stavů materiálů. Vyhodnocené výsledky z provedených testů lze využít jak pro numerické simulace, tak pro optimalizaci technologických parametrů i celých výrobních postupů. Tento přístroj lze použít například

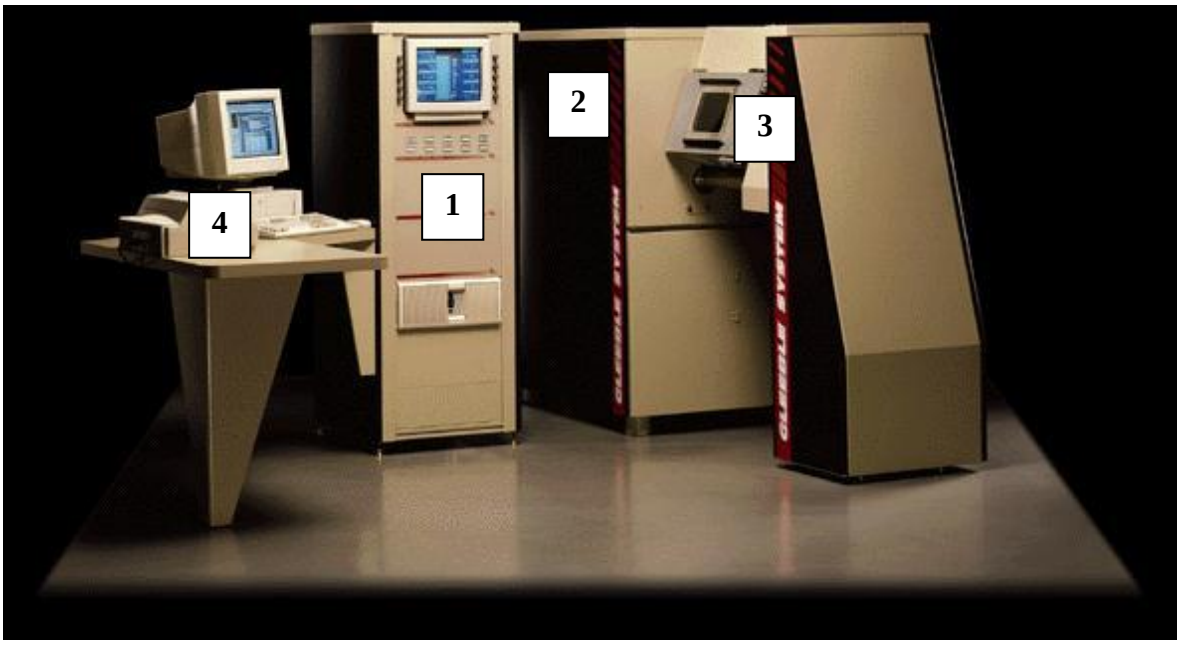
pro simulace objemového tváření a válcování za tepla, simulace svařování a tepelného zpracování, simulace kontinuálního lití, k výzkumu náchylnosti materiálů k trhlinám za tepla, ke studiím dějů probíhajících při tuhnutí, rekrystalizaci nebo zotavení, ale také pro mnoho dalších studií. Nespornou výhodou tohoto zařízení je možnost simulace téměř jakéhokoliv teplotně mechanického zatížení, které se může vyskytnout jak během zpracování, tak i při následných provozních podmínkách.

Systém Gleeble totiž, díky systému zpětného řízení, s velkou přesností reprodukuje teplotně mechanické jevy probíhající při reálném zpracování materiálů. S pomocí velmi rozsáhlé knihovny tvořené po dobu více jak padesáti let lze tento přístroj využít jak ke konkrétním výzkumným úkolům, tak i pro kontrolu produkce a vyhodnocení její kvality. Během testů jsou zaznamenávány všechny potřebné a uživatelem specifikované veličiny, přičemž některé z těchto veličin jsou zároveň využívány ke zpětnému řízení testů. [5] [10]

2.5.2 Systém Gleeble 3500

Simulátor Gleeble 3500 je teplotně-napěťový plně integrovaný testovací systém. S jeho pomocí lze studovat většinu dějů probíhajících v kovových materiálech za vyšších teplot. Umožňuje testování vzorků s různou geometrií a to při dosažení maximální síly v tahu nebo tlaku až 100 kN. Konstrukce zařízení umožňuje použití vzorků do průměru 20 mm nebo vzorků s plochou průřezu do 400 mm^2.

Systém Gleeble je složen ze tří hlavních jednotek a to ovládacího (řídícího) panelu, hlavní jednotky (s hydraulickým systémem a transformátorem pro ohřev odporovým teplem) a vlastního testovacího zařízení (obr. 11), které je výměnné a které je voleno s ohledem na realizované testy. Teplotní systém dosahuje homogenního rozložení teploty, kterou dokáže držet v rovnovážném stavu. Maximální rychlost zahřívání vzorku může dosáhnout až 10000 $°C \cdot s^{-1}$. U vzorků malých průměrů lze dosáhnout také velice vysokých rychlostí ochlazování na povrchu a to až 6000 $°C \cdot s^{-1}$. Maximální zdvih systému je 100 mm a největší rychlost pohybu je u tohoto zařízení 1 $rn \cdot s^{-1}$. [5]



Obr. 11 Zařízení Gleeble 3500 1-ovládací panel, 2-hlavní jednotka, 3-testovací zařízení, 4-řídící počítač [10]

Oblasti využití systému Gleeble jsou velmi rozsáhlé. Je vhodný na tyto aplikace:

Simulace svařovacích procesů:

- Děje probíhající v tepelně ovlivněné oblasti.
- Test maximální teploty (solidu) při níž se pevnost na hranicích zrn blíží nule.
- Test zjišťující náchylnost k trhlinám, zejména k trhlinám za tepla.
- Simulace vlivu různých metod svařování na základní materiál, včetně aplikace vlivu několikanásobných teplotních cyklů.
- Simulace zotavení a rekrystalizace.

Únavové testy:

- Teplotní únava materiálu.
- Tepelně mechanická únava materiálu

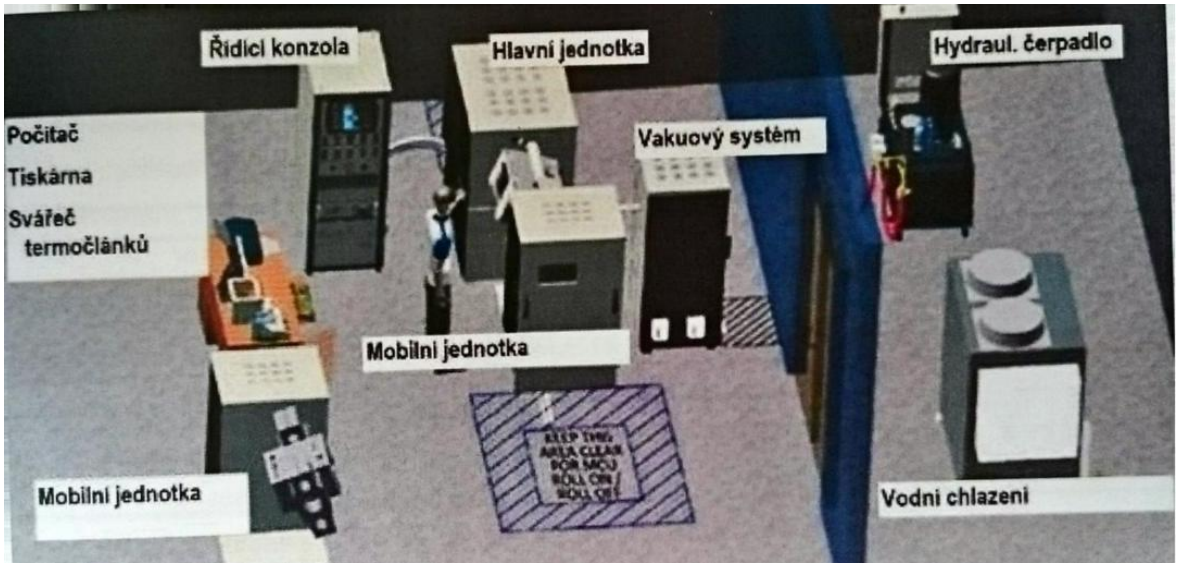
Simulace tepelných procesů a stanovení mechanických veličin:

- Pevnost v tahu za vyšších teplot.
- Pevnost v tlaku za vyšších teplot.
- Testování a simulace plošných zatížení.
- Simulace válcování za tepla.
- Simulace kontinuálního lití

Kromě nich lze ale systém Gleeble využít i pro studium jevů týkajících se chování materiálů při zvýšených teplotách a teplotních cyklech, jako jsou například relaxace, difúze, tání a tuhnutí, růst zrna, precipitace, či jakékoliv způsoby tepelného zpracování. [6]

2.5.3 Základní součásti systému Gleeble

Zařízení Gleeble je složeno z jednotlivých částí: hlavní jednotka, ovládací panel, hydraulické čerpadlo, mobilní jednotka pro teplotně-mechanické testy, vakuový systém, jednotka chladícího systému a kondenzátorová svářečka pro přivařování termočlánků. Rozložení komponentů je vyobrazeno na obrázku 12. V hlavní jednotce se nalézá většina hydraulického systému sloužícího k pohonu a ovládání zařízení, zároveň je k ní připojena i mobilní jednotka. Ovládací panel umožňující jednoduché ovládání a řízení systému Gleeble v sobě ukrývá zabudovaný počítač s potřebným hardwarem i softwarem. Další součástí je zvlášť uložené hydraulické čerpadlo, které dodává tlak hydraulickému systému v hlavní jednotce, která generuje potřebné tahové i tlakové síly. Důležitou součástí je také vakuový systém, ten odsává vzduch z testovací komory. Vakuum se používá z důvodu ochrany jak testovaného vzorku, tak i celého vnitřního vybavení testovací komory. Používané čerpadlo dokáže vytvořit hrubé vakuum do hodnoty 10^{-1} Torr a difúzní čerpadlo pak umožní po dostatečné době získat vakuum větší než 10^{-4} Torr. Vakuový systém též umožňuje zpětné plnění inertním nebo jiným ochranným plynem, jelikož od teplot nad 1200°C je složité udržet dostatečný stupeň vakua. Posledním prvkem je chladící zařízení, které je při používaných teplotách nezbytné. [5]



Obr. 12 Rozmístění komponentů na pracovišti Gleeble [5]

2.5.4 Systém ohřevu a ochlazování

Systém nabízí širokou nabídku teplotních profilů, které jsou důležité pro úspěch tepelně mechanických testů a fyzických simulací. Systém umožňuje použití vysokých rychlostí ohřevu a chlazení, která závisí na materiálu a rozměrech vzorku, typu použitých vysokoteplotních čelistí a na volné délce vzorku mezi těmito čelistmi. [6]

Způsob ohřevu přímý odpor se zpětnou vazbou na řízení

Rozsah teplot 20 až 1700 °C, v závislosti na zvoleném typu řídícího termočlánku

Rychlost ohřevu až 10000 $°C \cdot s^{-1}$

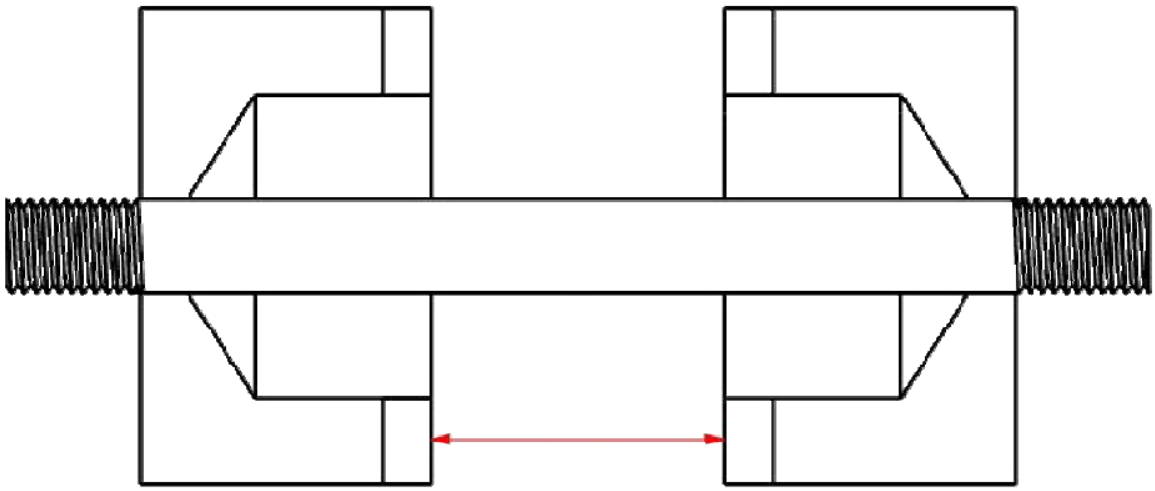
Rychlost ochlazování až 10000 $°C \cdot s^{-1}$

Přesnost řízení ± 1 °C v ustáleném stavu

Systém umožňuje najednou použít maximálně 4 termočlánkové kanály, případně kombinaci 3 termočlánků a jednoho pyrometru. [10]

2.5.5 Teplotní pole vzorku

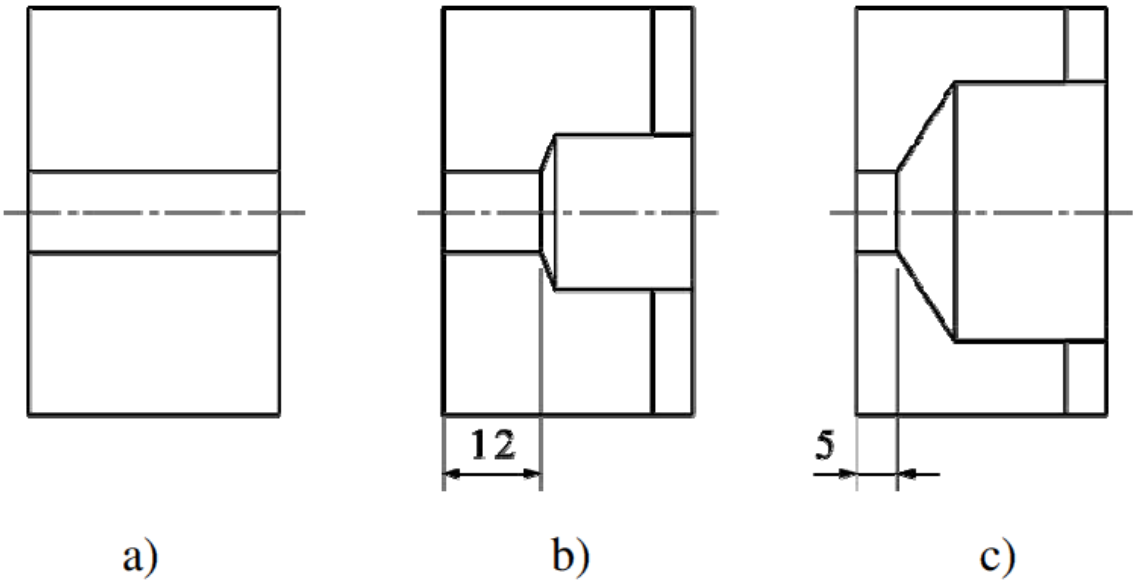
Teplotní pole není při ohřevu v přístroji Gleeble nikdy rovnoměrné. Závislé je na volné délce vzorku (obr. 13), rychlosti ohřevu a ochlazování, materiálu a typu použitých čelistí a teplotní vodivosti materiálu vzorku. Ve vzorku lze dosáhnout rozdílných teplotních gradientů použitím různých druhů vysokoteplotních čelistí a volbou různé volné délky vzorku. [6]



Obr. 13 Volná délka vzorku [6]

Vysokoteplotní upínací čelisti se používají pro upnutí vzorku v zařízení. Na TUL jsou k dispozici čelisti pro kruhovité, čtyřhranné a ploché vzorky. Čelisti jsou vyráběny z různých materiálů, nejčastěji se však používají měděné čelisti nebo čelisti z vysokolegované

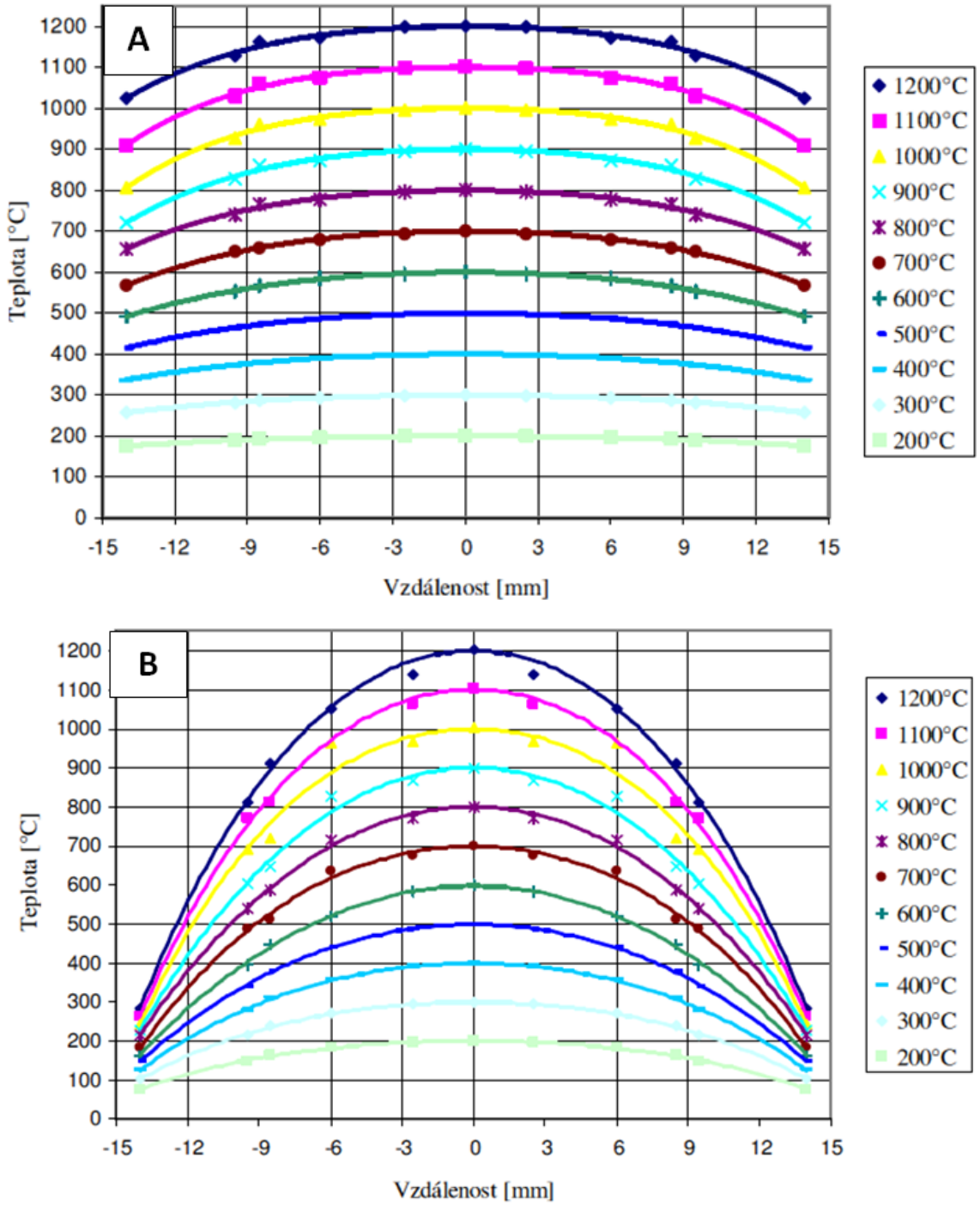
austenitické oceli (AISI 304). Důvodem je tepelná vodivost, která je u těchto materiálů velice rozdílná a to se odráží na strmosti teplotního gradientu. Čelisti se vyrábí s plným nebo částečným kontaktem, tak jak je ukázáno na obrázku 14.



Obr. 14 Čelisti pro upnutí vzorku

a) Čelisti s plným kontaktem b) c) Čelisti s částečným kontaktem [6]

U každého typu čelistí dochází k jiné rychlosti ochlazování a jiné je i teplotní pole na vzorku. Čím menší je kontakt se vzorkem, tím pomalejší je odvod tepla ze vzorku a teplotní pole je rovnoměrnější, jak můžeme pozorovat z grafů na obrázku 15.

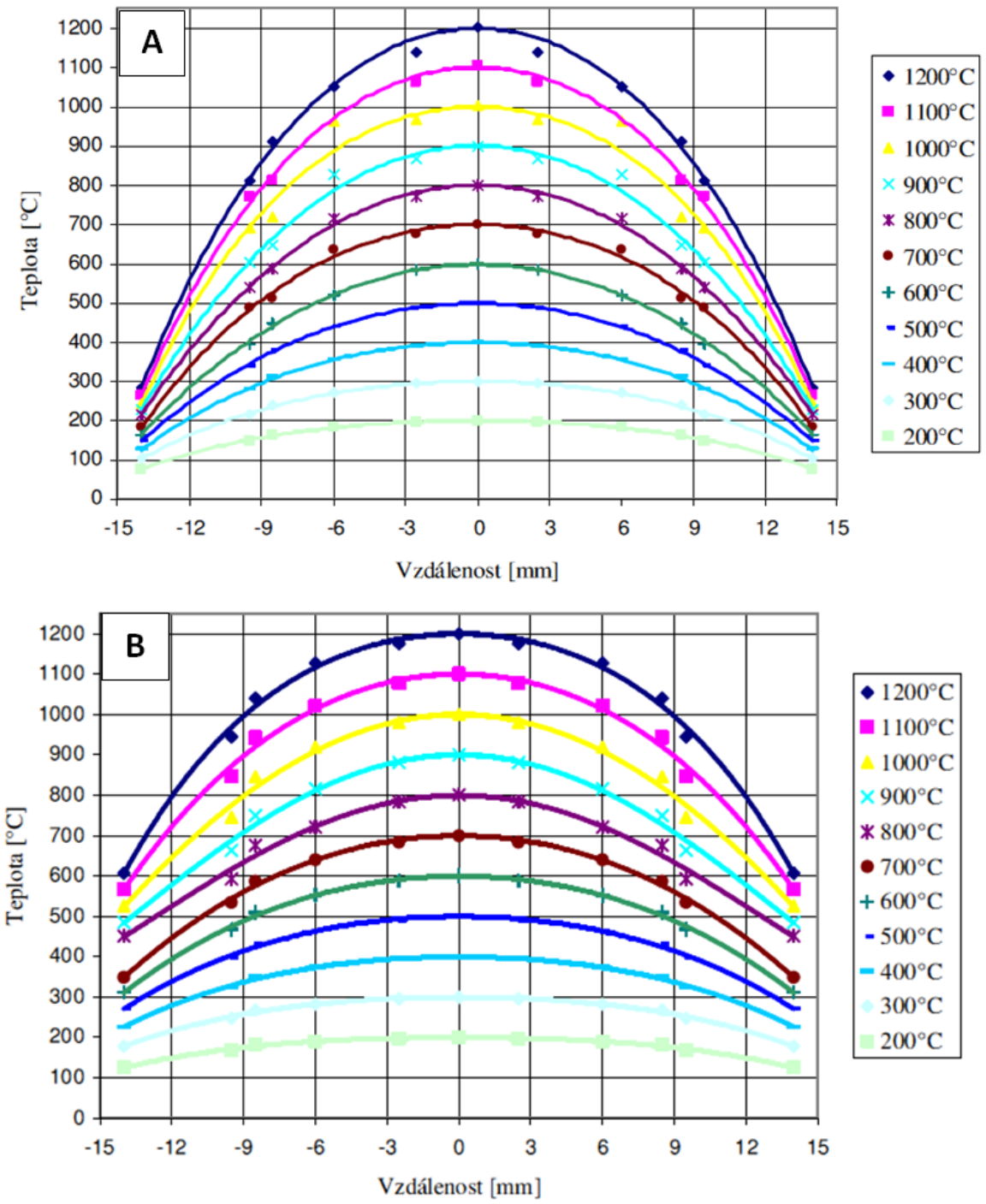


Obr. 15 Porovnání teplotních polí vzorku z oceli S355J2

A – Teplotní pole při použití měděných čelistí s částečným kontaktem

B – Teplotní pole při použití měděných čelistí s plným kontaktem [6]

Porovnáním čelistí z materiálu s plným kontaktem bylo zjištěno (obr. 16), že ocelové vysokolegované čelisti AISI 304 mají rovnoměrnější teplotní pole než měděné čelisti. Je to dáno rozdíly teplotních vodivostí mezi oběma materiály čelistí.

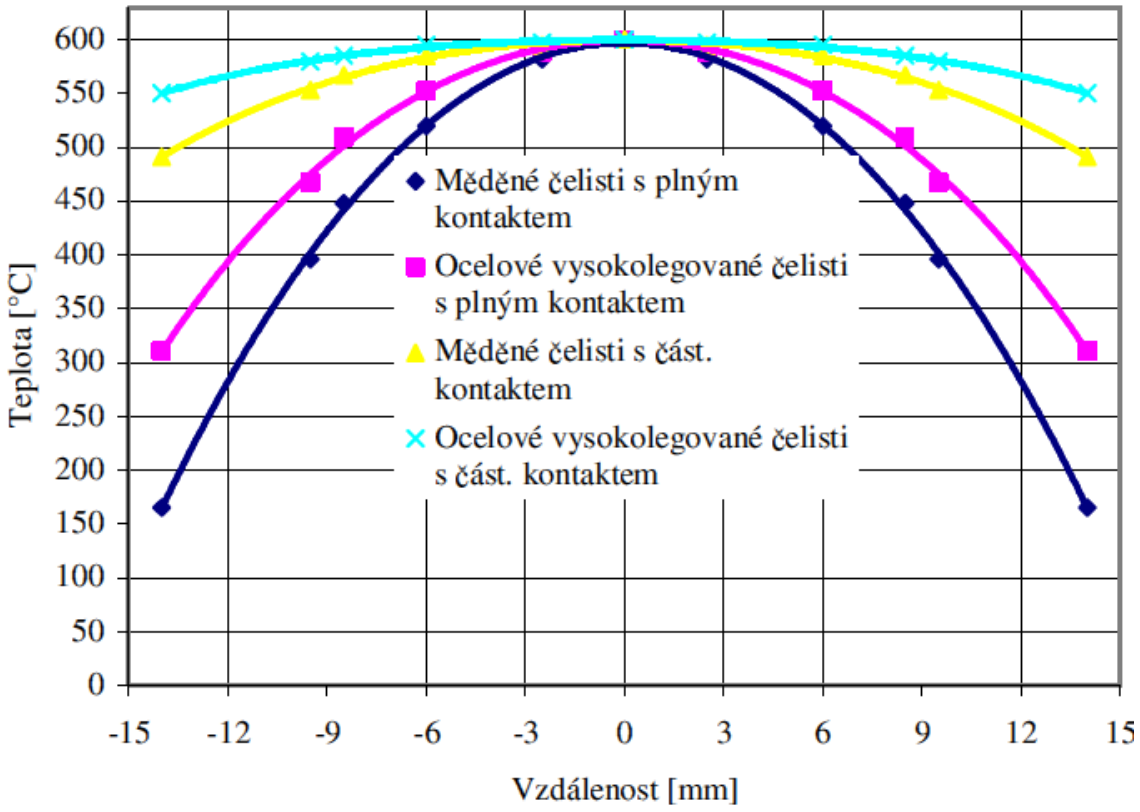


Obr. 16 Porovnání teplotních polí vzorku z oceli S355J2

A – Teplotní pole při použití měděných čelistí s plným kontaktem

B – Teplotní pole při použití ocelových vysokologovaných čelistí s plným kontaktem [6]

Na obrázku 17 můžeme vidět porovnání čtyř typů čelistí, které se na TUL nejčastěji používají.



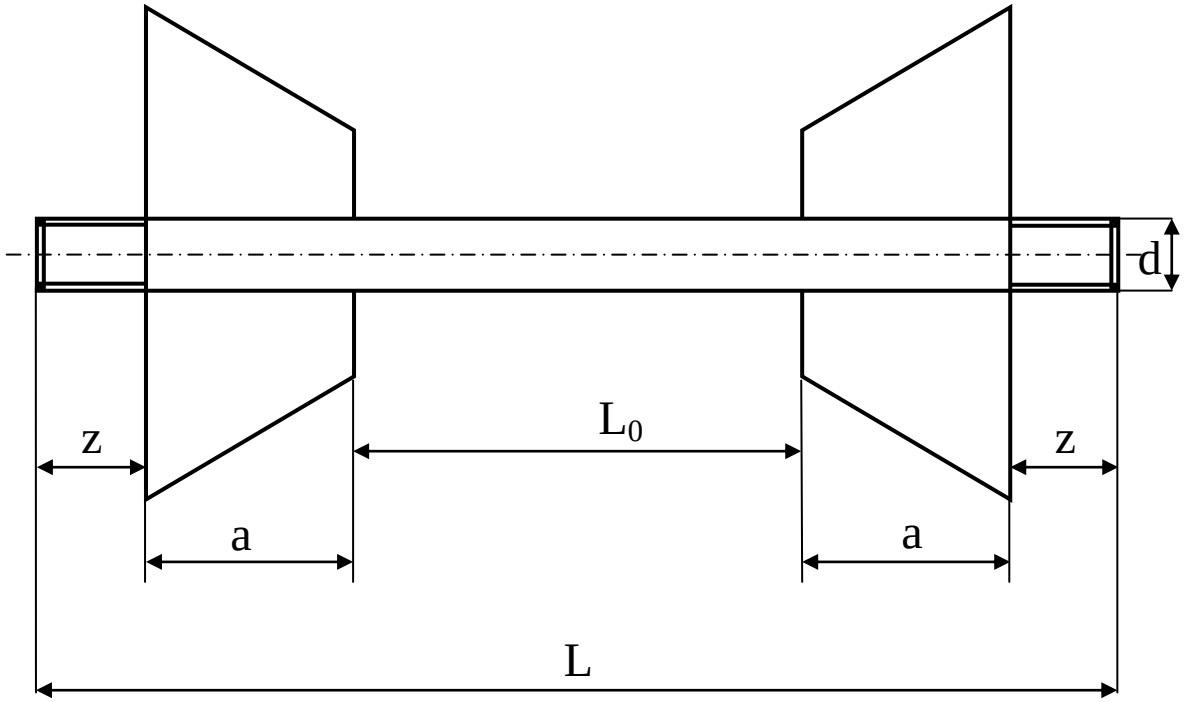
Obr. 17 Rozložení teplot ve volné části vzorku z oceli S355J2 při teplotě 600°C za použití různých typů čelistí [6]

3. Experimentální část

Zadáním a tedy i cílem bakalářské práce bylo zjistit jaký vliv má rozdílná volná délka vzorku a různá rychlost ohřevu na teplotní gradient v testovaném vzorku. Pro experiment byla zvolena běžná konstrukční ocel S355J2. Z důvodu obdobného součinitele tepelné vodivosti u konstrukčních ocelí tak bude možné zjištěné výsledky aplikovat i na další typy ocelí. Teplotní gradienty byly testovány pro čtyři různé délky vzorku a také pro různé rychlosti ohřevu vzorku.

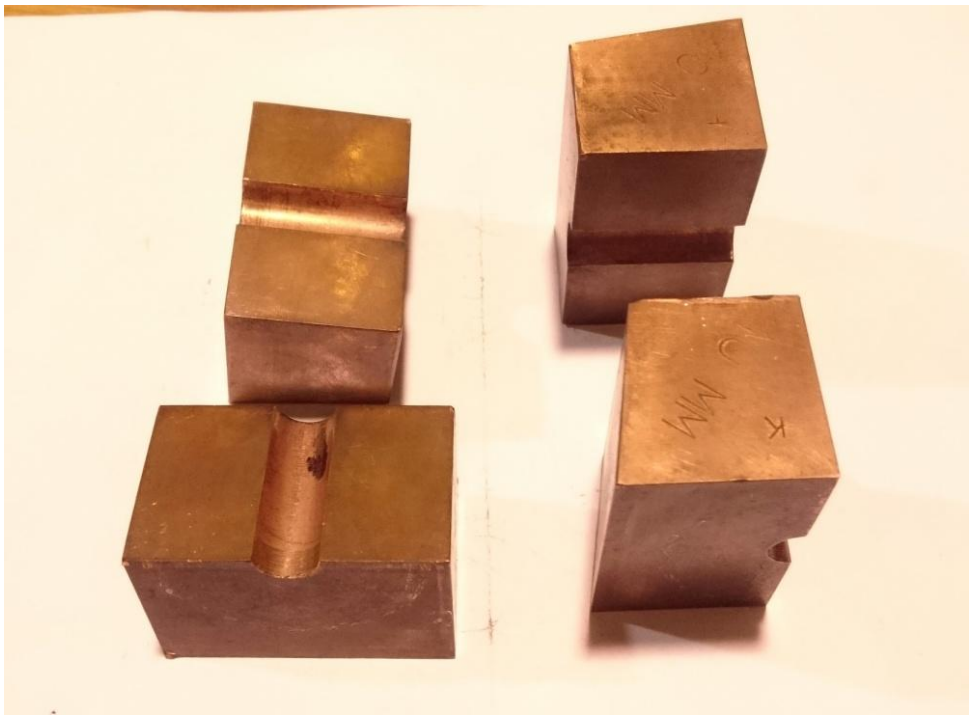
3.1 Návrh experimentů

Pro experimenty byly použity vzorky kruhového průřezu o průměru 10 mm. Tak jak je ukázáno na obrázku 18 pro volné délky L_0 = 9, 19, 29, 39 mm byly připraveny vzorky o celkových délkách: 101, 111, 121 a 131 mm.



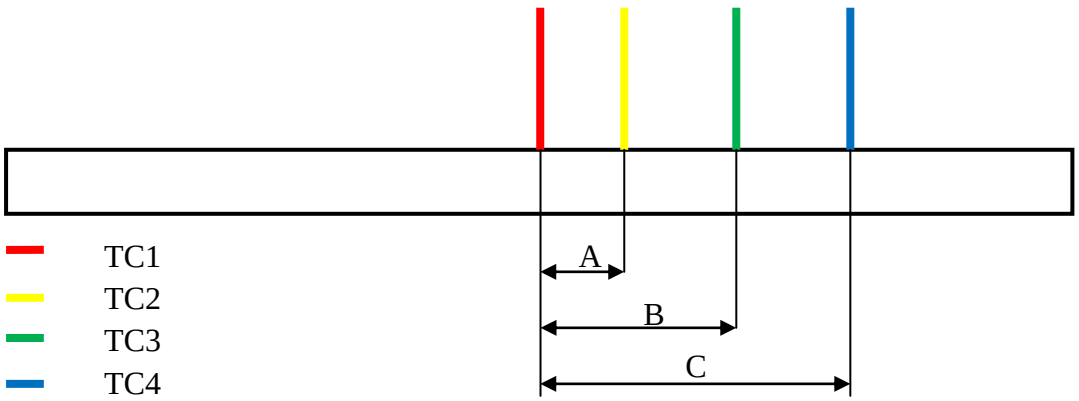
Obr. 18 Rozměry zkušebního vzorku: a – délka čelistí, z – délka závitu, d – průměr vzorku, L – celková délka vzorku, L_0 – volná délka vzorku

U každého vzorku byly na koncích zhotoveny závity o délce 15 mm, ty slouží k upevnění do čelistí simulátoru. Pro všechny měřené vzorky byly použity měděné čelisti s plným kontaktem (obr. 19) o délce 30,5 mm.



Obr. 19 Měděné čelisti s plným kontaktem

Pro snímání teplot v různých částech TOO byly použity 4 termočlánky, z nichž jeden tzv. řídící je umístěm na středu vzorku a zbylé tři v různých vzdálenostech od něj (obr. 20), přičemž se počítá se symetrickým průběhem teplot na obě strany od středu. Řídící termočlánek se vyznačuje tím, že je podle něj řízený ohřev. Rozmístění termočlánků bylo zvoleno v závislosti na volné délce vzorku. Vzdálenosti jednotlivých termočlánků od středu vzorku jsou uvedeny v tabulce 1.

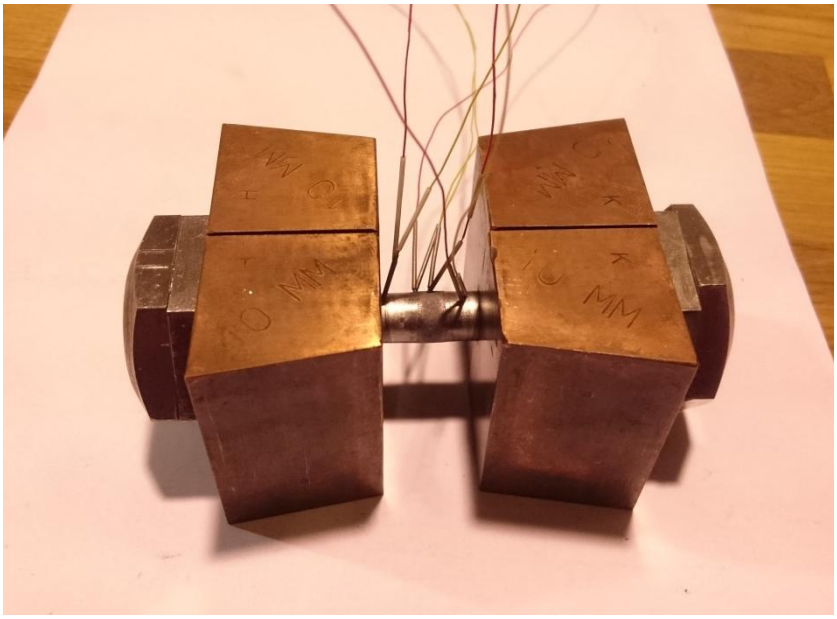


Obr. 20 Rozmístění termočlánků na zkušebním vzorku

Tab. 1. Rozložení termočlánků na vzorcích

Volná délka [mm]	A [mm]	B [mm]	C [mm]
9	1,3	2,6	4,0
19	3,0	6,0	9,0
29	4,5	9,0	13,5
39	6,2	12,4	18,6

Termočlánky byly ke vzorku přivařeny pomocí kondenzátorové svářečky, přičemž ke snímání byly použity termočlánky typu K. Ty byly navařeny co nejblíže k sobě a opatřeny keramickými izolátory z důvodu zamezení styku neizolovaných částí termočlánkových drátů. Po navaření termočlánků byly na vzorek našroubovány matice sloužící k zajištění dostatečného kontaktu mezi vysokoteplotními čelistmi a upínacím systémem přístroje Gleeble. Sestava před vložením do simulátoru je ukázána na obrázku 21. Takto je vzorek připraven k vložení do pracovní komory.



Obr. 21 Připravený vzorek

Kromě toho byl navržen plán experimentálních testů, tak jak je uvedeno v tabulce 2. Pro testování byly zvoleny čtyři různé volné délky vzorku (9 - 39 mm) a tři různé rychlosti ohřevu (1 až 100 °C.s^{-1}). Gradienty pak byly sledovány v rozmezí teplot od 100 do 1200 °C s teplotním krokem 100 °C. Přičemž každý test byl zopakován z důvodu zjištění případných odchylek měření.

Tab. 2 Plán experimentálních testů

Rychlost ohřevu [°C.s^{-1}]	Volná délka vzorku [mm]			
	9	19	29	39
1	X	X	X	X
10	X	X	X	X
100	X	X	X	X

3.2 Tvorba programu

Řídící programy pro experimenty realizované v přístroji Gleeble jsou tvořeny v prostředí QuickSim2. Jde o tabulkový program (obr. 22), kde jsou nastaveny veličiny, které chceme sledovat tj. programovaná i reálně změřená teplota pomocí termočlánků TC1 až TC4, délková roztažnost vzorku měřená průtahoměrem i příčníkem a samozřejmě také čas a síla působící na vzorek. Jako řídící termočlánek byl zvolen termočlánek s označením TC1. Dalším krokem je nastavení vzorovací frekvence, která je zvolena v závislosti na rychlosti ohřevu, případně na rychlosti ochlazování. Na začátek programu bylo zvoleno 5 sekund pro vynulování a ustálení systému. Následně byla nastavena teplota a čas, za který je třeba teploty dosáhnout. Teplota pro všechny testy byla zvolena na 1200 °C. Čas bylo třeba dopočítat podle požadované rychlosti ohřevu. Pro naše testy byly zvoleny rychlosti 1 °C·s^{-1}, 10 °C·s^{-1} a 100 °C·s^{-1}, potom tedy např. pro rychlost 10 °C·s^{-1} a zmiňovanou teplotu 1200 °C bude tento čas 118 sekund. Dále je nastavena výdrž na teplotě po dobu 20s pro ustálení teploty. Po výdrži nastává volné chlazení, což bylo v programu ošetřeno vypnutím ohřevového transformátoru během času 0,01 s. Nakonec byl nastaven čas na zaznamenávání hodnot při volném chlazení. Tento čas byl stejný pro všechny vzorky a to 240 s.

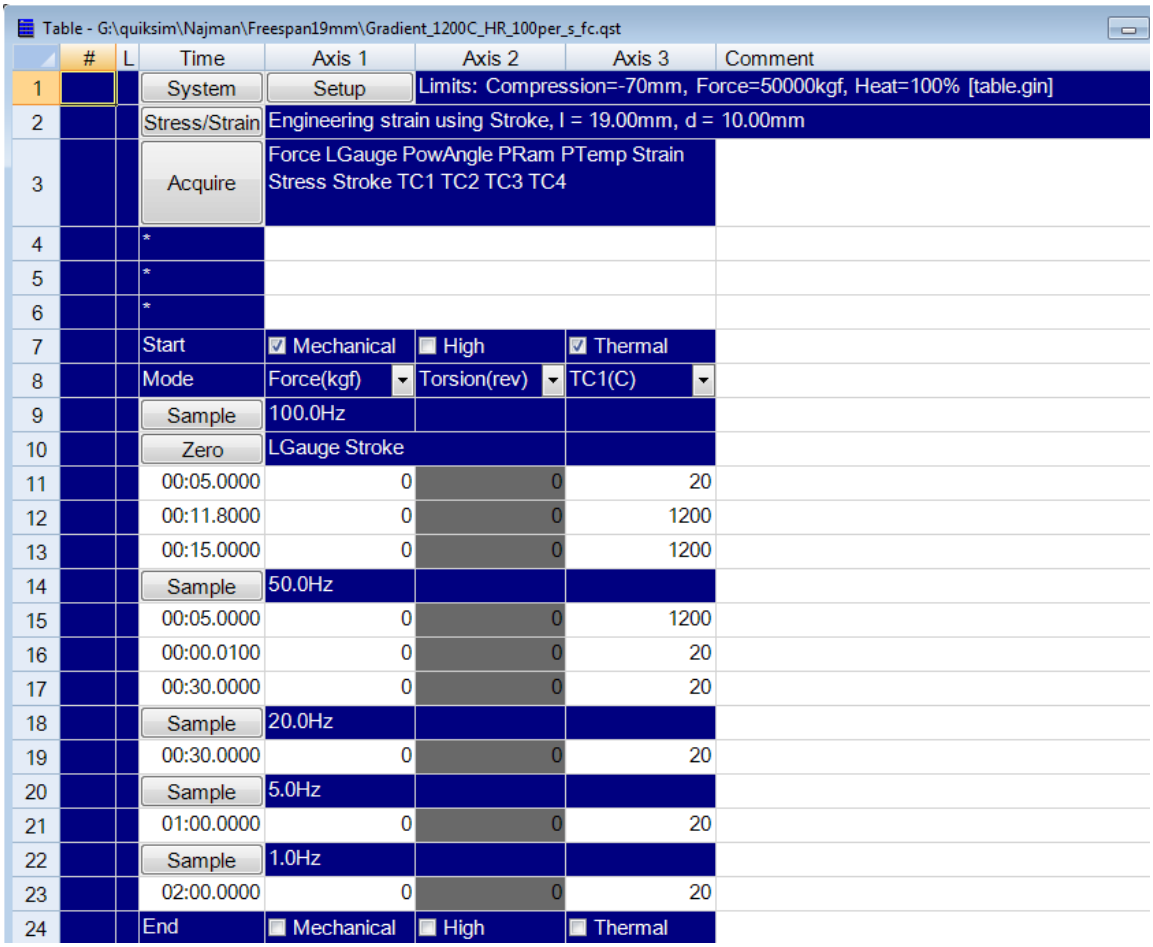


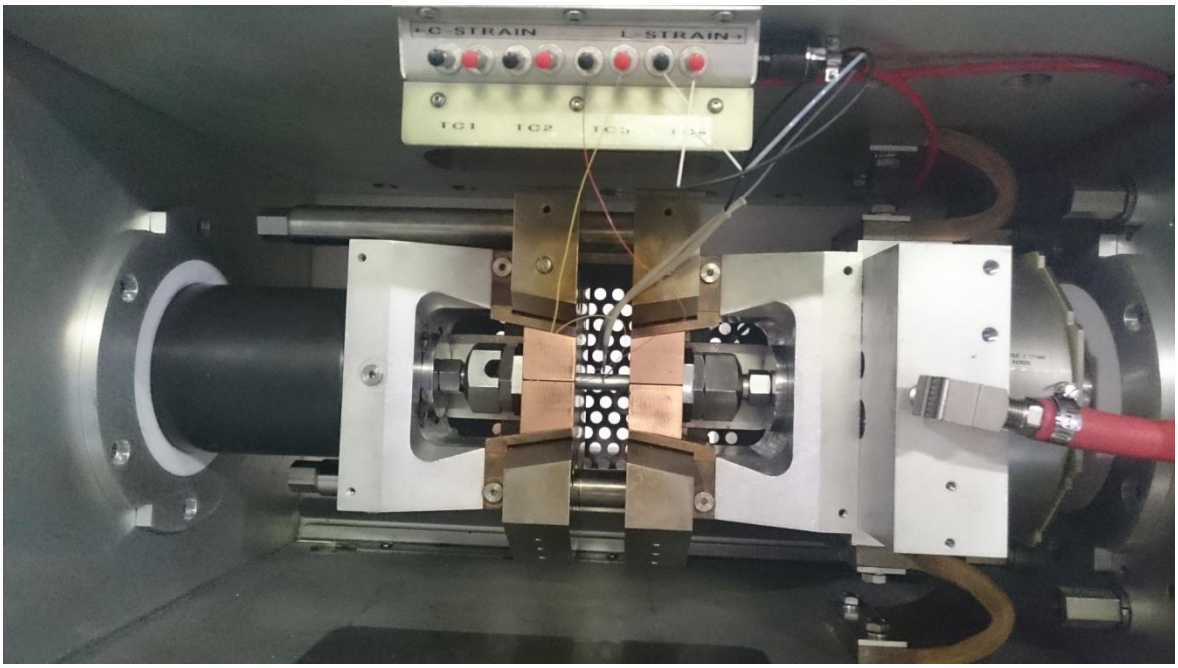
Table - G:\quiksim\Najman\Freespan19mm\Gradient_1200C_HR_100per_s_fc.qst

	#	L	Time	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Comment
1			System	Setup	Limits: Compression=-70mm, Force=50000kgf, Heat=100% [table.gin]		
2			Stress/Strain	Engineering strain using Stroke, l = 19.00mm, d = 10.00mm			
3			Acquire	Force LGauge PowAngle PRam PTemp Strain Stress Stroke TC1 TC2 TC3 TC4			
4			*				
5			*				
6			*				
7			Start	☑ Mechanical	☐ High	☑ Thermal	
8			Mode	Force(kgf)	Torsion(rev)	TC1(C)	
9			Sample	100.0Hz			
10			Zero	LGauge Stroke			
11			00:05.0000	0	0	20	
12			00:11.8000	0	0	1200	
13			00:15.0000	0	0	1200	
14			Sample	50.0Hz			
15			00:05.0000	0	0	1200	
16			00:00.0100	0	0	20	
17			00:30.0000	0	0	20	
18			Sample	20.0Hz			
19			00:30.0000	0	0	20	
20			Sample	5.0Hz			
21			01:00.0000	0	0	20	
22			Sample	1.0Hz			
23			02:00.0000	0	0	20	
24			End	☐ Mechanical	☐ High	☐ Thermal	

Obr. 22 Příklad programu pro rychlost ohřevu 100 °C·s^{-1}

3.3 Realizace experimentu

Připravený vzorek s navařenými termočlánky a měděnými čelistmi s plným kontaktem byl vložen do upínacího systému přístroje Gleeble. Zároveň byl pomocí rozpěrných šroubů zajištěn dostatečný kontakt mezi Cu čelistmi a upínacím systémem tak, jak je ukázáno na obrázku 23. Termočlánky se zapojí tak, aby zapojení odpovídalo přiřazenému označení v programu. Po uzavření komory následuje vakuování pracovní komory přibližně na hodnotu 2,2·10^{-3} Torr. Poté může být spuštěn test. V průběhu testu byly na obrazovce řídící jednotky kontrolovány hodnoty teplot jednotlivých termočlánků. V případě nesrovnalostí by byl test přerušen. Stejným způsobem bylo testování provedeno pro všechny volné délky i rychlosti ohřevu.



Obr. 23 Způsob upevnění testovaného vzorku v komoře přístroje Gleeble 3500

3.4 Naměřené hodnoty

Na každém vzorku byly realizovány tři testy s různou rychlostí ohřevu, přičemž každé měření bylo zopakováno. Celkově tak bylo v rámci měření provedeno 24 experimentálních testů. Naměřené a zaznamenané hodnoty byly použity k vyhodnocení teplotních gradientů v podobě grafů zobrazujících rozložení teploty v podélném směru vzorku a to jak při ohřevu tak při volném ochlazení.

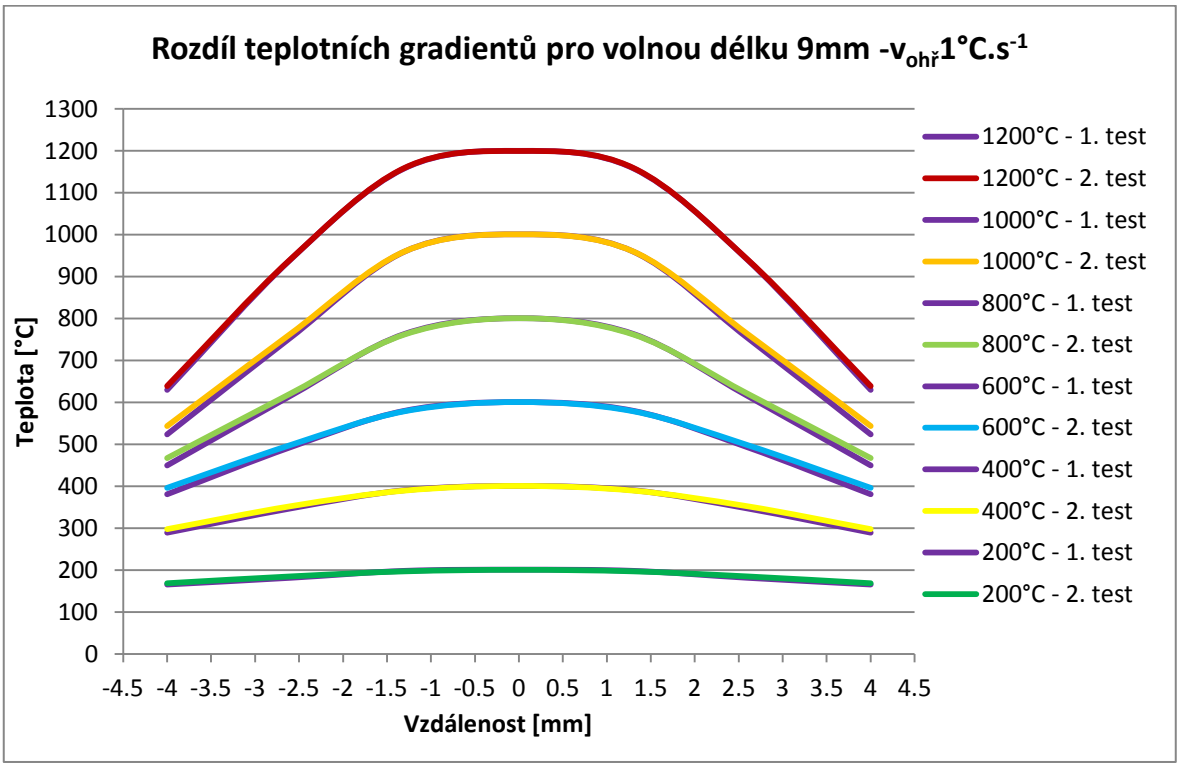
3.4.1 Vyhodnocení experimentů (volná délka vzorku 9 mm)

Na základě údajů změřených jednotlivými termočlánky byly u vzorku s volnou délkou 9 mm a při rychlosti ohřevu 1 °C.s^{-1} zjištěny hodnoty uvedené v tabulce 3. V tabulce jsou uvedeny hodnoty z obou měření. Na obrázku 24 jsou graficky ukázány průběhy teplotních gradientů pro hodnoty uvedené v tabulce 3.

Ze zjištěných hodnot je patrné, že teploty změřené termočlánky TC3 a TC4 se v některých bodech liší. Maximální rozdíly při této rychlosti ohřevu však nepřesáhly 3 %. Grafické vyhodnocení obou měření pro rozsah teplot 200 až 1200 °C s teplotním krokem 200 °C je ukázáno na obrázku 23. Teplotní rozdíl při teplotě 600 °C je 55 °C.mm^{-1} a u teploty 1200 °C 142,65 °C.mm^{-1}.

Tab. 3 Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok a pro volnou délku vzorku 9 mm při rychlosti ohřevu 1 °C.s^{-1}, (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	1,3	2,6	4,0	0	1,3	2,6	4,0
25	23.1	22.9	23.2	23.6	24.8	24.6	25.0	25.2
100	100.6	99.7	93.4	90.4	100.6	99.2	95.5	90.5
200	200.6	197.9	181.5	165.7	200.6	197.0	185.0	168.8
300	300.7	295.1	266.0	231.3	300.7	293.8	270.9	237.4
400	400.7	390.4	346.9	289.1	400.7	389.6	352.2	297.6
500	500.7	485.4	422.5	338.1	500.6	484.5	427.4	351.0
600	600.7	579.8	492.8	380.7	600.7	578.7	497.9	395.9
700	700.7	673.8	558.4	418.6	700.5	671.7	562.9	434.0
800	800.7	763.2	615.2	449.4	800.7	761.9	620.7	467.3
900	900.6	859.6	678.7	483.4	900.7	859.5	685.6	504.3
1000	1000.7	959.5	753.7	523.4	1000.6	959.8	762.9	543.5
1100	1100.7	1059.2	842.2	571.0	1100.7	1059.3	847.2	586.8
1200	1200.0	1158.4	939.8	629.4	1200.0	1159.7	940.9	638.7



Obr. 24 Rozložení teplot ve vzorku o volné délce 9 mm ohřívaného rychlostí 1 °C.s^{-1}

Po výdrži na expoziční teplotě bylo aplikováno tzv. volné chlazení. To znamená, že byl vypnut ohřevový transformátor a odvod tepla byl realizován pouze vysokoteplotními čelistmi. Z hodnot naměřených během chladnutí byla sestavena tabulka 4. Rozdíl mezi prvním a druhým měření je malý, nejvyšší rozdíl zde dosahuje 4,6 °C. Rychlost ochlazovaní se v průběhu ochlazení mění, přičemž nejvyšší rychlost volného ochlazování dosahuje při teplotě 1200 °C a to přibližně 273,63 °C.s^{-1}. Při 100 °C je tato rychlost přibližně 1,49 °C.s^{-1}. Po 4 minutách, po kterých bylo ochlazování zaznamenávano, klesla teplota na hodnotu přibližně 53 °C.

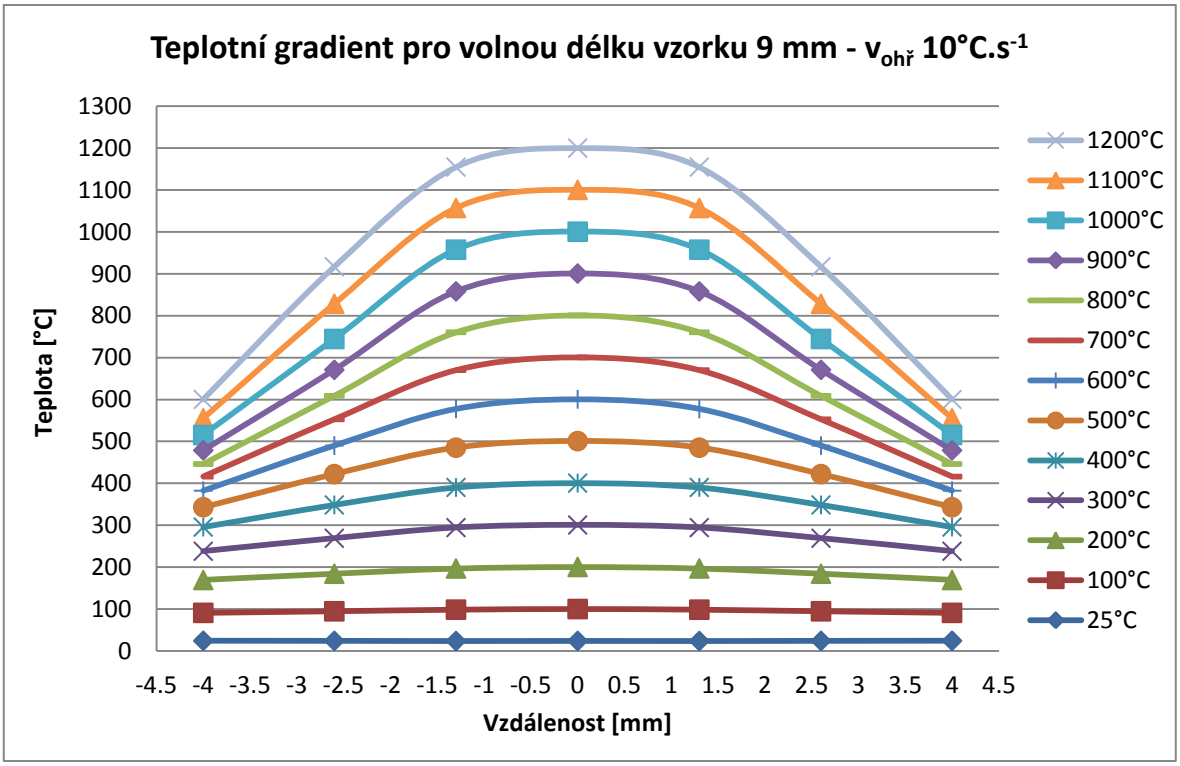
Tab. 4 Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok při ochlazování po ohřevu rychlostí 1 °C.s^{-1}, (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	1,3	2,6	4,0	0	1,3	2,6	4,0
1200	1201.2	1157.6	938.0	633.8	1204.2	1161.1	940.9	646.6
1100	1102.7	1062.4	844.7	578.4	1100.2	1060.8	842.0	584.0
1000	1001.5	964.1	762.3	538.5	999.5	962.5	760.0	543.1
900	901.7	868.5	689.6	502.9	900.3	867.1	687.5	507.4
800	801.1	772.8	621.9	467.4	799.8	771.6	619.8	470.7
700	701.0	678.3	556.5	429.5	700.8	677.7	555.6	433.2
600	600.8	575.2	479.2	384.0	600.4	573.7	478.5	386.0
500	499.7	484.3	422.4	348.7	500.7	484.4	421.3	349.7
400	399.6	391.3	355.8	304.1	400.2	391.3	355.5	304.2
300	300.7	297.5	281.2	250.5	300.6	296.6	280.6	250.3
200	200.8	199.8	197.6	185.6	200.0	198.4	196.9	184.5
100	100.0	99.3	101.0	98.1	100.1	99.1	100.7	98.4
53	53.0	52.4	53.7	52.2	52.0	51.5	52.6	51.4

V tabulce 5 jsou uvedeny hodnoty naměřené při rychlosti ohřevu 10 °C.s^{-1}. Naměřené hodnoty se příliš neměnily ani po druhém měření. Maximální rozdíl je zde 3,8 °C. Na obrázku 25 je grafické zobrazení teplotních gradientů z prvního měření. Teplotní rozdíl při teplotě 600 °C je 54,53 °C.mm^{-1} a u teploty 1200 °C 149,98 °C.mm^{-1}.

Tab. 5 Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok a pro volnou délku vzorku 9 mm při rychlosti ohřevu 10 °C.s^{-1} (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	1,3	2,6	4,0	0	1,3	2,6	4,0
25	23.9	23.7	24.0	24.2	24.9	24.6	25.0	25.1
100	100.0	98.4	94.6	90.8	100.1	98.6	95.0	90.9
200	200.5	196.8	184.3	169.3	200.4	196.8	184.3	169.8
300	300.6	294.3	268.9	238.0	300.5	293.6	269.3	238.8
400	400.5	390.2	348.5	295.6	400.4	389.0	349.7	297.3
500	500.8	485.1	422.0	342.9	500.7	484.2	423.0	346.3
600	600.5	577.7	490.1	382.4	600.7	577.7	491.8	387.5
700	700.6	670.2	552.8	416.0	700.6	670.3	555.5	421.0
800	800.8	760.5	608.9	446.0	800.8	759.5	610.9	450.3
900	900.7	858.1	670.8	478.7	900.6	856.4	671.9	482.5
1000	1000.5	957.6	744.5	515.3	1000.5	956.5	745.2	518.3
1100	1100.5	1057.1	828.6	555.5	1100.6	1056.3	828.9	557.1
1200	1200.2	1154.8	917.0	600.2	1200.0	1154.4	914.7	601.2



Obr. 25 Teplotní gradienty ve vzorku o volné délce 9 mm ohřívaného rychlostí 10 °C.s^{-1}

Hodnoty naměřené při volném chlazení zobrazuje tabulka 6. Rychlost ochlazování při teplotě 1200 °C je přibližně 289,36 °C.s^{-1}, při teplotě 100 °C přibližně 4,24 °C.s^{-1}.

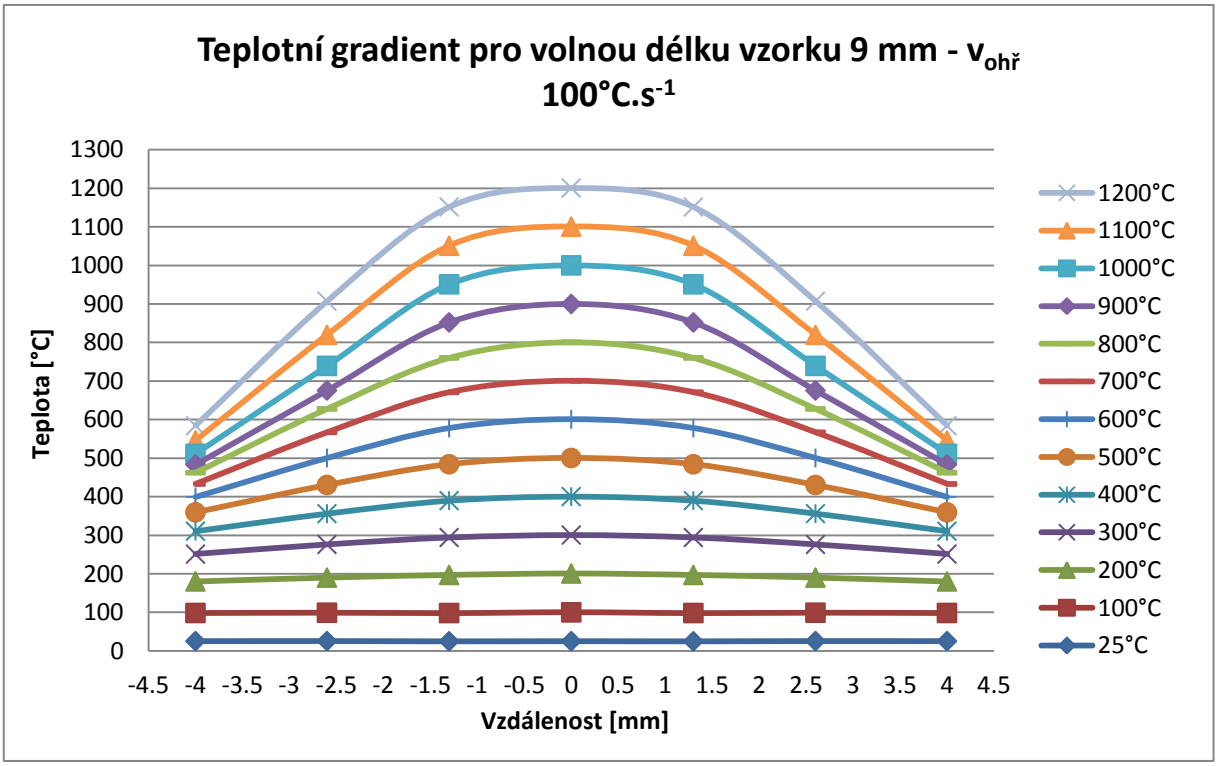
Tab. 6 Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok při ochlazování po ohřevu rychlostí 10 °C.s^{-1} (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	1,3	2,6	4,0	0	1,3	2,6	4,0
1200	1203.7	1156.3	920.6	612.9	1204.7	1156.4	918.8	616.5
1100	1099.5	1056.4	822.3	554.7	1098.8	1055.5	819.6	555.4
1000	1001.9	961.9	743.3	516.8	1001.5	961.1	740.8	517.8
900	899.3	863.4	669.1	481.2	899.4	863.0	667.1	482.3
800	798.2	767.5	601.6	445.7	801.9	770.6	602.8	447.0
700	700.7	675.8	540.7	411.4	701.3	675.9	540.1	411.7
600	599.4	571.2	463.6	365.5	600.2	570.9	463.6	365.8
500	499.5	481.6	408.2	330.3	499.6	481.2	408.2	330.5
400	399.8	389.6	344.2	287.8	400.1	389.3	344.5	288.0
300	300.5	295.9	271.9	237.0	300.7	295.6	272.8	236.9
200	200.6	199.1	191.1	174.2	200.0	198.0	190.9	174.1
100	100.1	99.6	101.1	97.8	100.0	99.4	101.5	97.6
39	38.8	38.6	39.5	38.6	39.1	38.7	39.4	38.9

V tabulce 7 jsou pak uvedeny hodnoty naměřené při rychlosti ohřevu 100 °C.s^{-1}. Z porovnání obou měření vyplývá, že rozdíly jsou minimální. Maximální odchylkou při obou měřeních jsou 3 °C. Na obrázku 26 je grafické znázornění hodnot z prvního měření. Teplotní úbytek na teplotě 1200 °C činí 154,17 °C.mm^{-1}, při teplotě 600 °C pak 50,3 °C.mm^{-1}.

Tab. 7 Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok a pro volnou délku vzorku 9 mm při rychlosti ohřevu 100 °C.s^{-1}, (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	1,3	2,6	4,0	0	1,3	2,6	4,0
25	25.2	25.0	25.5	25.4	23.9	23.6	23.9	24.5
100	100.1	98.3	99.1	98.4	100.2	98.3	98.9	98.6
200	200.8	197.2	190.2	180.3	200.7	197.3	189.7	180.9
300	300.5	294.2	276.1	251.1	300.1	294.2	275.6	251.4
400	400.4	389.9	356.1	310.5	400.2	389.9	356.0	311.6
500	500.5	484.2	430.5	359.5	500.0	483.7	430.2	360.6
600	600.8	577.9	500.4	399.6	600.6	577.8	499.9	401.3
700	700.6	670.9	567.0	433.0	700.7	670.4	566.1	435.5
800	800.5	760.1	627.8	462.2	801.0	759.9	627.2	465.2
900	900.0	852.1	675.6	483.5	900.8	852.0	675.1	486.1
1000	1000.1	951.0	739.3	511.2	1000.5	951.2	738.9	513.8
1100	1100.6	1051.0	819.9	546.0	1099.8	1051.0	819.1	547.3
1200	1201.0	1151.7	907.2	584.3	1200.8	1151.9	905.1	584.3



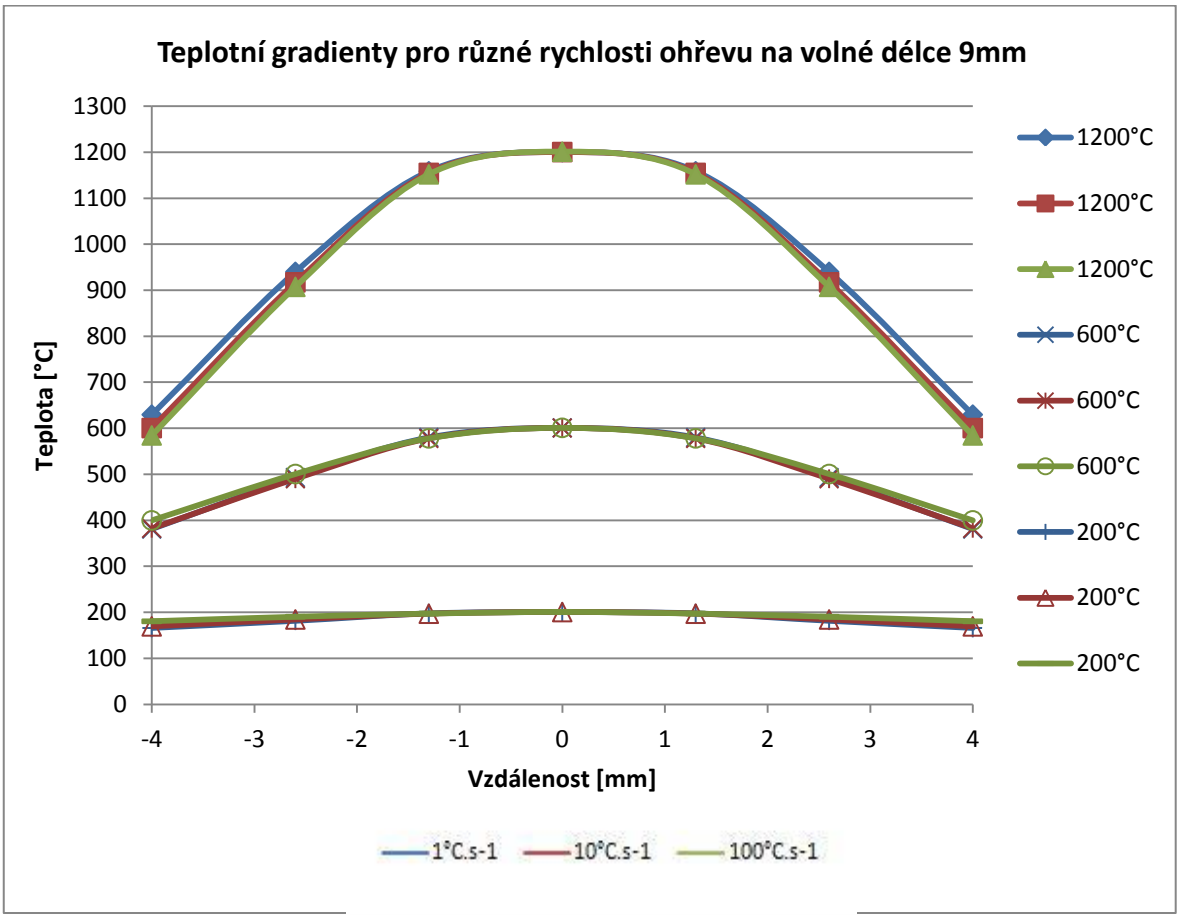
Obr. 26 Teplotní gradienty ve vzorku o volné délce 9 mm ohřívaného rychlostí 100 °C.s^{-1}

Teploty naměřené jednotlivými termočlánky při volném ochlazování pak ukazuje tabulka 8. Rychlost ochlazování při teplotě 100 °C je 18,14 °C.s^{-1} a při teplotě 1200 °C je rychlost ochlazování 290,06 °C.s^{-1}při 1200 °C.

Tab. 8 Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok při ochlazování po ohřevu rychlostí 100 °C.s^{-1} (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	1,3	2,6	4,0	0	1,3	2,6	4,0
1200	1201.0	1155.5	908.9	588.9	1203.5	1156.3	906.9	592.5
1100	1102.4	1058.7	812.4	537.5	1101.2	1057.6	809.9	537.1
1000	999.9	959.1	729.0	498.1	998.6	957.9	726.8	497.7
900	901.8	864.5	657.4	463.2	900.7	863.4	655.8	462.9
800	798.3	765.8	592.4	429.4	802.1	769.1	593.3	431.0
700	699.1	672.4	530.6	396.9	701.5	674.6	531.4	397.9
600	600.8	570.7	455.8	352.0	600.5	570.0	454.7	352.2
500	500.9	480.9	400.5	317.9	499.8	479.9	399.4	317.5
400	400.9	389.1	337.4	277.1	400.4	388.5	336.3	277.2
300	300.8	295.4	265.8	228.1	300.0	294.5	265.0	227.4
200	200.2	198.1	185.1	166.4	200.7	198.6	185.7	166.3
100	100.7	100.4	99.1	94.5	100.2	99.6	98.6	93.8
32	32.5	32.1	32.8	32.5	31.7	31.4	32.0	31.8

Porovnání teplotních gradientů při teplotách 200; 600 a 1200 °C pro různé rychlosti ohřevu a volnou délku vzorku 9 mm je ukázáno na obrázku 27.



Obr. 27 Ukázky teplotních gradientů pro vybrané teploty a pro rychlosti ohřevu 1; 10 a 100 °C.s^{-1} na volné délce 9 mm

3.4.2 Vyhodnocení experimentů pro volné délky 19 mm, 29 mm a 39 mm

Pro ostatní volné délky bylo vyhodnocování testů obdobné. Ze získaných hodnot byly sestaveny grafy zobrazující teplotní gradienty a tabulky porovnávající hodnoty po opakovaném měření.

a) 19 mm

Jak je vidět v tabulce v příloze 1.1, u vzorku o volné délce 19 mm se při rychlosti ohřevu 1 °C.s^{-1} znovu objevují větší rozdíly v určitých bodech. Maximální rozdíl však nepřesahuje 3%. Grafické vyhodnocení prvního měření je na obrázku v příloze 1.2. Teplotní rozdíl byl při prvním měření 83,5 °C.mm^{-1}pro teplotu 1200 °C a 34,5 °C.mm^{-1} pro teplotu 600 °C.

Hodnoty naměřené při následném volném ochlazování ukazuje tabulka v příloze 1.3. Rychlost volného ochlazování je při 1200 °C přibližně 92,9 °C.s^{-1} a při 100 °C přibližně 3,7 °C.s^{-1}.

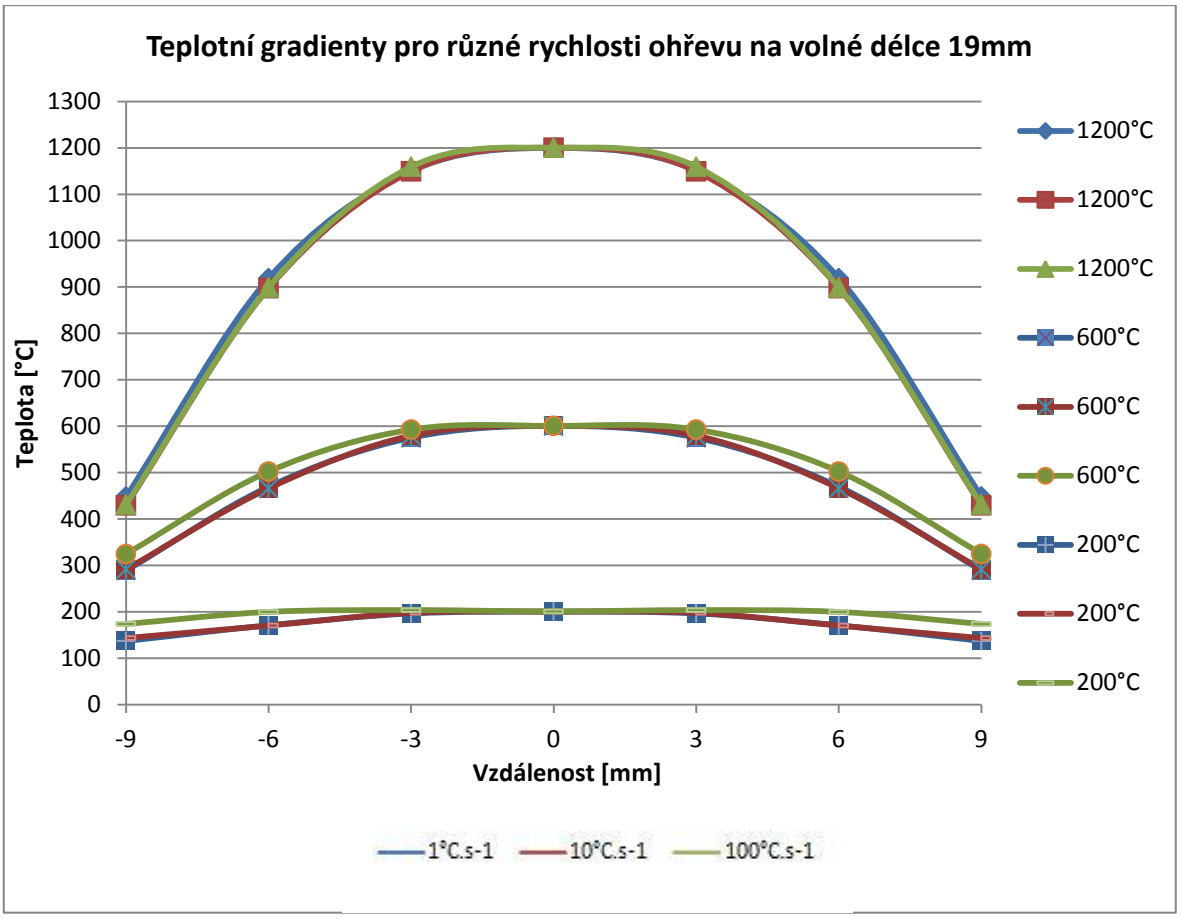
Při rychlosti ohřevu 10 °C.s^{-1} nevykazují hodnoty z obou měření zásadní rozdíly, jak je vidět v tabulce v příloze 1.4. Grafické vyhodnocení prvního měření je zobrazeno na obrázku v příloze 1.5. Teplotní rozdíl byl při prvním měření 85,7 °C.mm^{-1}pro teplotu 1200 °C a 34,3 °C.mm^{-1} pro teplotu 600 °C.

Číselné vyhodnocení volného ochlazování zobrazuje tabulka v příloze 1.6. Rychlost volného ochlazování byla při 1200 °C přibližně 96,6 °C.s^{-1} a při 100 °C přibližně 6,7 °C.s^{-1}.

Při ohřevu vzorku rychlostí 100 °C.s^{-1} byly naměřeny hodnoty uvedené v příloze 1.7. Grafické znázornění teplotních polí při prvním měření zobrazuje graf na obrázku v příloze 1.8. Teplotní rozdíl při teplotě 1200 °C je roven 85,5 °C.mm^{-1}, při teplotě 600 °C pak 30,7 °C.mm^{-1}.

Hodnoty naměřené při volném ochlazování zobrazuje tabulka v příloze 1.9. Rychlost ochlazování při teplotě 1200 °C je přibližně 96,3 °C.s^{-1}, při teplotě 100 °C přibližně 8,9 °C.s^{-1}.

Porovnání teplotních gradientů pro různé rychlosti ohřevu na volné délce 29 mm je zobrazeno na obrázku 28.



Obr. 28 Teplotní gradienty pro vybrané teploty na volné délce 19 mm při různých rychlostech ohřevu

b) 29 mm

Naměřené hodnoty při testu vzorku o volné délce 29 mm a rychlosti ohřevu 1 °C.s^{-1} znovu vykazují rozdíly, které opět nepřesahují 3 % (příloha 2.1). Grafické vyhodnocení prvního měření je na obrázku v příloze 2.2. Teplotní rozdíl byl při prvním měření 54,3 °C.mm^{-1}pro teplotu 1200 °C a 23,9 °C.mm^{-1} pro teplotu 600 °C.

Hodnoty naměřené při následném volném ochlazování ukazuje tabulka v příloze 2.3. Rychlost volného ochlazování je při 1200 °C přibližně 56,8 °C.s^{-1} a při 100 °C přibližně 4,3 °C.s^{-1}.

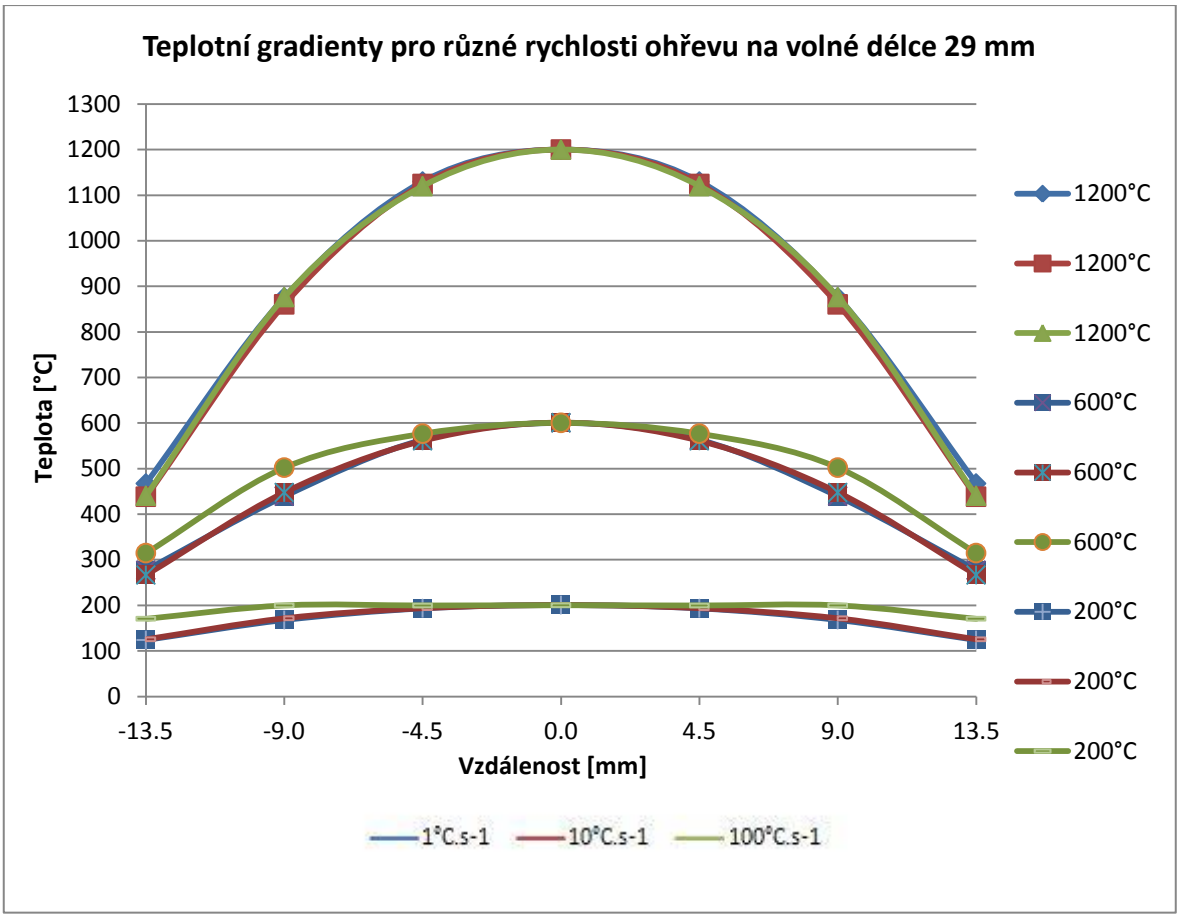
Při rychlosti ohřevu 10 °C.s^{-1} byly naměřeny hodnoty uvedené v příloze 2.4. Grafické vyhodnocení prvního měření je zobrazeno na obrázku v příloze 2.5. Teplotní rozdíl byl při prvním měření 56,4 °C.mm^{-1}pro teplotu 1200 °C a 24,7 °C.mm^{-1} pro teplotu 600 °C.

Číselné vyhodnocení volného ochlazování zobrazuje tabulka v příloze 2.6. Rychlost volného ochlazování byla při 1200 °C přibližně 68,5 °C.s^{-1} a při 100 °C přibližně 6 °C.s^{-1}.

Při ohřevu vzorku rychlostí 100 °C.s^{-1} byly naměřeny hodnoty uvedené v příloze 2.7. Grafické znázornění teplotních polí při prvním měření zobrazuje graf v příloze 2.8. Teplotní rozdíl na teplotě 1200 °C je roven 56,3 °C.mm^{-1}, na teplotě 600 °C pak 21,2 °C.mm^{-1}.

Hodnoty naměřené při volném ochlazování zobrazuje tabulka v příloze 2.9. Rychlost oclazování při teplotě 1200 °C je přibližně 61,1 °C.s^{-1}, při teplotě 100 °C přibližně 7,3 °C.s^{-1}.

Porovnání teplotních gradientů pro různé rychlosti ohřevu na volné délce 29 mm je zobrazeno na obrázku 29.



Obr. 29 Teplotní gradienty pro vybrané teploty na volné délce 29 mm při různých rychlostech ohřevu

c) 39 mm

Naměřené hodnoty při testu vzorku o volné délce 39 mm a rychlosti ohřevu 1 °C.s^{-1} znovu vykazují rozdíly, které nepřesahují 3% (příloha 3.1). Grafické vyhodnocení prvního měření

je na obrázku v příloze 3.2. Teplotní rozdíl byl při prvním měření 43,6 °C.mm^{-1} pro teplotu 1200 °C a 19,9 °C.mm^{-1} pro teplotu 600 °C.

Hodnoty naměřené při následném volném ochlazování ukazuje tabulka v příloze 3.3. Rychlost volného ochlazování je při 1200 °C přibližně 37,7 °C.s^{-1} a při 100 °C přibližně 3,9 °C.s^{-1}.

Při rychlosti ohřevu 10 °C.s^{-1} byly naměřeny hodnoty uvedené v příloze 3.4. Grafické vyhodnocení prvního měření je zobrazeno na obrázku v příloze 3.5. Teplotní rozdíl byl při prvním měření 44,8 °C.mm^{-1}pro teplotu 1200 °C a 19,9 °C.mm^{-1} pro teplotu 600 °C.

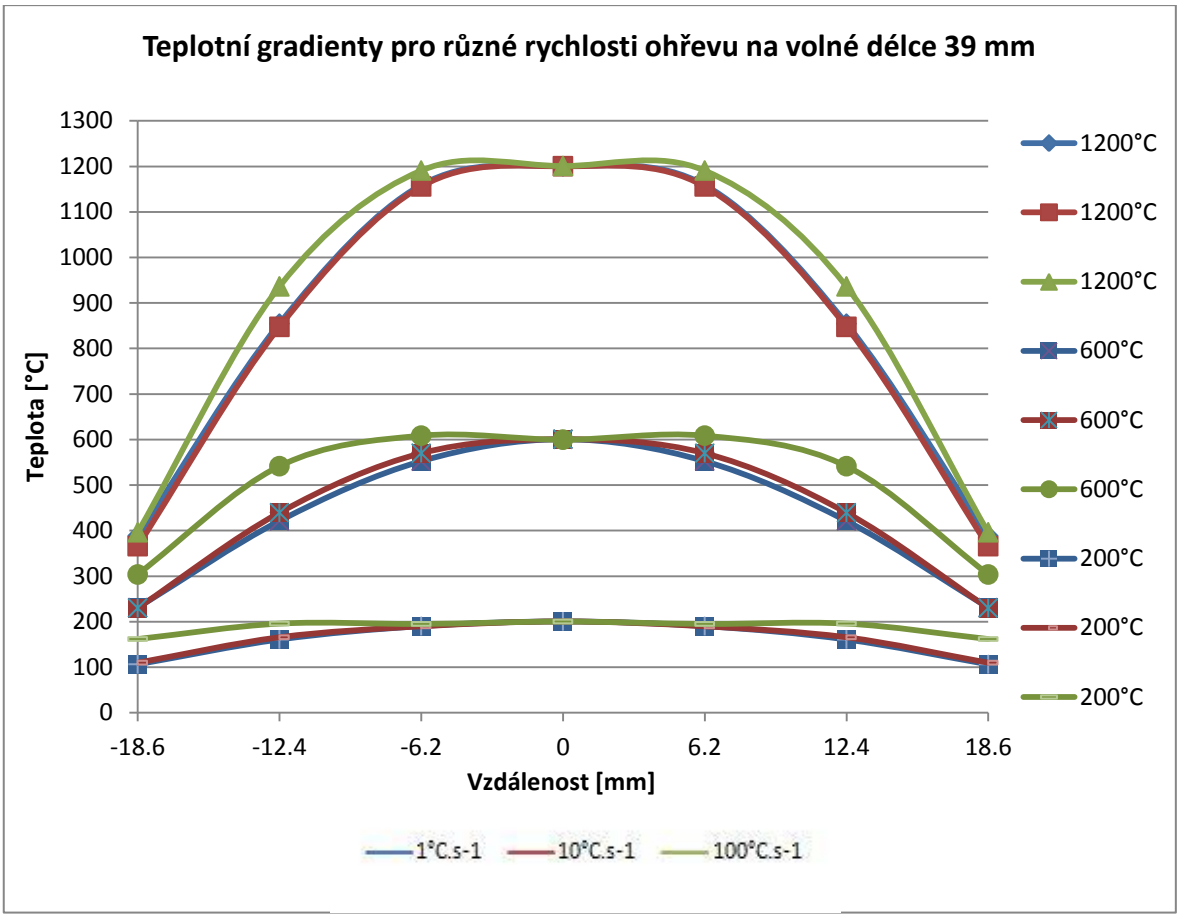
Číselné vyhodnocení volného ochlazování zobrazuje tabulka v příloze 3.6. Rychlost volného ochlazování byla při 1200 °C přibližně 38,5 °C.s^{-1} a při 100 °C přibližně 4,7 °C.s^{-1}.

Při ohřevu vzorku rychlostí 100 °C.s^{-1} byly naměřeny hodnoty uvedené v příloze 3.7.

Grafické znázornění teplotních polí při prvním měření zobrazuje graf na obrázku v příloze 3.8. Teplotní rozdíl při teplotě 1200 °C je roven 43,3 °C.mm^{-1}, při teplotě 600 °C pak 15,9 °C.mm^{-1}.

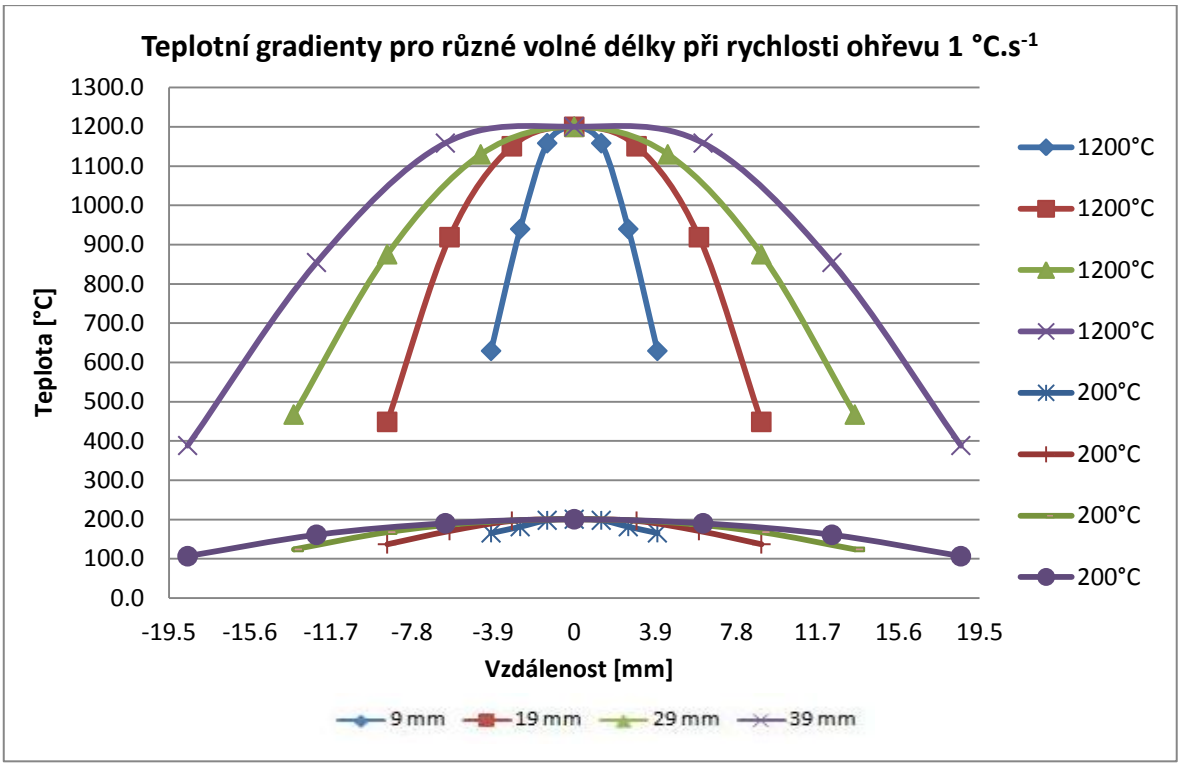
Hodnoty naměřené při volném ochlazování zobrazuje tabulka v příloze 3.9. Rychlost ochlazování při teplotě 1200 °C je přibližně 38,2 °C.s^{-1}, při teplotě 100 °C přibližně 5,3 °C.s^{-1}.

Porovnání teplotních gradientů pro různé rychlosti ohřevu na volné délce 39 mm je zobrazeno na obrázku 30.

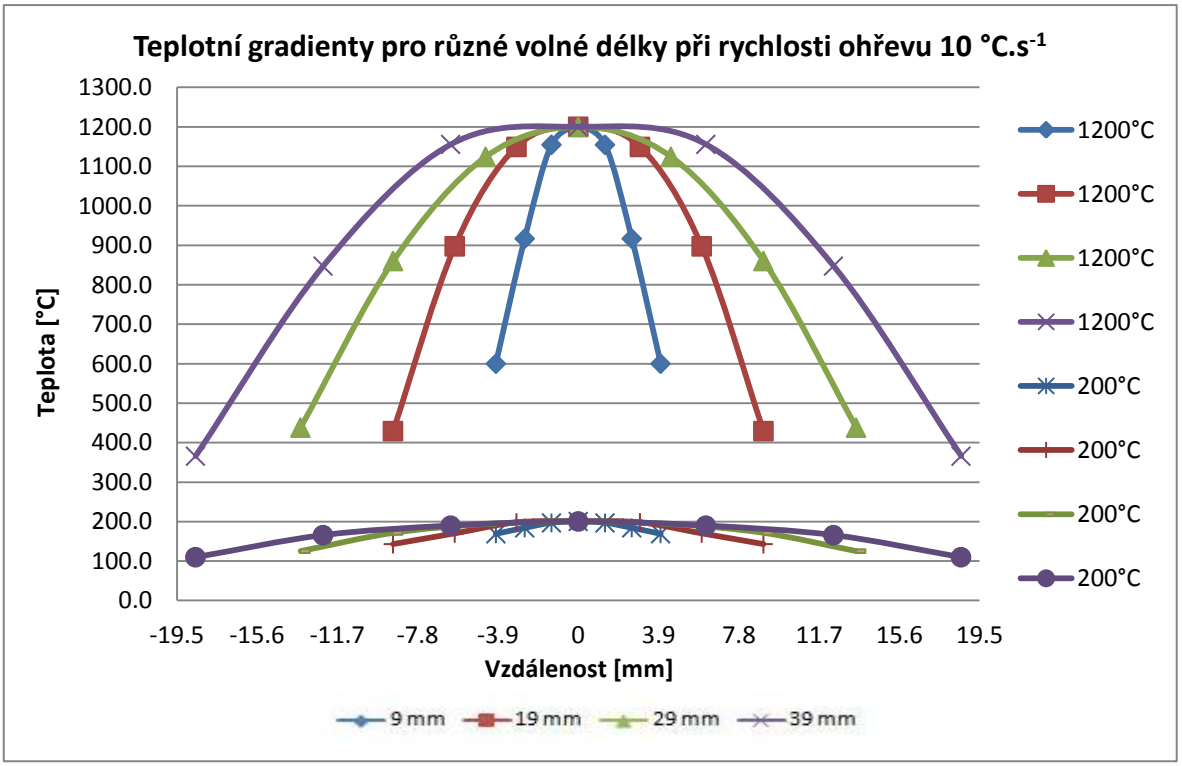


Obr. 30 Teplotní gradienty pro vybrané teploty na volné délce 39 mm při různých rychlostech ohřevu

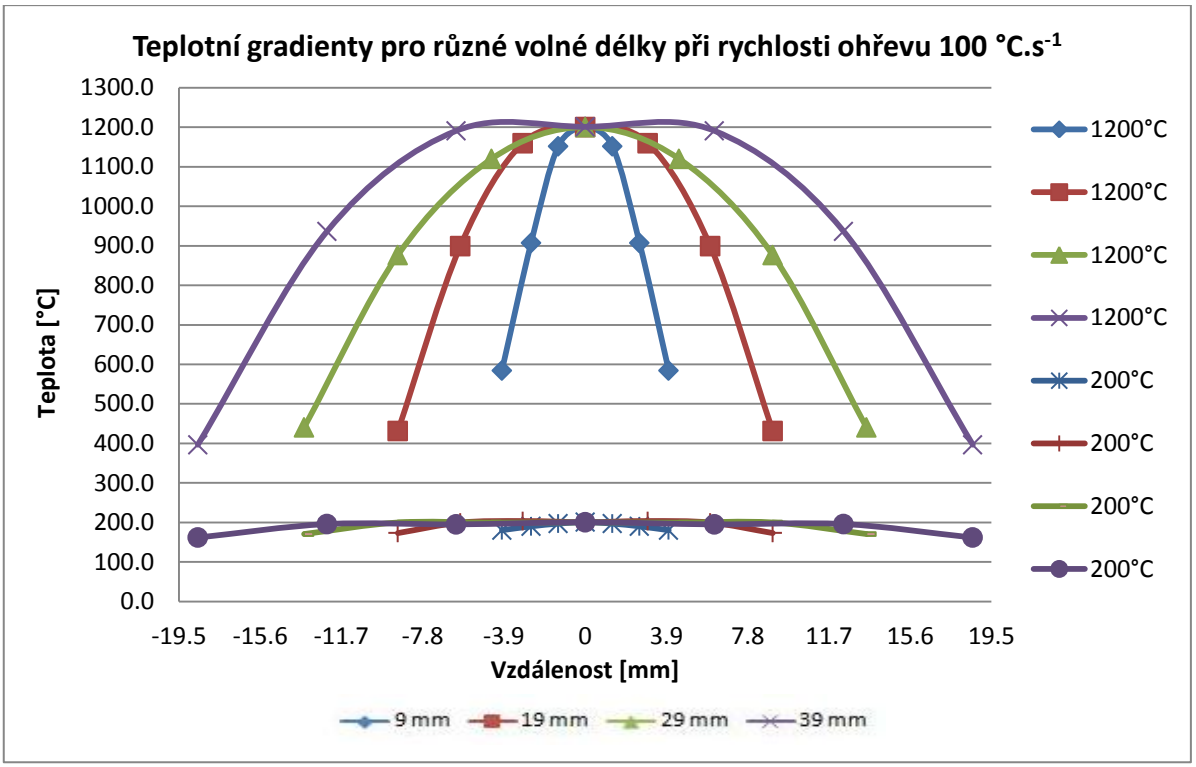
Pro porovnání teplotních gradientů naměřených na volných délkách 9, 19, 29 a 39 mm byly sestaveny grafy zobrazující teplotní pole vzorků různých délek při stejné rychlosti ohřevu. Teplotní gradienty byly porovnány na teplotách 200 a 1200 °C. V prvním grafu na obrázku 31 jsou porovnány teplotní gradienty při rychlosti ohřevu 1 °C.s^{-1}. Obrázek 32 zobrazuje rozdíl teplotních gradientů při rychlosti ohřevu 10 °C.s^{-1}. Graf na obrázku 33 pak ukazuje rozdíl teplotních gradientů při rychlosti ohřevu 100 °C.s^{-1}.



Obr. 31 Porovnání teplotních gradientů pro různé volné délky při rychlosti ohřevu 1 °C.s^{-1}



Obr. 32 Porovnání teplotních gradientů pro různé volné délky při rychlosti ohřevu 10 °C.s^{-1}

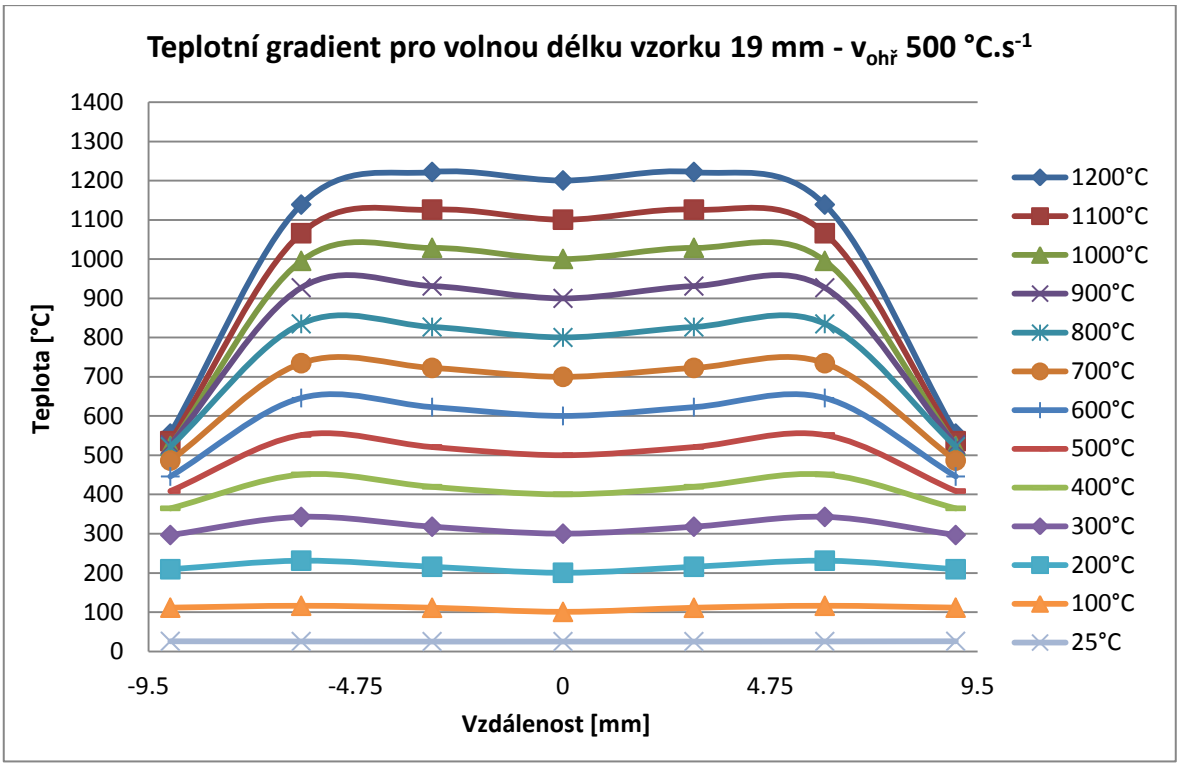


Obr. 33 Porovnání teplotních gradientů pro různé volné délky při rychlosti ohřevu 100 °C.s^{-1}

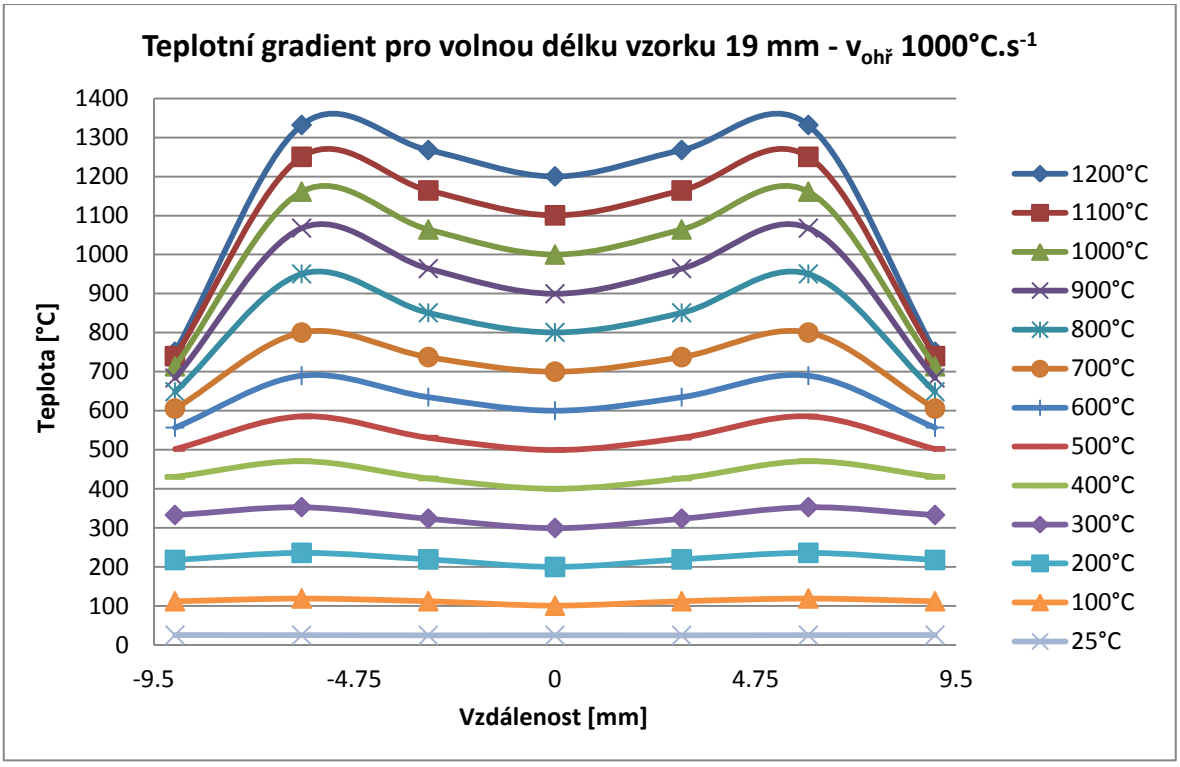
3.4.3 Teplotní gradienty při velmi vysokých rychlostech ohřevu

Při kontrole průběžných výsledků výše uvedených experimentů bylo rozhodnuto provést doplňkové testy při velmi vysokých rychlostech ohřevu. Pro tyto testy byl zvolen vzorek o volné délce 19 mm, který byl ohříván postupně třemi rychlostmi 500 °C.s^{-1}, 1000 °C.s^{-1} a 4000 °C.s^{-1}. Postup přípravy i celý test probíhal stejně, tak jak bylo uvedeno u testů za nižších rychlostí ohřevu (kapitola 3.3).

Na obrázku 34 jsou ukázány průběhy teplotních gradientů při teplotách v rozmezí 100 až 1200 °C při rychlosti ohřevu 500 °C.s^{-1}. Na obrázku 35 jsou pak ukázány průběhy teplotních gradientů při teplotách v rozmezí 100 až 1200 °C při rychlosti ohřevu 1000 °C.s^{-1}. Z průběhů teploty je zřejmé, že při vyšších rychlostech ohřevu dostává rozložení teplot ve vzorku jiný průběh než při rychlostech ohřevu do 100 °C.s^{-1}. Maximální teploty nejsou dosaženy uprostřed testovaného vzorku, ale přibližně ve vzdálenosti 5 mm od středu vzorku. Značných rozdílů bylo dosaženo zejména u rychlosti ohřevu 4000 °C.s^{-1}, jak je zřejmé z obrázku 36. Tabulky s konkrétně zjištěnými hodnotami teplot jsou uvedeny v příloze 4.

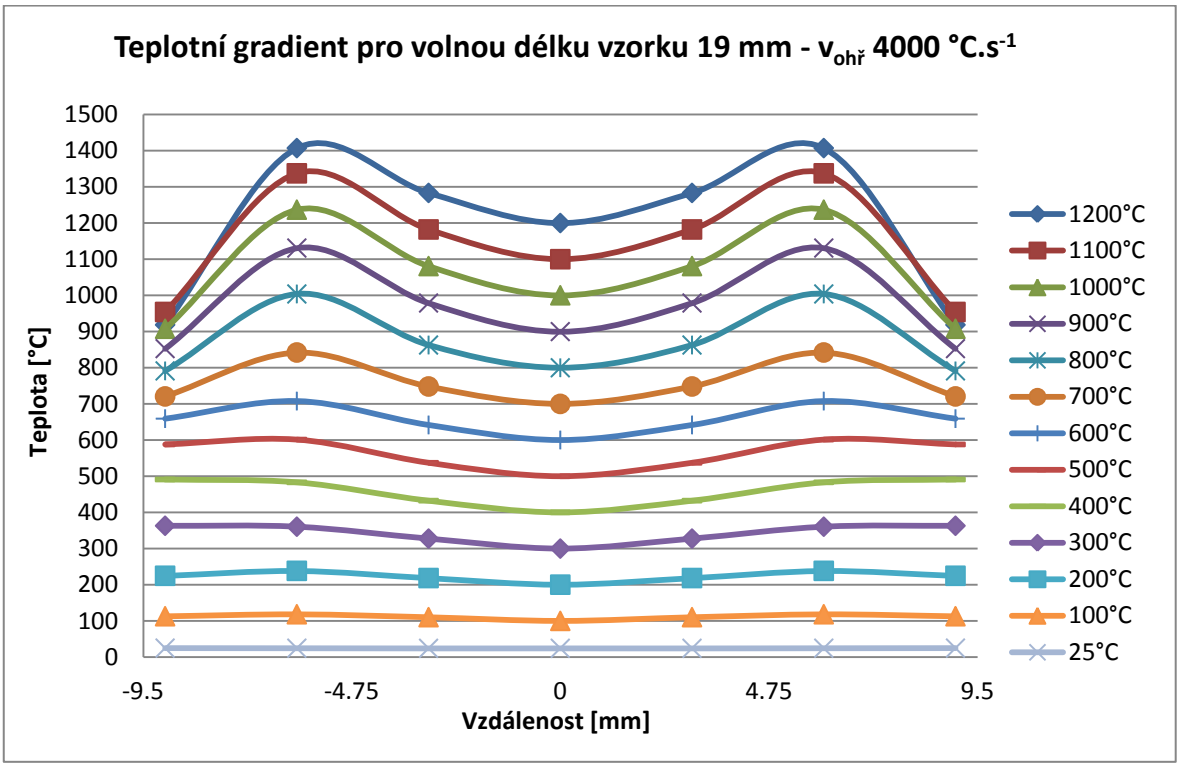


Obr. 34 Rozložení teplot ve vzorku o volné délce 19 mm ohřívaného rychlostí 500 °C.s^{-1}



Obr. 35 Rozložení teplot ve vzorku o volné délce 19 mm ohřívaného rychlostí 1000 °C.s^{-1}

Při tomto testu byla překročena teplota měřitelná použitým termočlákem K. Výsledné hodnoty termočlánku TC3 tak byly přibližně od teploty 1100 °C zkreslené.



Obr. 36 Rozložení teplot ve vzorku o volné délce 19 mm ohřívaného rychlostí 4000 °C.s^{-1}

4. Závěr

Správné stanovení teplotních polí má zásadní vliv na přesnost popisu řady dalších dějů jako jsou například profázové transformace, růst zrn, změny tvrdosti, ale i další děje k nimž dochází v materiálu při teplotní expozici. Při zjišťování těchto změn pomocí teplotně-napěťových simulátorů je proto nezbytné znát rozložení teplot ve vzorku, tedy teplotní gradient. Cílem předkládané bakalářské práce bylo zjistit, jaký vliv má změna volné délky vzorku na teplotní gradient a to při různých rychlostech ohřevu i ochlazování. Pro testy byly připraveny vzorky s volnou délkou 9; 19; 29 a 39 mm na kterých byl měřen teplotní gradient. Zároveň byl sledován vliv rychlosti ohřevu na změny rozložení teplot na volné délce vzorku a to pro rychlosti ohřevu 1; 10 a 100 °C.s^{-1}. Vzorek o volné délce 19 mm byl navíc otestován s rychlostmi ohřevu 500; 1000 a 4000 °C.s^{-1}. Celkem bylo provedeno 27 experimentů k měření teplotních gradientů s různými vstupními podmínkami.

K testování byly použity měděné čelisti s plným dotykem z důvodu jejich častého využívání a z důvodu možnosti získat poměrně strmé teplotní gradienty. Z výsledků je patrné, že se zvyšující se volnou délkou vzorku se zvětšuje vliv rychlosti ohřevu na tvar teplotního gradientu. Kromě toho s rostoucí rychlostí ohřevu se nejprve vyrovnávají teploty okolo řídícího termočlánku, přičemž s dalším nárůstem rychlosti ohřevu nad hodnotu 100 °C.s^{-1} již nejsou maximální teploty dosaženy uprostřed testovaného vzorku, ale přibližně ve vzdálenosti 5 mm od středu vzorku. Značných rozdílů bylo dosaženo zejména u rychlosti ohřevu 4000 °C.s^{-1}.

Tyto experimenty volně navazují na práci Ing. Vrabce zmíněné v kapitole 2.5.5, který zkoumal vliv druhu materiálu a tvaru čelistí na teplotní gradient. Spolu s jeho poznatky mohou být výsledky experimentů využity při dalších experimentech tepelně ovlivněné oblasti na přístroji Gleeble, popřípadě k simulaci konkrétní metody svařování.

Pravděpodobně se jedná o jednu z prvních prací zaměřenou na vliv rychlosti ohřevu na tvar teplotního gradientu, protože ani výrobce teplotně-napěťového simulátoru Gleeble neměl uvedené poznatky, přestože si buduje databázi možnosti využití těchto simulátorů již více než 40 let.

5. Seznam použité literatury

[1] BENEŠ, Libor. Svařování. učební texty ČVUT. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf

[2] *Svařitelnost kovových materiálů*. Dostupné z: http://strojirenstvi-stredni-skola.blogspot.cz/2011/03/3951-svaritelnost-kovovych-materialu.html

[3] Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Zeross, září 1999. 295 s. ISBN 80-85771-63-2.

[4] KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.

[5] MORAVEC, Jaromír a Josef BRADÁČ. *Možnosti a využití teplotně-napěťového simulátoru Gleeble při výzkumu technologické zpracovatelnosti materiálů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-138-2.

[6] VRABEC, Zdeněk. *Vliv druhu materiálu a tvaru čelistí na teplotní gradient při ohřevu testovacího vzorku v přístroji Gleeble 3500*. Diplomová práce, TUL, 2014

[7] OCHODEK, Vladislav. *Materiály a jejich svařitelnost*: Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Druhé upravené vydání. Ostrava: ZERROS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.

[8] JECH, David. *Svařitelnost ocelí pro součásti parních turbín*. Bakalářská práce, VUT, 2010. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29154

[9] NEUMANN, Heinz. *Teorie svařování a pájení*. Část 1, Tavné svařování. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-171-9.

[10] Gleeble systems. In: Dynamic systems inc. [online]. © 2104 Dynamic systems inc. Dostupné z: http://www.gleeble.com/

[11] DOUŠA, Michal. Technologie I. Prezentace - Část svařováni. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cvi%C4%8Den%C3%AD8_prezetace.pdf

[12] AMBROŽ, Oldřich; KANDUS, Bohumil; KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie svařování a zařízení*.. 1. vyd. Ostrava : Česká svářečská společnost ANB, ZEROSS - svářečské nakladatelství, 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.

Seznam příloh

Příloha 1 – Teplotní pole vzorku o volné délce 19 mm

Příloha 2 – Teplotní pole vzorku o volné délce 29 mm

Příloha 3 – Teplotní pole vzorku o volné délce 39 mm

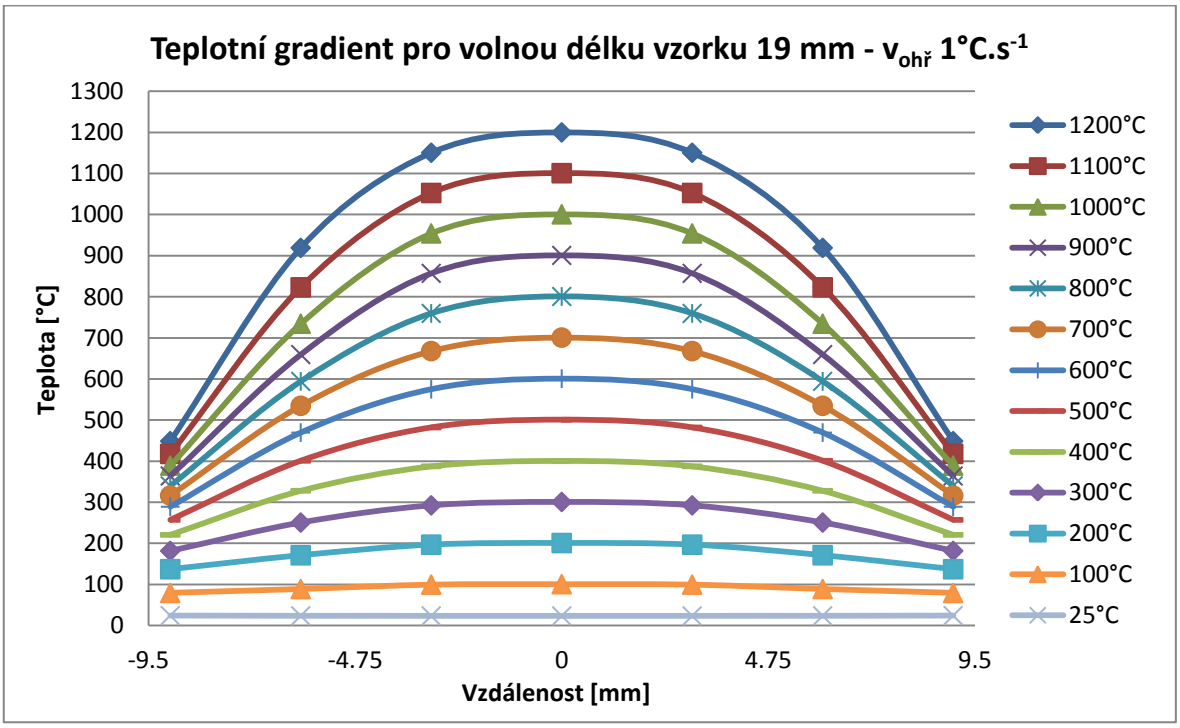
Příloha 4 – Průběhy teplot při velmi vysokých rychlostech ohřevu

Příloha 1 – Teplotní pole vzorku o volné délce 19 mm

Příloha 1.1 - Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok a pro volnou délku vzorku 19 mm při rychlosti ohřevu 1 °C.s^{-1}, (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	3	6	9	0	3	6	9
25	23.4	23.4	23.6	24.2	24.8	24.6	25.1	25.2
100	100.7	99.6	88.8	79.2	100.7	99.8	89.1	79.2
200	200.7	196.7	171.0	137.0	200.7	197.5	170.4	139.6
300	300.7	292.4	250.6	181.6	300.7	293.5	249.5	187.5
400	400.7	387.4	327.9	220.6	400.7	388.6	327.4	227.6
500	500.7	481.9	400.9	257.1	500.7	483.0	400.7	263.5
600	600.7	575.1	469.5	289.1	600.7	577.6	469.6	297.9
700	700.7	667.9	534.6	316.2	700.7	671.1	534.1	325.4
800	800.7	759.4	594.2	339.8	800.7	762.0	593.0	346.6
900	900.7	857.0	659.4	364.0	900.7	859.6	659.1	369.5
1000	1000.7	954.2	734.5	389.2	1000.7	958.2	735.7	394.7
1100	1100.7	1052.6	822.9	417.6	1100.7	1056.1	826.6	422.6
1200	1200.0	1150.5	919.0	448.6	1200.0	1156.6	924.2	454.2

Příloha 1.2 - Teplotní gradient pro volnou délku 19 mm při rychlosti ohřevu 1 °C.s^{-1}



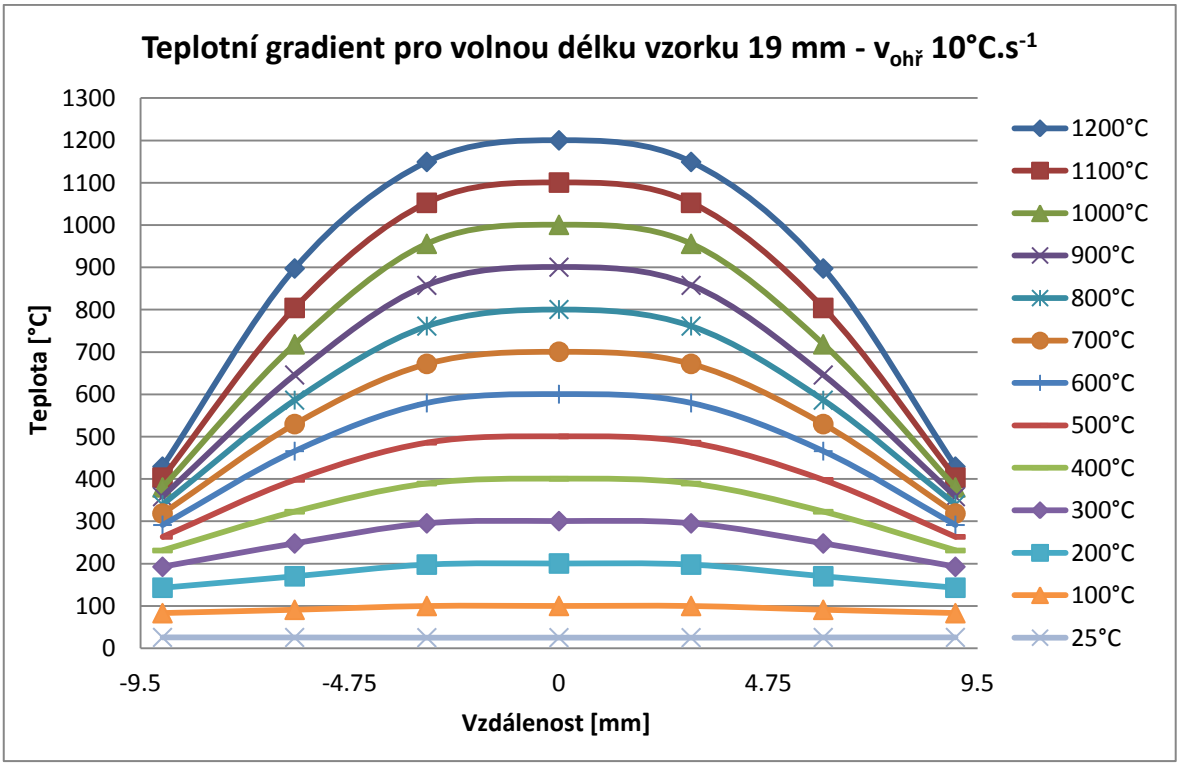
Příloha 1.3 - Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok při ochlazování po ohřevu rychlostí 1 °C.s^{-1} (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	3	6	9	0	3	6	9
1200	1200.1	1151.0	919.2	449.2	1200.1	1156.9	925.2	455.1
1100	1099.7	1050.7	818.9	412.4	1099.9	1054.9	821.9	415.5
1000	1000.5	953.6	732.1	386.7	1000.3	956.7	734.2	389.4
900	900.5	856.7	651.7	361.5	899.9	858.7	652.8	364.0
800	800.2	760.0	576.0	337.1	800.4	762.3	577.1	340.0
700	700.3	664.2	504.8	311.4	700.8	666.4	505.4	313.9
600	600.4	566.8	434.2	280.3	600.6	568.7	434.7	282.2
500	500.7	472.0	371.6	249.2	500.5	472.8	371.7	250.6
400	400.2	377.1	306.6	215.6	400.1	377.8	307.0	217.5
300	300.4	288.5	250.4	188.2	300.4	287.7	249.5	188.9
200	200.0	193.2	178.3	147.0	200.1	191.2	176.0	146.9
100	100.0	98.0	99.2	91.5	100.0	96.3	97.0	90.7
45	46.0	45.4	47.3	44.1	45.1	44.4	46.2	43.3

Příloha 1.4 - Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok a pro volnou délku vzorku 19 mm při rychlosti ohřevu 10 °C.s^{-1}, (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	3	6	9	0	3	6	9
25	25.4	25.3	25.7	25.9	25.1	25.0	25.5	25.4
100	100.3	100.2	91.1	83.2	100.4	100.3	91.7	82.5
200	200.5	198.0	170.3	143.2	200.6	198.8	171.8	143.4
300	300.6	295.3	247.8	192.7	300.6	296.4	249.2	193.4
400	400.7	389.4	322.9	231.2	400.7	392.3	324.9	233.1
500	500.8	486.0	398.1	263.5	500.6	486.9	398.5	265.5
600	600.6	579.7	466.0	291.5	600.6	580.4	467.2	293.5
700	700.8	672.2	529.9	318.6	700.7	673.3	531.0	321.7
800	800.7	761.4	586.5	339.6	800.8	763.1	587.7	343.0
900	900.6	857.7	645.9	358.4	900.7	857.6	646.9	360.6
1000	1000.7	955.9	718.4	380.3	1000.6	955.3	719.7	381.6
1100	1100.7	1052.7	804.4	403.3	1100.5	1051.8	805.9	404.2
1200	1200.3	1149.4	897.6	429.4	1200.4	1149.9	899.8	430.6

Příloha 1.5 - Teplotní gradient pro volnou délku 19 mm při rychlosti ohřevu 10 °C.s^{-1}



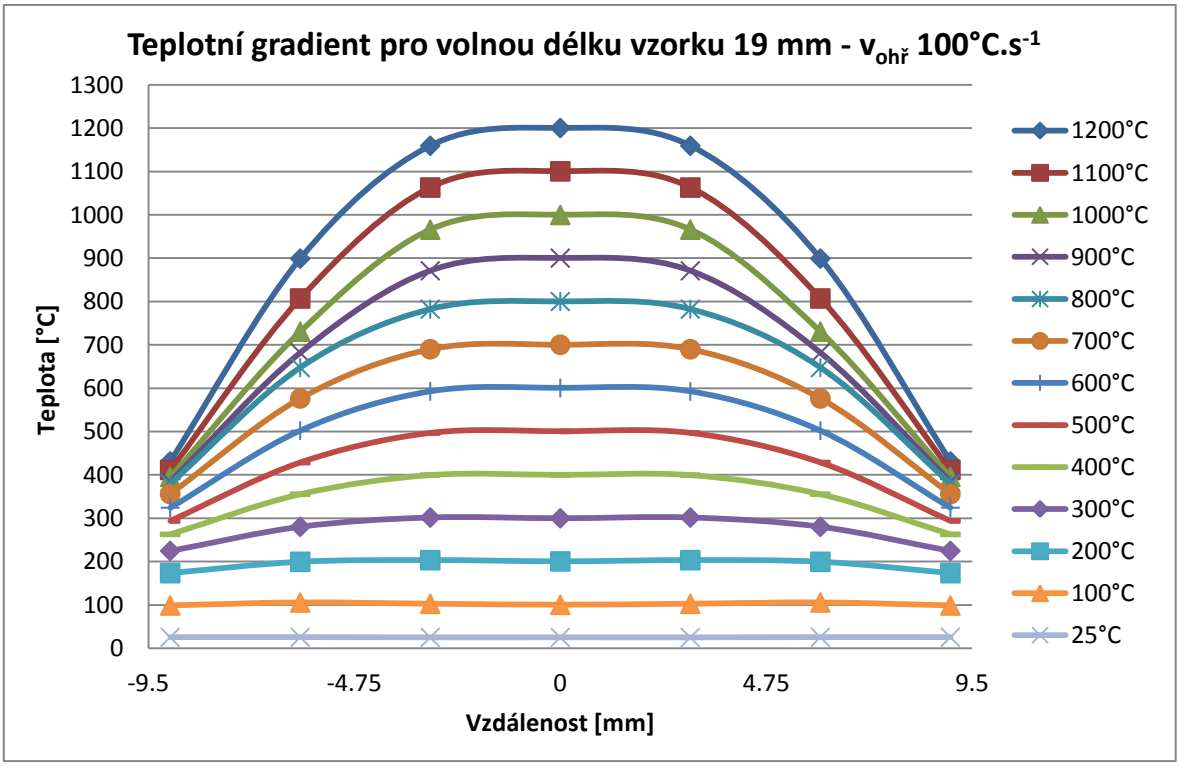
Příloha 1.6 - Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok při ochlazování po ohřevu rychlostí 10 °C.s^{-1} (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	3	6	9	0	3	6	9
1200	1200.1	1149.1	900.7	432.8	1200.0	1150.2	903.3	434.1
1100	1099.6	1049.3	801.4	396.7	1099.4	1049.6	802.3	397.2
1000	999.9	951.9	714.7	371.9	999.5	951.9	715.1	372.1
900	900.6	855.9	636.5	348.5	900.4	855.8	636.7	349.0
800	800.0	759.1	562.5	325.4	799.7	758.7	562.2	325.8
700	700.6	663.7	492.1	299.1	699.9	662.8	491.5	299.1
600	600.5	566.0	421.1	267.3	600.8	566.5	421.8	267.6
500	500.4	470.8	358.3	235.5	500.0	470.7	358.6	235.5
400	400.2	376.0	294.5	203.5	400.1	376.3	295.1	203.5
300	300.1	287.4	239.7	176.9	300.5	288.0	240.6	176.9
200	200.1	192.5	169.7	137.1	200.2	192.9	170.5	137.3
100	100.2	96.6	93.0	85.0	100.1	96.5	93.0	84.9
35	35.6	35.1	36.3	34.6	34.8	34.5	35.6	34.0

Příloha 1.7 - Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok a pro volnou délku vzorku 19 mm při rychlosti ohřevu 100 °C.s^{-1}, (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	3	6	9	0	3	6	9
25	25.3	25.2	25.7	25.6	24.6	24.7	25.2	25.2
100	100.5	102.8	105.8	98.9	100.6	102.7	105.6	98.5
200	200.6	203.5	199.6	173.5	200.5	202.8	199.0	172.6
300	300.0	301.8	280.4	224.8	300.4	300.7	279.9	224.8
400	400.1	399.6	355.5	262.9	400.2	397.2	354.4	262.7
500	500.7	496.8	428.6	293.8	500.6	492.5	427.1	293.4
600	600.7	592.8	502.2	324.5	600.9	586.0	499.4	323.5
700	700.3	690.0	576.5	355.8	700.3	680.7	572.6	354.3
800	800.1	782.4	647.6	379.3	800.9	772.0	645.3	378.9
900	900.3	871.1	681.8	384.6	900.6	861.0	680.8	385.2
1000	999.9	965.9	730.6	395.5	1000.7	956.9	729.1	395.5
1100	1100.4	1063.1	807.1	411.6	1100.5	1054.8	805.6	411.9
1200	1200.4	1159.4	899.1	431.3	1200.2	1154.0	900.6	431.6

Příloha 1.8 - Teplotní gradient pro volnou délku 19 mm při rychlosti ohřevu 100 °C.s^{-1}



Příloha 1.9 - Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok při ochlazování po ohřevu rychlostí 100 °C.s^{-1} (teploty uvedeny ve °C)

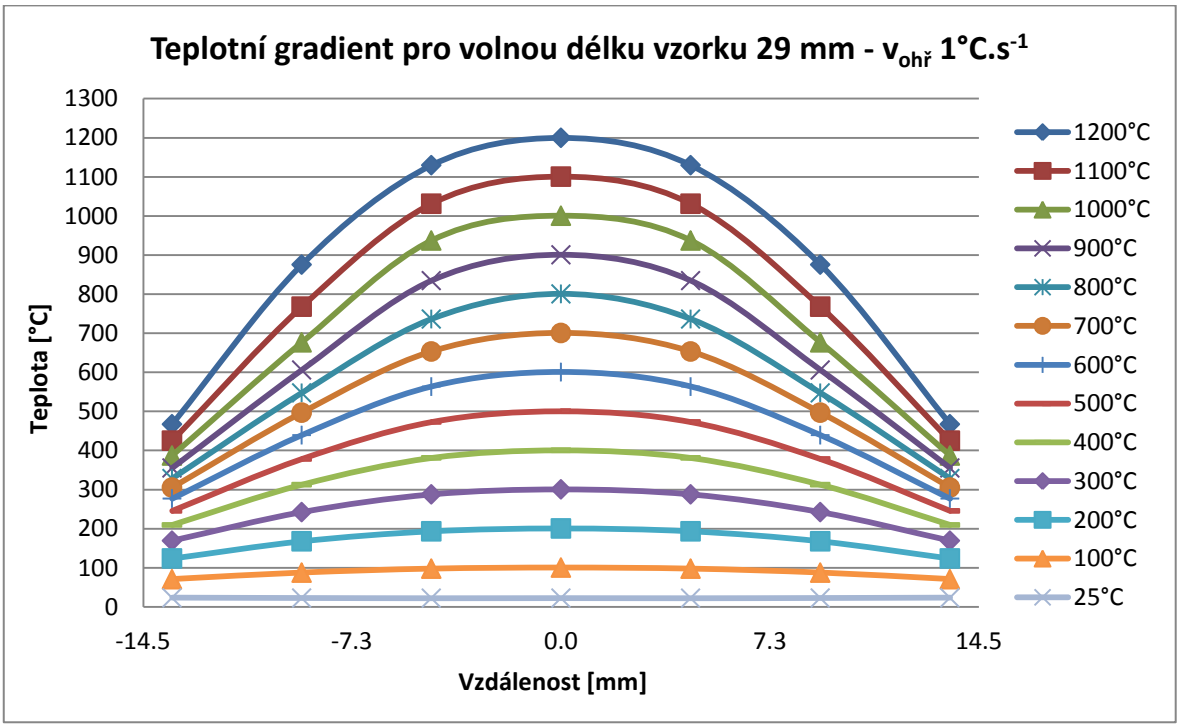
Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	3	6	9	0	3	6	9
1200	1200.0	1147.5	890.6	422.7	1200.3	1149.4	892.6	423.3
1100	1099.9	1048.8	791.0	388.9	1100.3	1049.4	792.2	389.1
1000	1000.2	951.7	704.3	364.9	1000.2	952.3	705.2	365.0
900	900.1	855.5	625.8	342.9	900.1	855.8	626.4	343.0
800	799.8	758.3	550.0	317.7	800.9	760.1	551.6	318.1
700	700.1	662.2	479.5	288.7	700.9	663.8	481.0	289.0
600	600.3	565.2	410.1	257.2	600.0	565.5	410.6	257.3
500	500.1	470.2	351.3	228.6	500.0	470.3	351.6	228.7
400	400.0	375.4	286.8	197.0	400.2	375.5	287.2	196.8
300	300.2	287.0	233.2	170.7	300.4	287.1	233.3	170.6
200	200.5	192.4	164.5	131.8	200.2	192.3	164.6	131.4
100	100.1	95.5	88.6	78.9	100.2	96.3	89.1	78.8
30	30.3	30.0	30.8	29.9	30.5	30.2	31.0	30.1

Příloha 2 – Teplotní pole vzorku o volné délce 29 mm

Příloha 2.1 - Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok a pro volnou délku vzorku 29 mm při rychlosti ohřevu 1 °C.s^{-1}, (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	4,5	9,0	13,5	0	4,5	9,0	13,5
25	22.6	22.4	22.8	23.3	22.7	22.4	22.8	23.5
100	100.6	97.9	87.8	70.9	100.6	98.1	88.4	71.1
200	200.7	193.4	167.9	123.9	200.7	193.3	167.5	123.5
300	300.7	287.9	242.5	169.4	300.7	287.6	242.3	168.3
400	400.7	381.2	312.7	209.6	400.7	380.5	313.8	208.0
500	500.7	473.1	378.4	245.6	500.7	472.3	380.9	243.5
600	600.7	563.5	439.4	277.1	600.7	562.9	443.0	275.5
700	700.7	653.3	496.9	305.3	700.7	651.4	501.0	303.8
800	800.7	736.4	547.5	328.4	800.7	736.6	552.9	328.0
900	900.7	834.6	606.0	355.4	900.6	832.5	613.7	356.3
1000	1000.7	937.3	676.8	387.3	1000.7	932.1	684.2	388.8
1100	1100.7	1031.3	768.0	425.3	1100.7	1029.9	770.3	424.7
1200	1200.0	1129.9	875.6	467.3	1200.1	1124.9	876.8	465.6

Příloha 2.2 - Teplotní gradient pro volnou délku 29 mm při rychlosti ohřevu 1 °C.s^{-1}



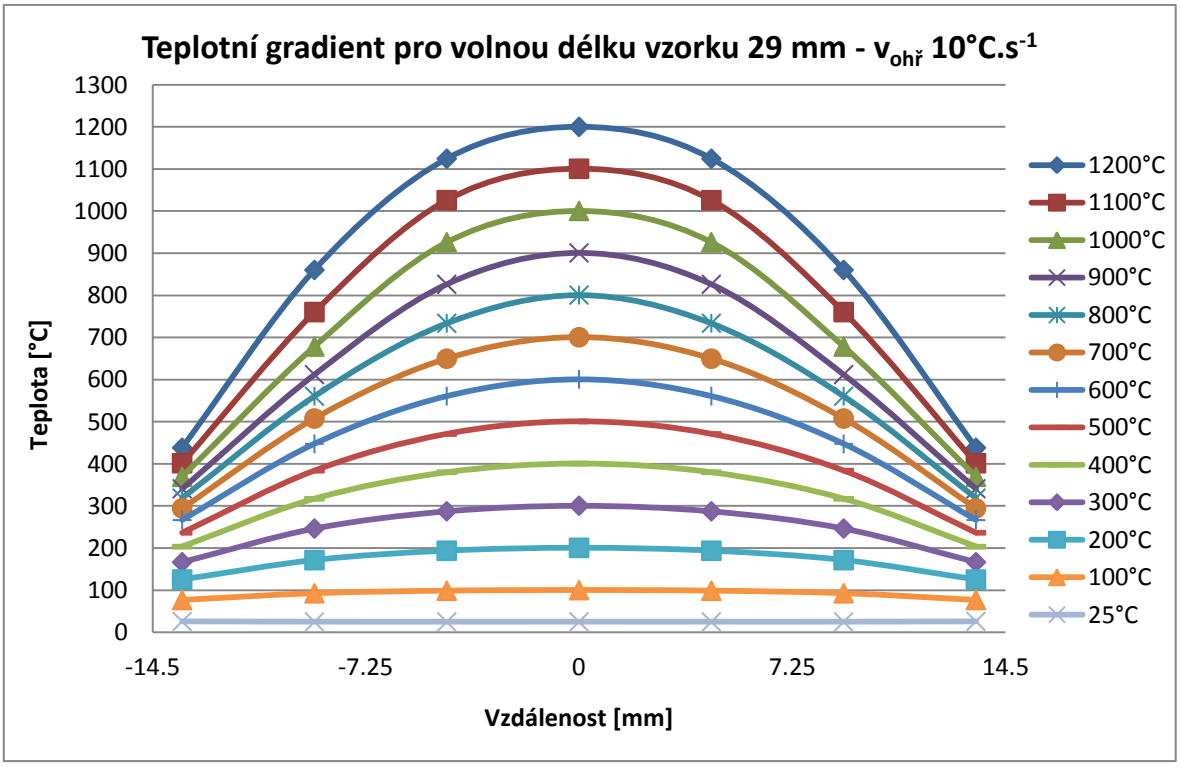
Příloha 2.3 - Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok při ochlazování po ohřevu rychlostí 1 °C.s^{-1} (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	4,5	9,0	13,5	0	4,5	9,0	13,5
1200	1199.9	1129.5	876.3	468.0	1200.1	1124.0	878.1	466.5
1100	1100.1	1034.4	782.0	427.2	1100.8	1031.7	783.2	426.4
1000	1000.3	938.7	696.8	393.5	1000.0	936.3	696.7	392.2
900	900.6	844.2	623.8	363.9	900.5	842.5	621.1	362.6
800	800.1	750.3	557.4	335.0	800.3	749.3	555.2	333.3
700	700.1	655.9	487.6	302.9	700.3	655.2	485.2	301.3
600	600.2	548.2	409.8	265.2	600.4	548.3	408.0	263.8
500	500.3	470.0	366.4	245.4	500.1	469.9	364.3	243.8
400	400.2	380.9	308.5	217.4	400.0	380.9	306.6	215.8
300	300.2	288.5	241.8	182.2	300.1	288.6	240.2	180.8
200	200.0	194.6	169.6	141.8	200.0	193.9	168.2	140.5
100	100.1	99.4	91.6	91.1	100.0	98.3	90.7	89.8
41	41.4	41.6	40.1	43.2	40.8	41.0	39.5	42.5

Příloha 2.4 - Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok a pro volnou délku vzorku 29 mm při rychlosti ohřevu 10 °C.s^{-1}, (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	4,5	9,0	13,5	0	4,5	9,0	13,5
25	25.0	24.9	24.9	26.0	22.9	22.6	23.0	23.7
100	100.3	98.9	92.8	76.8	100.3	98.8	92.8	76.8
200	200.6	193.8	171.5	125.4	200.6	193.8	171.3	125.6
300	300.7	287.4	246.4	166.6	300.7	287.2	245.8	166.9
400	400.7	380.1	317.1	203.4	400.6	379.9	316.3	203.5
500	500.7	471.1	383.9	236.5	500.7	470.8	383.0	236.5
600	600.7	560.9	447.6	266.6	600.8	560.8	447.0	266.6
700	700.7	649.8	507.6	294.4	700.7	649.8	507.1	294.4
800	800.8	733.8	560.6	318.7	800.7	733.2	559.7	318.4
900	900.8	826.4	612.1	340.9	900.7	825.7	610.6	340.4
1000	1000.7	926.4	678.6	369.3	1000.6	925.2	676.9	368.4
1100	1100.7	1026.1	760.5	401.7	1100.6	1025.0	758.2	401.0
1200	1200.2	1124.6	860.4	438.3	1200.3	1123.7	858.6	437.4

Příloha 2.5 - Teplotní gradient pro volnou délku 29 mm při rychlosti ohřevu 10 °C.s^{-1}



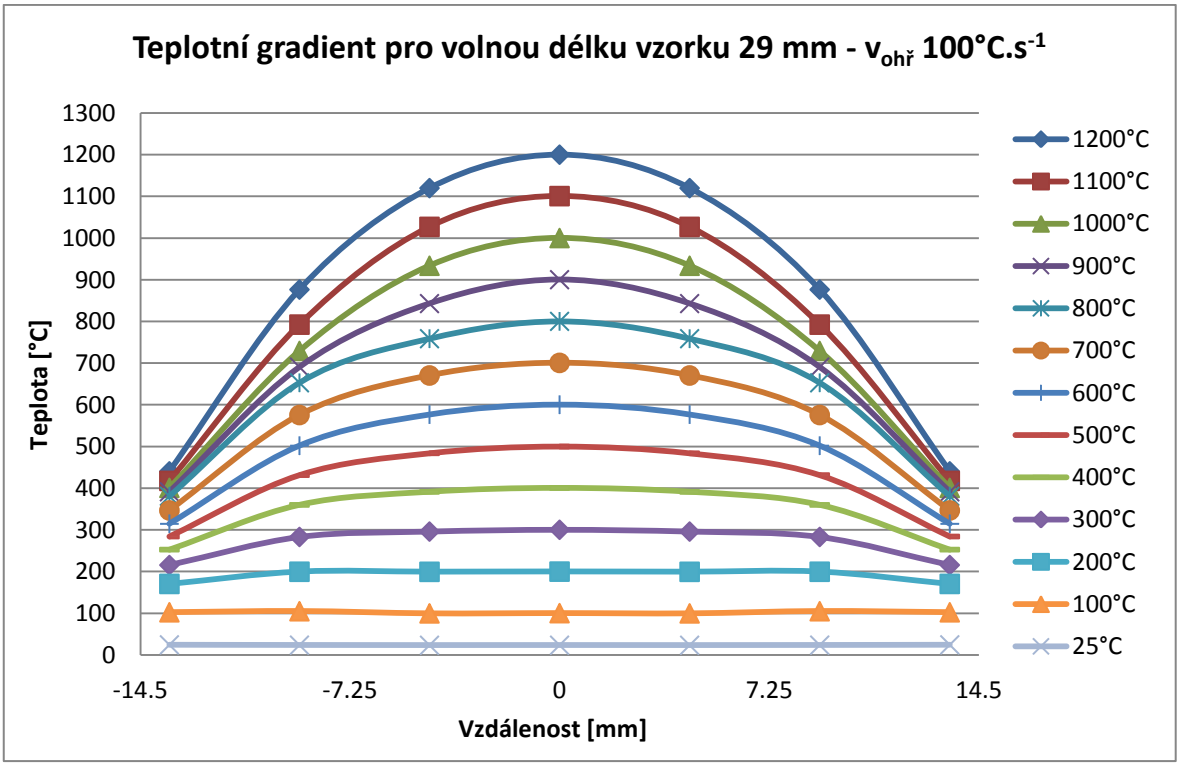
Příloha 2.6 - Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok při ochlazování po ohřevu rychlostí 10 °C.s^{-1} (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	4,5	9,0	13,5	0	4,5	9,0	13,5
1200	1200.2	1126.5	866.0	444.1	1200.2	1124.2	861.2	442.7
1100	1100.2	1032.0	772.9	405.4	1101.0	1031.0	771.0	404.9
1000	1000.2	936.8	687.9	373.5	1000.2	935.2	685.1	372.4
900	900.8	842.2	613.8	343.5	900.0	840.3	611.1	342.7
800	800.6	748.7	549.5	315.6	800.3	747.4	547.5	314.9
700	700.3	653.8	479.7	284.1	700.4	652.9	478.0	283.5
600	600.6	545.2	402.7	247.5	600.2	544.8	401.6	247.2
500	500.4	467.3	359.8	228.3	500.7	467.6	359.1	228.1
400	400.1	378.4	302.6	201.3	400.1	378.5	301.8	201.0
300	300.1	286.5	236.5	167.7	300.1	286.7	236.1	167.7
200	200.4	193.0	165.4	129.5	200.2	193.3	164.8	129.3
100	100.0	98.1	88.6	82.2	100.2	98.1	88.3	81.8
33	34.3	34.5	33.5	35.9	33.1	33.2	32.3	34.7

Příloha 2.7 - Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok a pro volnou délku vzorku 29 mm při rychlosti ohřevu 100 °C.s^{-1}, (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	4,5	9,0	13,5	0	4,5	9,0	13,5
25	23.5	23.4	23.7	24.4	25.3	25.1	25.3	26.3
100	100.5	99.9	105.0	102.5	100.2	99.9	104.8	102.8
200	200.0	199.5	199.7	170.5	200.2	199.7	200.1	171.1
300	300.4	296.1	283.1	215.8	300.5	296.5	283.4	215.9
400	400.6	391.3	360.1	252.8	400.8	391.2	360.0	252.7
500	500.1	483.9	431.6	284.2	500.3	483.3	431.6	284.0
600	600.4	576.7	502.2	314.6	600.1	575.4	501.8	314.3
700	700.7	670.5	575.7	346.7	700.5	668.0	575.0	346.2
800	800.3	758.8	653.0	380.9	800.2	756.9	652.7	380.8
900	900.4	842.9	690.6	391.4	900.2	841.9	690.8	391.9
1000	1000.2	933.8	729.3	401.0	1000.5	933.0	729.7	401.4
1100	1100.8	1026.9	792.5	417.6	1100.6	1025.8	792.6	417.9
1200	1200.2	1119.9	876.5	440.5	1200.2	1118.1	876.6	440.2

Příloha 2.8 - Teplotní gradient pro volnou délku 29 mm při rychlosti ohřevu 100 °C.s^{-1}



Příloha 2.9 - Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok při ochlazování po ohřevu rychlostí 100 °C.s^{-1} (teploty uvedeny ve °C)

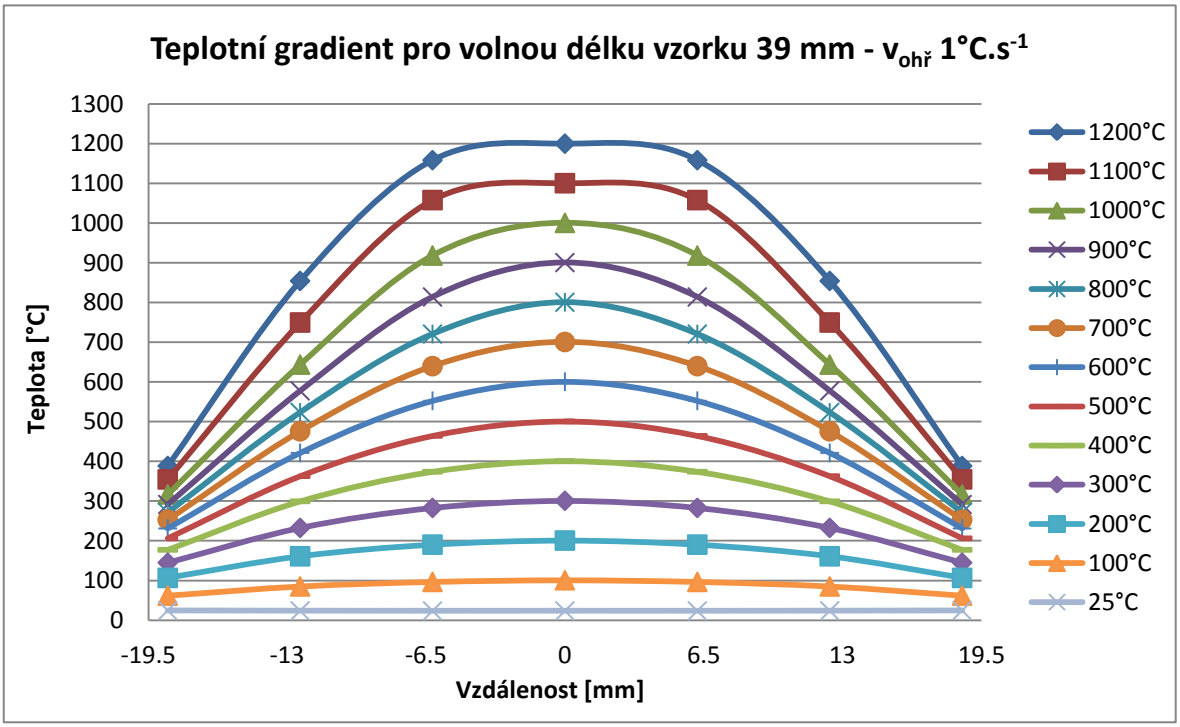
Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	4,5	9,0	13,5	0	4,5	9,0	13,5
1200	1200.6	1122.9	851.7	425.4	1200.1	1120.7	852.4	426.5
1100	1100.8	1028.6	763.7	389.2	1099.9	1026.9	760.9	389.4
1000	1000.2	932.9	677.7	357.5	999.9	931.8	675.8	357.9
900	900.1	838.1	607.3	328.6	900.9	838.3	606.3	329.4
800	800.7	745.7	544.5	301.9	799.9	744.7	542.5	302.3
700	700.4	650.1	473.8	270.3	700.3	649.6	472.5	271.0
600	600.5	541.8	398.0	234.7	599.9	541.7	397.1	235.4
500	500.5	464.9	355.2	216.0	500.6	465.3	354.7	216.7
400	400.2	376.9	298.7	190.2	400.2	377.1	298.2	191.0
300	300.0	285.2	233.0	157.8	300.5	285.9	232.9	158.9
200	200.4	192.4	162.5	120.5	200.6	193.0	162.4	121.3
100	100.1	97.4	86.0	74.5	100.0	97.6	86.1	75.2
29	29.2	29.2	28.7	30.5	30.4	30.4	29.8	31.8

Příloha 3 – Teplotní pole vzorku o volné délce 39 mm

Příloha 3.1 - Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok a pro volnou délku vzorku 39 mm při rychlosti ohřevu 1 °C.s^{-1}, (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	6,2	12,4	18,6	0	6,2	12,4	18,6
25	23.6	23.5	23.8	24.5	24.7	24.7	24.9	25.5
100	100.7	96.5	85.1	62.0	100.8	95.5	85.1	62.3
200	200.7	190.4	161.0	106.5	200.6	189.6	161.2	106.7
300	300.8	282.9	232.5	144.9	300.6	283.7	233.8	145.5
400	400.7	373.9	299.4	177.3	400.7	377.7	302.6	178.9
500	500.7	464.3	362.8	206.2	500.8	472.3	367.8	207.9
600	600.7	552.6	421.4	231.1	600.7	567.0	430.3	233.7
700	700.7	639.8	475.8	253.0	700.7	659.6	488.5	256.8
800	800.7	720.7	523.3	271.1	800.7	744.5	538.0	275.7
900	900.7	814.1	577.6	291.4	900.6	843.5	596.0	298.3
1000	1000.7	918.4	643.8	316.8	1000.7	951.5	667.9	325.3
1100	1100.6	1058.1	749.8	354.6	1100.7	1060.3	756.3	355.9
1200	1200.1	1158.6	854.5	388.4	1200.0	1161.1	857.7	388.6

Příloha 3.2 - Teplotní gradient pro volnou délku 39 mm při rychlosti ohřevu 1 °C.s^{-1}



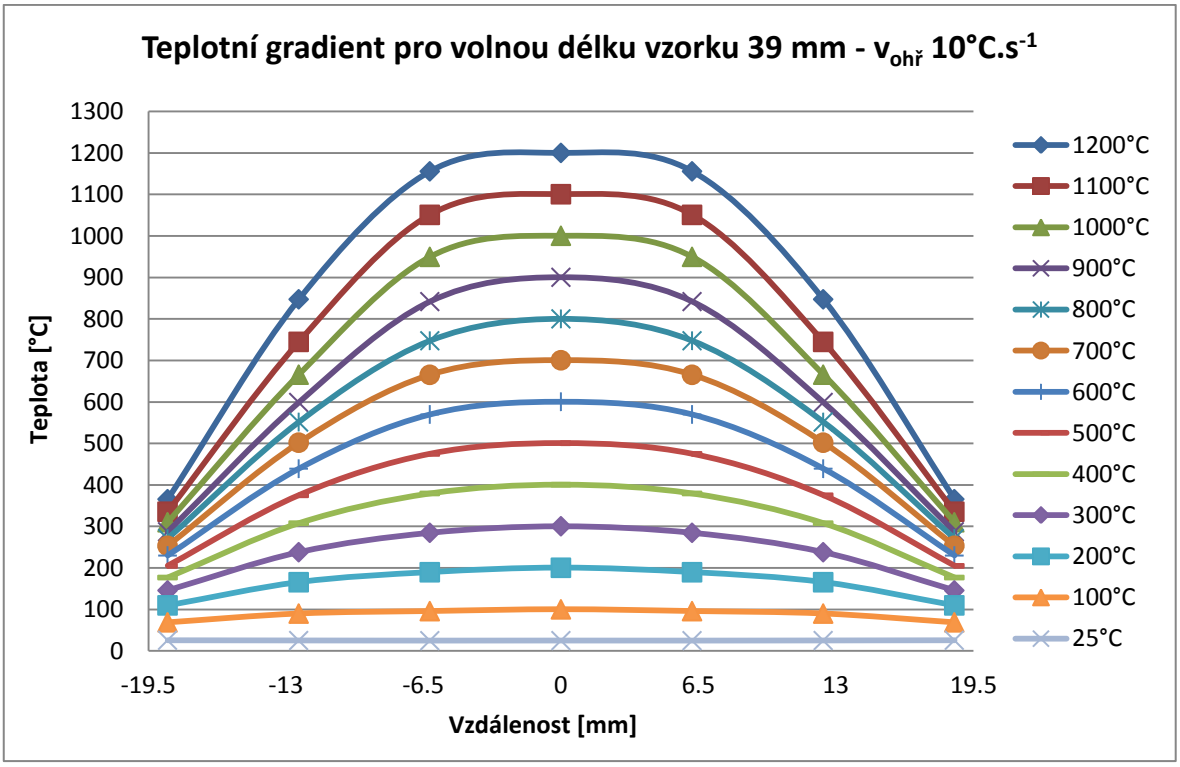
Příloha 3.3 - Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok při ochlazování po ohřevu rychlostí 1 °C.s^{-1} (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	6,2	12,4	18,6	0	6,2	12,4	18,6
1200	1200.2	1157.8	852.7	389.0	1202.3	1160.7	856.7	392.2
1100	1100.6	1051.1	756.4	353.5	1100.1	1052.4	757.9	354.0
1000	1000.5	948.5	671.6	326.7	1000.5	949.3	671.5	327.0
900	900.3	846.7	598.7	303.1	900.2	847.2	597.0	302.4
800	800.5	749.5	533.2	279.4	800.3	750.3	532.4	278.7
700	700.2	652.2	463.9	253.2	700.0	653.0	463.0	252.1
600	600.3	537.6	387.3	222.1	600.4	537.5	386.2	221.5
500	500.1	461.6	345.7	205.2	500.3	461.2	344.5	204.4
400	400.1	373.9	291.4	183.2	400.6	374.4	291.0	182.2
300	300.6	284.1	229.5	155.0	300.1	283.3	228.5	154.3
200	200.3	192.2	162.6	121.9	200.1	191.6	161.9	121.4
100	100.2	99.6	90.7	80.1	100.1	99.5	90.4	79.5
33	38.8	38.6	38.5	38.6	38.3	38.5	38.2	38.1

Příloha 3.4 - Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok a pro volnou délku vzorku 39 mm při rychlosti ohřevu 10 °C.s^{-1}, (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	6,2	12,4	18,6	0	6,2	12,4	18,6
25	25.2	25.1	25.4	25.9	25.3	25.2	25.5	25.9
100	100.5	96.2	90.3	69.2	100.9	97.0	90.7	69.7
200	200.6	189.8	165.8	110.0	200.6	190.0	165.6	110.1
300	300.7	284.9	238.1	145.9	300.9	284.3	238.0	145.7
400	400.8	379.7	308.0	177.1	400.8	378.4	307.2	176.4
500	500.7	475.0	375.2	205.2	500.6	473.3	373.8	203.9
600	600.7	570.1	439.4	230.0	600.7	568.3	437.5	228.7
700	700.7	665.6	502.1	253.6	700.7	661.2	498.5	251.5
800	800.4	747.7	551.8	271.1	800.7	745.5	550.4	270.4
900	900.5	842.0	599.1	287.5	900.7	837.9	595.8	285.9
1000	1000.6	949.8	665.9	310.3	1000.7	943.9	660.1	307.4
1100	1100.7	1051.0	744.9	335.7	1100.8	1051.4	740.8	333.9
1200	1200.3	1155.9	847.5	365.9	1200.5	1159.5	845.6	364.9

Příloha 3.5 - Teplotní gradient pro volnou délku 39 mm při rychlosti ohřevu 10 °C.s^{-1}



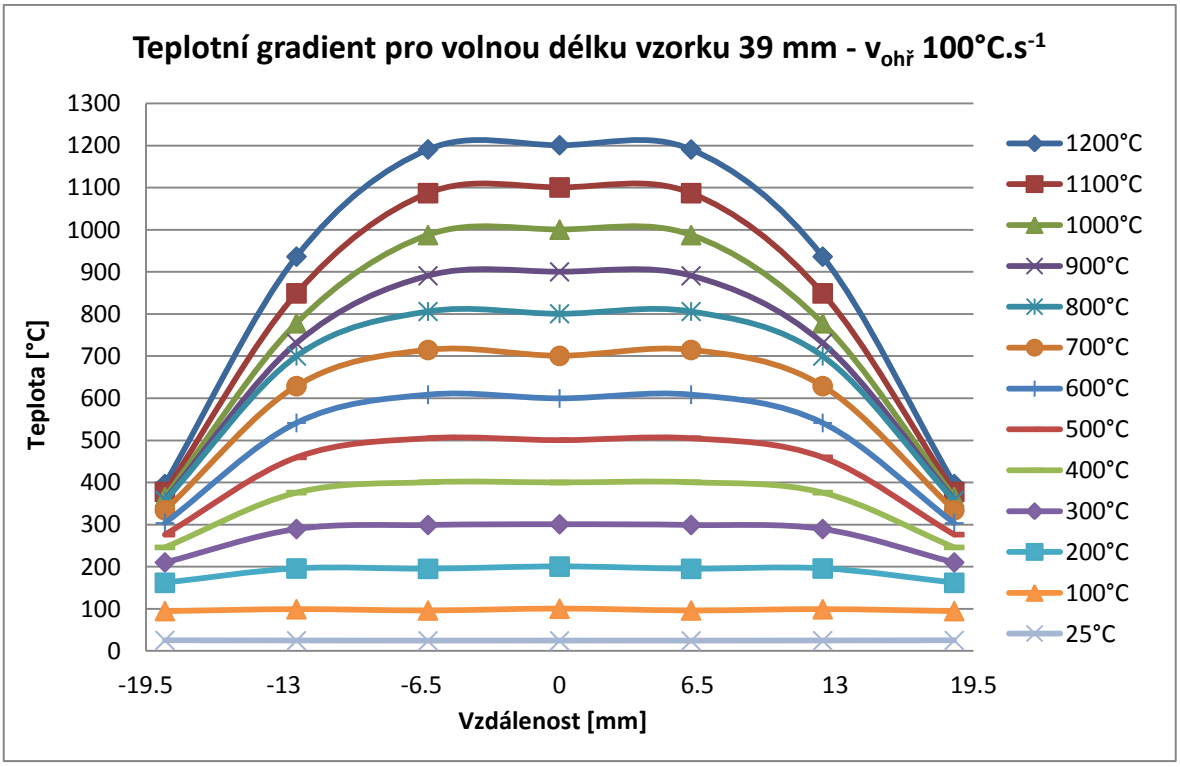
Příloha 3.6 - Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok při ochlazování po ohřevu rychlostí 10 °C.s^{-1} (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	6,2	12,4	18,6	0	6,2	12,4	18,6
1200	1201.4	1155.3	846.2	371.2	1201.5	1159.7	847.0	371.5
1100	1100.3	1047.6	748.9	335.0	1100.2	1050.9	749.9	335.6
1000	1000.4	944.6	663.5	309.8	1000.0	946.7	663.0	310.1
900	900.4	843.2	590.8	286.2	900.5	845.3	590.7	286.0
800	800.5	746.9	527.3	263.9	800.3	748.2	526.6	263.4
700	700.2	649.9	458.0	238.4	700.1	649.6	456.4	237.7
600	600.0	534.3	381.4	208.6	600.3	534.9	380.8	207.8
500	500.4	459.0	340.4	192.9	500.2	458.6	339.4	192.4
400	400.5	372.3	287.0	171.6	400.7	372.1	286.5	171.3
300	300.5	282.2	225.2	144.4	300.2	281.5	224.4	144.2
200	200.3	190.9	159.1	112.7	199.9	190.1	158.3	112.5
100	100.2	98.9	87.9	73.4	100.0	98.3	87.7	73.1
33	32.3	32.5	32.2	32.2	33.3	33.3	33.2	33.3

Příloha 3.7 - Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok a pro volnou délku vzorku 39 mm při rychlosti ohřevu 100 °C.s^{-1}, (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	6,2	12,4	18,6	0	6,2	12,4	18,6
25	24.4	24.3	24.6	25.3	25.1	25.0	25.3	25.6
100	100.5	96.3	99.2	94.8	100.7	98.1	100.4	95.8
200	200.4	195.1	195.9	161.9	200.8	198.1	198.4	163.2
300	300.9	299.2	289.6	210.3	300.1	300.2	291.1	209.9
400	400.2	400.8	376.0	246.0	400.4	402.2	377.7	245.1
500	500.8	505.4	459.9	276.5	500.8	505.3	459.7	274.2
600	599.8	608.6	541.5	303.7	600.9	608.8	539.8	300.8
700	700.7	714.7	628.9	334.1	700.4	712.0	622.4	329.3
800	800.9	806.1	700.1	357.2	800.2	806.7	698.0	354.8
900	900.3	890.9	730.9	358.7	900.6	895.5	732.0	358.1
1000	1000.5	987.6	778.2	365.4	1000.2	993.9	778.5	364.2
1100	1100.7	1087.1	849.2	377.7	1100.0	1091.9	846.9	375.9
1200	1200.9	1190.9	936.4	396.4	1200.0	1191.9	930.1	392.8

Příloha 3.8 - Teplotní gradient pro volnou délku 39 mm při rychlosti ohřevu 100 °C.s^{-1}



Příloha 3.9 - Teploty zjištěné jednotlivými termočlánky pro daný rozsah a teplotní krok při ochlazování po ohřevu rychlostí 100 °C.s^{-1} (teploty uvedeny ve °C)

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]							
	První měření				Druhé měření			
	0	6,2	12,4	18,6	0	6,2	12,4	18,6
1200	1201.1	1156.2	846.4	357.6	1200.9	1155.8	846.6	357.5
1100	1100.2	1048.4	748.3	323.1	1100.5	1048.7	748.9	323.7
1000	1000.3	945.7	661.7	298.9	1000.3	945.1	661.1	298.8
900	900.0	844.1	590.3	276.1	900.2	844.4	589.8	275.9
800	800.2	747.6	525.7	254.1	800.1	747.5	524.7	254.0
700	700.2	649.8	456.6	229.1	700.1	648.1	453.9	228.4
600	600.4	532.8	378.9	200.0	600.4	532.6	377.7	199.5
500	500.2	457.4	337.5	184.9	500.2	456.7	336.3	184.2
400	400.2	370.6	284.3	163.8	400.5	370.4	283.4	163.7
300	300.6	281.0	222.8	137.8	300.6	280.7	222.0	137.8
200	200.1	189.7	156.4	106.5	200.2	189.6	156.0	106.2
100	100.4	98.6	86.2	68.8	100.3	98.0	85.8	68.5
30	29.6	29.7	29.6	29.8	29.9	29.9	29.9	30.2

Příloha 4 – Průběhy teplot při velmi vysokých rychlostech ohřevu (teploty uvedené ve °C)

a) 500 °C.s^{-1}

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]				Čas [s]
	0	3	6	9	
25	25.3	25.2	25.5	25.8	0.000
100	100.7	111.2	116.3	111.4	5.256
200	200.4	215.7	231.2	209.4	5.438
300	300.1	317.8	342.7	296.6	5.620
400	400.5	419.7	451.0	364.6	5.808
500	500.3	521.1	551.7	408.7	6.000
600	600.1	622.6	645.9	445.8	6.202
700	699.8	722.5	734.6	486.3	6.414
800	800.2	826.8	834.8	521.9	6.598
900	899.8	931.2	926.9	527.0	6.766
1000	1000.4	1028.7	995.5	523.6	6.970
1100	1100.4	1126.1	1065.9	535.8	7.172
1200	1200.4	1222.0	1138.9	555.1	7.974

b) 1000 °C.s^{-1}

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]				Čas [s]
	0	3	6	9	
25	25.0	24.7	25.3	25.4	0.000
100	100.5	112.1	119.2	112.0	5.177
200	199.9	219.2	236.0	217.7	5.287
300	299.6	323.7	353.1	333.0	5.384
400	399.8	426.6	470.8	430.5	5.477
500	499.7	530.9	585.2	502.2	5.574
600	600.2	634.8	689.8	556.8	5.672
700	700.0	737.4	800.2	605.4	5.789
800	800.7	850.8	950.5	648.7	5.889
900	899.6	964.0	1067.6	683.8	5.966
1000	1000.1	1064.3	1161.3	713.8	6.042
1100	1100.5	1164.2	1250.3	739.8	6.134
1200	1200.2	1267.7	1331.9	751.1	6.256

c) 4000 °C.s^{-1}

Teplota [°C]	Vzdálenost od středu vzorku [mm]				Čas [s]
	0	3	6	9	
25	24.4	24.3	24.7	25.0	0.0000
100	100.1	110.4	118.6	113.0	6.1052
200	200.3	218.6	238.5	224.8	6.1764
300	300.0	327.6	360.6	363.1	6.2430
400	400.3	432.5	483.2	491.0	6.3062
500	500.0	537.2	601.3	587.9	6.3682
600	600.2	641.8	707.8	659.2	6.4352
700	700.0	748.2	842.1	720.7	6.5152
800	800.0	862.8	1003.9	791.3	6.5832
900	899.9	978.9	1130.9	852.8	6.6374
1000	1000.4	1081.1	1237.1	907.8	6.6852
1100	1100.0	1182.3	1337.4	954.1	6.7396
1200	1200.0	1283.3	1407.2	918.6	6.8426