



CHLADÍCÍ ÚČINEK KAPALNÉHO CO₂ U KOVOVÝCH JADER SLÉVÁRENSKÝCH FOREM

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 – Strojírenská technologie
Autor práce: **Bc. Martin Fikar**
Vedoucí práce: prof. Ing. Iva Nová, CSc.



Originální zadání DP

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou 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 diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou 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.

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

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

Datum:

Podpis:

Abstrakt:

Tato práce se zabývá chlazením pomocí kapalného CO₂ ve slévárenství. Zaměřuje se především na chlazení jádra ve slévárenské formě. Dále popisuje způsob a optimalizaci chlazení kapalným CO₂ na reálném jádře v reálných podmínkách. Na závěr obsahuje zhodnocení výsledků jednotlivých způsobů měření.

Klíčová slova: Tlakové lití, Kapalné CO₂, Chlazení

Abstract:

This thesis is focused on cooling by liquid CO₂ in the die casting. There are described methods of cooling pressure casting mold. Other topics talk about cooling by liquid CO₂ on the real pressure core in real conditions. At the end, there are includes evaluation of the results of the individual methods of measurement.

Key words: Die casting, Liquid CO₂, Cooling

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval prof. Ing. Ivě Nové, CSc. a Ing. Ivě Novákové, Ph.D., za připomínky a cenné rady při psaní této diplomové práce.

OBSAH

1 ÚVOD	8
2 TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE	9
2.1 Technologie vysokotlakého lití	9
2.2 Tlaková slévárenská forma	11
2.3 Temperace slévárenských forem	14
2.4 Fyzikálně chemické vlastnosti CO ₂	21
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	25
3.1 Měřicí zařízení	25
3.2 Zkušební jádro	27
3.3 Popis experimentů	28
3.4 Přehled naměřených výsledků	30
3.5 Vyhodnocení naměřených výsledků	40
4 DISKUZE VÝSLEDKŮ	46
5 ZÁVĚR	51
6 POUŽITÁ LITERATURA	53

Seznam použitých zkratek:

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
CO ₂	-	Oxid uhličitý
P	[MPa, bar]	Tlak
V	[m ³]	Objem
T	[s]	Čas
Q	[J]	Teplo
m	[kg]	Hmotnost
L _{PR}	[J. kg ⁻¹]	Latentní teplo
c _p	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita
T	[K]	Teplota
ρ	[kg.m ⁻³]	Hustotu
S	[m ²]	Průřez kanálu kapiláry
v	[m.s ⁻¹]	Rychlost
t	[s]	Čas proudění kapilárou

1 ÚVOD

Lití pod tlakem vzniklo v roce 1838 a používalo se v tiskárenství. Ve strojírenství se používá od roku 1894. V Československu se tlakové lití používalo od dvacátých let 20. století, kdy Ing. Polák použil principiálně nový způsob tlakového lití (zprvu pro odlévání mosazi), u kterého se tavenina nalévala lžící do licí komory a z té se pomocí licího pístu vháněla do dutiny formy. Tak vznikly první tlakové licí stroje se studenou plnicí komorou, která se nacházela mimo udržovací pec, [1].

Technologie tlakového lití je jednou z nejvíce používaných metod pro výrobu odlitků ze slitin hliníku. Tato metoda umožňuje výrobu tvarově složitých, rozměrově přesných, tenkostěnných odlitků s vynikající jakostí povrchu. U odlitků je možno upustit od přídavek na obrábění a ušetřit odlévaný materiál. Tlakové lití se používá vždy tehdy, když je zapotřebí výroba velkého počtu kusů. Objem výroby tlakově litých odlitků ze slitin hliníku každoročně narůstá. Proto jsou na celý proces tlakového lití, a jeho vývoj, kladeny velké nároky ve všech směrech. Kvalita vysokotlakých odlitků je závislá na celé řadě parametrů. Jedním z nich jsou tepelné poměry mezi odlitkem a tlakovou licí formou, proto je velká pozornost věnována její teplotě. Velkým problémem je přehřívání tenkých výstupků, zejména jader malých průměrů, které způsobuje snížení jejich životnosti, prodlužuje dobu ošetření a negativně působí na kvalitu odlitku. Tam, kde klasické způsoby chlazení jader nepostačují, nebo je není možné aplikovat, se hledají nové způsoby. Jednou z nových možností chlazení přehřívajících se míst je využití chladicího účinku kapalného CO₂. Právě touto problematikou se zabývá předložená diplomová práce.

Problematickou chladicího účinku různých médií vysokotlakých slévárenských forem se v poslední době zabývá naše pracoviště, TU v Liberci - FS, Katedra strojírenské technologie. Také v tomto smyslu je řešena má diplomová práce, která je na téma: "Chladicí účinek kapalného CO₂ u kovových jader slévárenských forem".

Tato práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže SGS 21005 ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

2 TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

2.1 Technologie vysokotlakého lití

Principem technologie vysokotlakého lití je vstřikování taveniny do dutiny kovové formy pod vysokým tlakem (až 250 MPa). Za těchto podmínek je možné vyrábět tvarově velmi komplikované odlitky s tloušťkou stěn přibližně 1–2 mm, u některých slitin i méně než 1 mm. Rozměry odlitků jsou velmi přesné – u menších rozměrů lze dosáhnout přesnosti až 0,3 – 0,5 %, čímž odpadá potřeba následného obrábění. Povrch odlitků je hladký a jemnozrná struktura zaručuje dobré mechanické vlastnosti. Jako další výhodu lze uvést menší náklady na materiál. V odlitcích se dají předlévat i otvory velmi malých průměrů s malým dodatečným opracováním. Tvar odlitku musí respektovat možnosti rozebírání formy a vytažení volných částí a jader. Maximální rozměry odlitku jsou dány velikostí stroje. V tlakových licích formách je nutné používat výhradně kovová jádra, [1], [2].

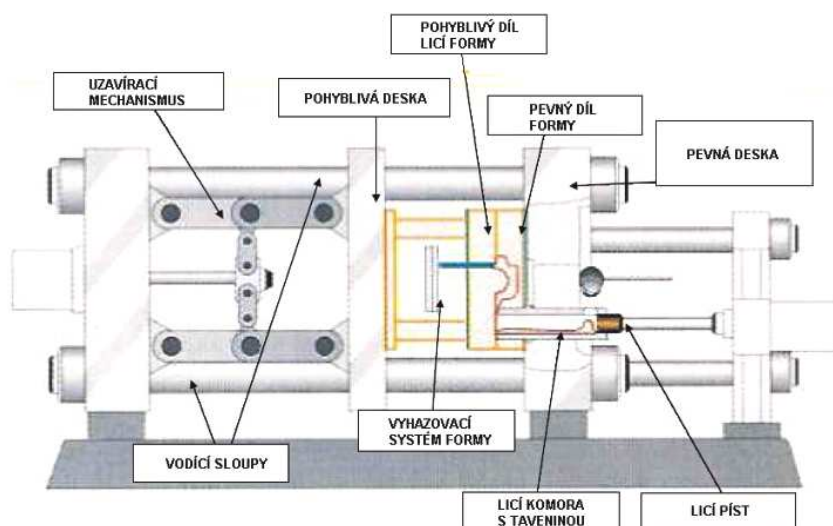
Za nevýhody tlakového lití lze považovat především vysoké investiční náklady na pořízení tlakového licího stroje a náklady na výrobu slévárenské formy. Nevýhodou odlitků je jejich porezita a nerovnoměrná struktura.

Obecně lze technologii tlakového lití rozdělit dle typů používaných licích strojů, a to na technologii tlakového lití na strojích s teplou a studenou tlakovou licí komorou. Pro vysokotlaké lití odlitků ze slitin hliníku se používají tlakové licí stroje se studenou horizontální licí komorou, viz obr. 2-1 a 2-2, [1], [3].



Obr. 2-1 Příklad tlakového licího stroje s horizontální studenou komorou [3]

Tlakový licí stroj je vybaven **elektronickým řídicím systémem**, který zajišťuje ovládání licího stroje a přímé řízení externích zařízení (dávkování kovu, ošetření formy, mazání licí komory atd.). Řídicí systém lze obvykle snadno propojit do systému centrálního sběru dat, [5].



Obr. 2-2 Schéma jednotlivých částí licího stroje s horizontální studenou komorou, [3].

Pohon a řízení stroje je většinou hydraulické. Plynulou regulaci průtoku a tlaku provozní kapaliny pro jednotlivé funkce tlakových licích strojů zajišťují hydraulické agregáty. Stroje pracují s běžnými druhy minerálních hydraulických olejů, z bezpečnostních důvodů je možné používat typ provozní kapaliny na bázi glykol-voda. Předepsaný objem provozní kapaliny bývá průběžně kontrolován a současně se reguluje její provozní teplota (předehřev a chlazení), [5].

Mezi hlavní části tlakového licího stroje patří uzavírací a lisovací mechanismus.

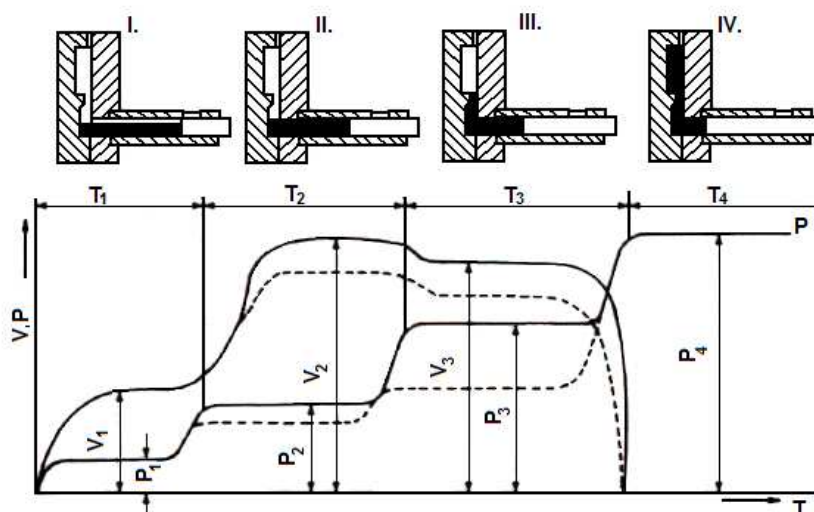
Uzavírací mechanismus umožňuje uzavření a otevření formy pohybem pohyblivé desky s pohyblivým dílem licí formy. Nejčastěji je tvořen kloubovým mechanismem se čtveřicí vodících sloupů. Spojovací čepy jednotlivých článků jsou uloženy ve speciálních kalených ocelových pouzdrech. Kloubový mechanismus je ovládán hydraulickým válcem. Všechny třecí a vodící plochy uzavíracího mechanismu jsou mazány v závislosti na počtu provedených cyklů stroje. Centrální přestavovací zařízení (elektromotor) uzavíracího mechanismu, umožňuje automatickou regulaci uzavírací síly, [5].

Lisovací mechanismus má za úkol dopravit danou dávku roztaveného kovu do dutiny formy. To se uskutečňuje přes plochu hydraulického lisovacího pístu. Lisovací mechanismy jsou dvojího provedení, s multiplikátorem a bez multiplikátoru. Pro dosažení potřebné plnicí síly u lisovacího mechanismu bez multiplikátoru působí akumulátorový tlak přímo na plochu hydraulického pístu. Pístový akumulátor umožňuje dosažení strmého náběhu lisovací rychlosti. Stroje vybavené multiplikátorem dosahují potřebné plnicí síly násobením akumulátorového tlaku na plochu hydraulického lisovacího pístu, [5].

Odléváný kov je během plnění dutiny formy zprvu jen pod okolním tlakem, který v závislosti na provedení odvzdušňování postupně narůstá. Po ukončení plnění formy, které proběhne v poměrně krátkém čase, pak odléváný kov tuhne zatížen vysokým statickým tlakem, tzv. dotlakem (cca 60 – 100MPa). Tlak na konci plnění formy umožňuje zatečení ještě tekutého licího kovu do nejužších průřezů a zlepšuje reprodukci tvaru formy. Takto, v podstatě jedinou operací, je tekutý kov v několika sekundách přeměněn v tvarově komplikovaný odlitek

Lisování taveniny je rozděleno do několika postupně navazujících fází. Jednotlivé fáze plnění dutiny formy jsou zobrazeny na obr. 2-3:

- I. v čase 0 až T_1 : naplnění plnicí komory tlakového licího stroje potřebným množstvím tekutého kovu – tlak na kov ještě nepůsobí;
- II. v čase T_1 až T_2 : tzv. hrubé plnění – dochází k naplnění dutiny formy tekutým kovem – vtokovým systémem prochází velké množství kovu vysokou rychlostí, nastává velké tření a část pohybové energie proudu kovu se proto mění v teplo, teplota kovu se zvyšuje;
- III. v čase T_2 až T_3 : doplňování kovu do formy – v této fázi je forma pouze doplňována ve všech detailech působením hydrodynamického tlaku proudícího kovu, hodnota tlaku vzrůstá rychleji, až dosáhne maxima;
- IV. v čase T_3 až T_4 : po úplném vyplnění dutiny formy kovem, přestane působit dynamický účinek a po dobu tuhnutí na kov působí pouze hydrostatický tlak.

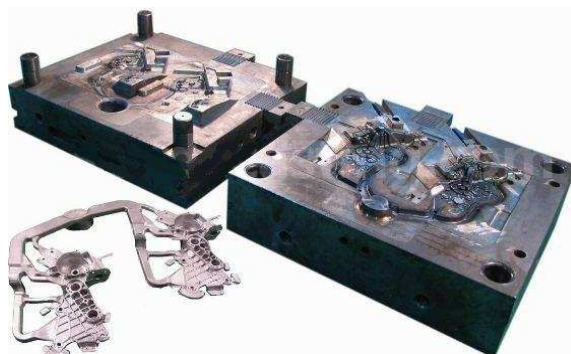


Obr. 2-3 Fáze plnění dutiny formy, [1].

2.2 Tlaková slévárenská forma

Slévárenská forma je „nádobá“ vyrobená ze žáruvzdorného materiálu, jejíž dutina odpovídá svým tvarem negativu budoucího odlitku, viz obr. 2-4. Dutina formy

je vždy větší o míru smrštění (lineární smrštění odlévané taveniny), přídavky na obrábění a technologické úkosy.



Obr. 2-4 Tlaková licí forma, [8]

Na konstrukci a materiál tlakových forem jsou kladeny velké nároky. Při každém licím cyklu je licí forma vystavována tepelnému, mechanickému a v neposlední řadě také chemickému účinku taveniny. Proto je pro výrobu forem nejčastěji volen materiál s dobrou tepelnou vodivostí, nízkou tepelnou roztažností, vysokou mezí pevnosti a kluzu, dobrou prokalitelností a rozměrovou stálostí při teplem zpracování, [3].

Na výrobu tlakových licích forem se nejčastěji používá nástrojová ocel třídy 19 – chrom-molybden-vanadová ocel určená pro práci při vysokých teplotách. Pro ty méně namáhané části formy se používají konstrukční legované oceli (Cr-Mo-V); např.: 1.2311. Pro tvarové vložky pracující za tepla se používají nástrojové legované oceli (Cr-V-W-Mo); např.: 1.2343, 1.2344. Jednotlivé části formy bývají tepelně zpracovány, [3].

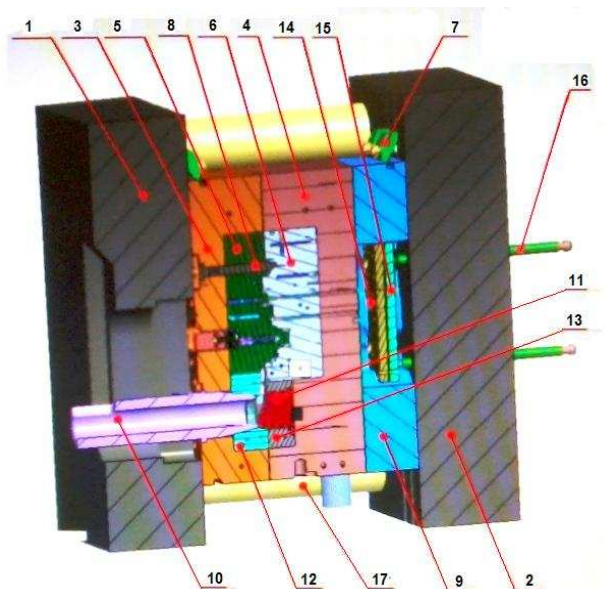
Dutiny formy se dnes vyrábí pomocí tvarových ocelových vložek, které lze při poškození vyměnit.

Forma se skládá z pevné a pohyblivé části. Každá část formy je upnuta k rámu stroje pomocí upínek. Jednu část formy tvoří deska s vložkou upnutá k pevnému rámu stroje, tzv. pevná část formy. Druhou část formy tvoří deska s vložkou upnutá k pohyblivému rámu stroje, tzv. pohyblivá část formy. Na pohyblivé části formy je obvykle deska vyhazovačů a vyhazovače. Tlakovou licí formu tvoří další komponenty jako například jádra a jiné části zobrazené na obr. 2-5.

Každá forma má systém temperačních kanálů, kterými protéká medium, které zabezpečuje potřebnou pracovní teplotu formy. Temperačním médiem bývá nehořlavá kapalina proudící temperačním okruhem formy danou rychlostí. Temperační okruh je připojen na speciální temperační zařízení umožňující chlazení nebo ohřev tlakové licí formy, [2], [3], [7].

Tab. 1 Vybrané materiály používané na výrobu forem dodávané firmou BÖHLER UDDEHOLM, [11].

Materiál	Popis	AISI (DIN)	Složení [%]						Tvrdost [HB]
			C	Si	Mn	Cr	Mo	V	
DIEVAR	Cr-Mo-V legovaná ocel pro práci za tepla s dobrou pevností za vysokých teplot a vynikající prokalitelností, houževnatostí a tažností. Vhodné pro výrobu středně velkých až velkých tlakových Al odlitků.	-	0,35	0,2	0,5	5,0	2,3	0,6	~160
ORVAR SUPREME	Cr-Mo-V legované oceli pro práci za tepla (H13) odolné proti tepelné únavě. Vyráběné speciální technikou tavení a rafinace.	H13 (1.2344)	0,39	1,0	0,4	5,2	1,4	0,9	~180
QRO 90 SUPREME	Ocel pro práci za tepla s vysokou mezí kluzu. Vhodné pro malé vložky a jádra pro tlakové lití Al.	-	0,38	0,3	0,8	2,6	2,3	0,9	~180



1 – pevný rám stroje, 2 - pohyblivý rám stroje, 3 – pevná deska formy, 4 – pohyblivá deska formy, 5 – pevná vložka formy, 6 – pohyblivá vložka formy, 7 – upínka, 8 – jádro formy, 9 -stolička, 10 – lící komora, 11 – protikužel tablety vtokové soustavy, 12 – pevná vložka vtokové soustavy, 13 – pohyblivá vložka vtokové soustavy, 14 – deska vyhazovačů, 15 – deska vyhazovací, 16 – vyrážecí tyče, 17 - sloup stroje

Obr. 2-5 Schéma tlakové lící formy, [8]

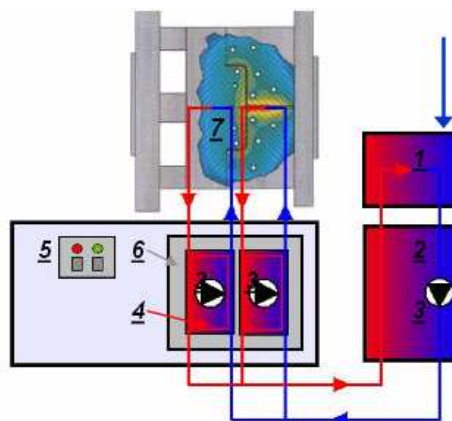
2.3 Temperace slévárenských forem

Slévárenské formy jsou vybaveny temperačním systémem, který zajišťuje optimální teplotní podmínky v průběhu lícího cyklu. Toho se docílí ochlazováním, popř. ohříváním tlakové lící formy.

V dnešní době se používají dva způsoby temperance, tzv. „evropský“ a „asijský“. Princip „Asijského“ způsobu temperování spočívá v odvádění tepla pouze z kritických míst (tepelných uzlů) pomocí soustavy otvorů (několik set) vrtaných kolmo k dělicí rovině. Každý tento otvor je opatřen samostatným přívodem a odvodem chladicí kapaliny. Odvádění tepla z kritických míst je velkou předností tohoto způsobu. Naopak nemožnost předehtevu formy je velkou nevýhodou této temperance, [12].

„Evropský“ směr temperování využívá soustavu kanálů vesměs rovnoběžných s dělicí rovinou, kterou proudí chladicí medium nejčastěji olej, glykol nebo voda. Oproti výše uvedenému způsobu temperance umožňuje způsob používaný v Evropě ohřev formy před začátkem a chlazení v průběhu pracovního procesu. Naopak nevýhodou tohoto způsobu temperance je omezená schopnost chlazení přehřátých míst v tlakové lící formě, [12].

V České republice se využívá výhradně „evropský“ způsob temperance forem, kde termoregulační zařízení zajišťuje předehtev forem před začátkem výrobního procesu, dohřívání formy během prostojů a chlazení během výrobního procesu. Pevná i pohyblivá část formy má svůj temperační okruh, viz obr. 2-6, [12].

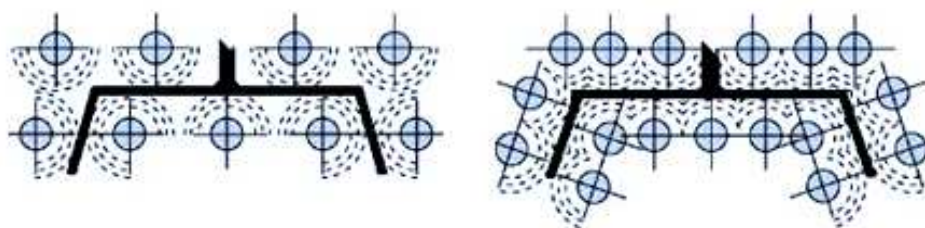


1 - chladicí nádrž s přívodem vody, 2 - zásobárna vody, 3 - čerpadlo, 4 - topení, 5 - regulátor, 6 - chladicí jednotka, 7 - tlaková lící forma

Obr. 2-6 Schéma temperační jednotky, [4]

Odvádění tepla přivedeného do formy slitinou a odvedeného temperačním systémem by mělo být co nejrovnoměrnější. Proto se kanály ve formě rozdělují do jednotlivých okruhů a měly by být co nejbližší k tvarové dutině formy. Je výhodnější

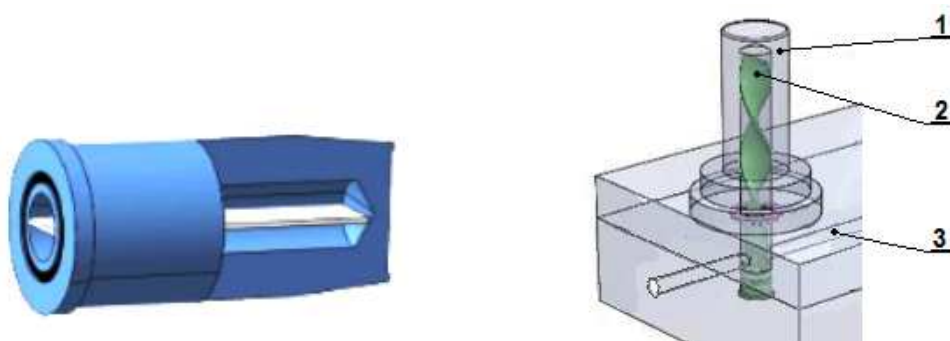
používat větší počet kanálů o menším průřezu vrtání, viz obr. 2-7. Médium má být přivedeno nejprve k nejintenzivněji ohřívanému místu formy (vtoku) dále pak vedeno ve směru poklesu teplotních rozdílů. Problémovým článkem lící formy z hlediska temperance jsou jádra, jelikož jsou celá zalitá taveninou. Především pak jádra tenkých průřezů jsou nedostatečně chlazená a velmi se přehřívají. To má za následek nalepování taveniny a následné snižování životnosti jádra. Přehřátá tenká jádra způsobují ve struktuře odlitku v oblasti špičky ve velké míře porezitu. U dostatečně chlazených jader je struktura odlitku bezchybná.



Obr. 2-7 Vhodnost rozložení temperačních kanálů. Nevhodné (vlevo), vhodné (vpravo), [4]

Temperace, respektive chlazení jader může být provedeno několika různými způsoby:

Standardní vodní chlazení lze použít u jader od průměru 8 mm. Pro chlazení těchto jader je možné použít temperační kanál s přepážkou nebo temperační šnek, viz obr. 2-8, [4].



1 - jádro, 2 – spirálová přepážka, 3 – temperační okruh

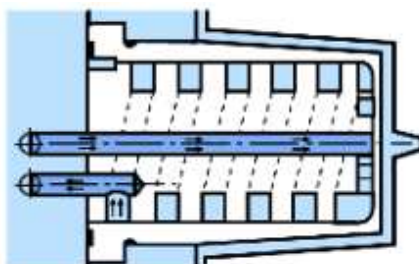
Obr. 2-8 Temperační kanál s přepážkou (vlevo), spirálová přepážka (vpravo), [4]

Chladicí efekt a s tím i odvod tepla u temperačního kanálu s přepážkou by mohl být na jedné straně dutiny či jádra rozdílný než na straně opačné, což je nevýhodné pro výsledný napěťový stav odlitku, [4].

Tomuto efektu je možné předejít použitím spirálové přepážky, která řeší problém dopravy temperačního média do vrcholu vrtaného kanálu v jádře a zpět. Výhodou tohoto typu chlazení jader je vytvoření vysoce homogenního teplotního pole

okolo dutiny jádra. Nejobvyklejší provedení těchto spirálových přepážek je zobrazen na obr. 2-8, [4].

Temperační šnek je tvořen vložkou v dutině jádra, ve které proudí k vrcholu vnitřním průměrem vložky chladicí kapalina. Zpět se vrací spirálovým kanálem mezi stěnou dutiny formy a stěnou vložky. Rozdělení teplotního pole je homogenní a odvod tepla je tímto způsobem oproti jednoduchému přepážkovému výrazně zvýšen.



Obr. 2-9 Temperační šnek, [4]

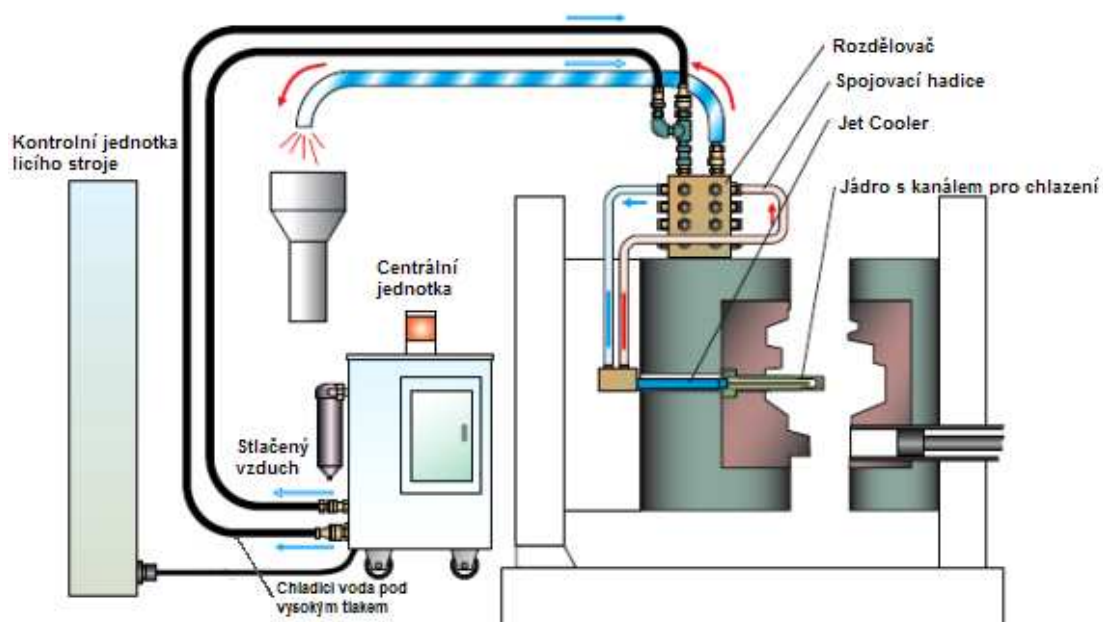
Jetcool – je metoda používaná na chlazení jader menší průměrů (od 4 mm). Jako chladicí medium je zde voda. Tato metoda je nejčastěji využívána pro chlazení jader umístěných na pevné a pohyblivé části formy. Jiné umístění, jako např. u bočních jader, může být komplikované, v některých případech nemožné.

Jednou z hlavních částí tohoto chladicího zařízení je rozdělovač, který je umístěn na formě. Rozdělovač je propojen pěti hadičkami s dalšími zařízeními. Pomocí tří hadiček je spojen s centrální jednotkou. Dvě slouží na přívod vody a vzduchu, třetí je pro odvod vody a vzduchu. Další dvě hadičky slouží jako přívod a odvod k jet-cooleru v jádru. Tyto dvě hadičky jsou dimenzovány na pracovní tlak 2 kPa a teplotní zatížení do 250°C. Za řízení jetcool je zobrazeno na obr. 2-10, [12].

Proces chlazení jetcool se nastartuje poté, co centrální jednotka zaznamená začátek licího cyklu. Neprodleně začne centrální jednotka plnit přes rozdělovač jet-cooler v dutině jádra vodou o vysokém tlaku. Po styku jádra s taveninou se chladicí médium přemění na páru a vodu. Chlazení takto probíhá několik sekund (5-10). Následuje vyfouknutí chladicího média pomocí stlačeného vzduchu.

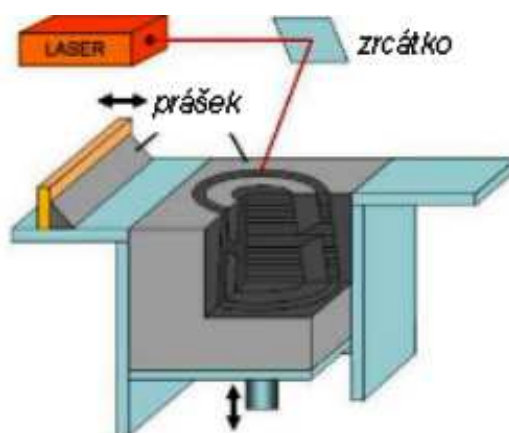
Je možné chladit více jader najednou, případně i v několika oddělených okruzích, kde každý okruh může mít různou délku vstřikovacího cyklu.

Chladicí agregát může pracovat jako otevřený i uzavřený systém. U otevřeného systému jde chladicí voda přímo do odpadu. U uzavřeného se temperační médium přes chladič vrací k opětovnému použití. Uzavřený systém potřebuje denně 2 až 3 litry demineralizované vody.



Obr. 2-10 Schéma chlazení Jetcool, [7]

LaserCusing – Process, je výroba temperačního systému, za účelem intenzivnějšího chlazení jader. Toho se docílí výrobou chladících kanálů i v takových místech, kde to jinými technologiemi nelze zajistit. Tato metoda spočívá v postupném tavení kovového prášku ve vrstvách vlivem laserového paprsku v pracovní komoře obr. 2-11. Základem pro LaserCusing - process jsou 3D CAD data v příslušném zařízení, kde je počítačový model rozřezán na velmi tenké vrstvičky. Dávkuje se určité množství prášku pro jednu vrstvu a rameno s keramickým břítem rozprostře na povrch ocelové základové desky kovový prášek podle vrstvy. Laser následně taví prášek a to v konturách řezu. Takto pokračuje postupné spojování kovového prášku do vrstev, včetně protavení k podkladové vrstvě až do finálního celku dílu. Tloušťka vytvářených vrstev je od 0,02 až 0,04 mm. Výrobek dosáhne požadované tvrdosti následným tepelným zpracováním.

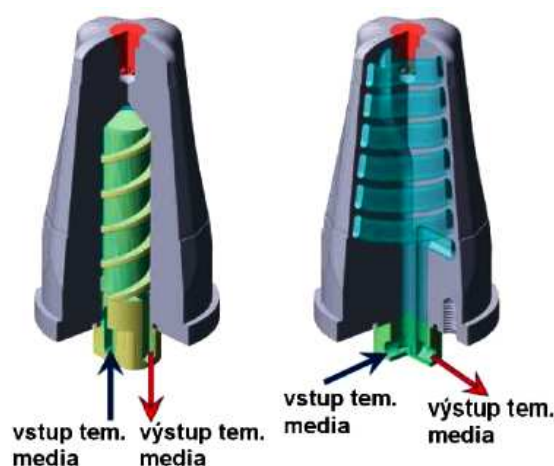


Obr.2-11 Princip výroby jádra metodou LaserCusing – process, [4]

Příklady reálného výrobku a 3D modelu jsou na obr. 2-12. Porovnání mezi chladicími kanály jádra vyrobenými vrtáním s temperační šnekem a jádrem vyrobeným metodou LaserCusing – process je na obr. 2-13, [4].



Obr.2-12. Jádru vyrobené metodou LaserCusing – process. Reálný výrobek (vlevo), 3D model (vpravo), [4]



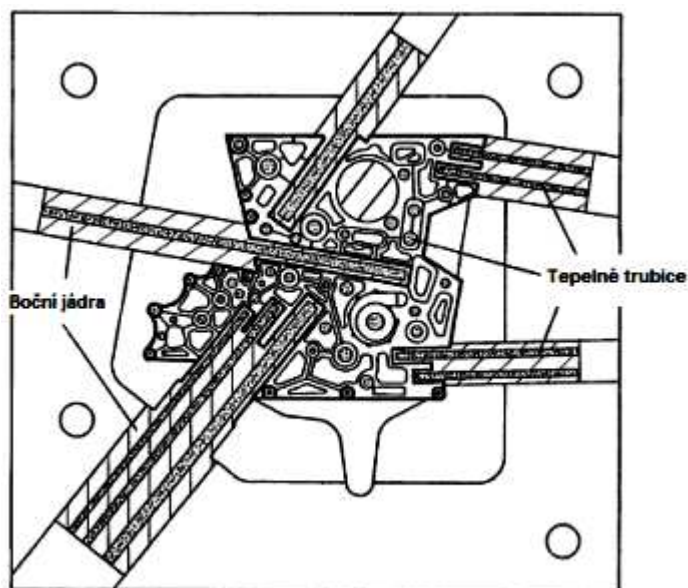
Obr.2-13 Chlazení vrtáním v ose jádra (vlevo). Soustava chladicích kanálů jádra vyrobených metodou LaserCuding-process (vpravo), [4]

Dalším možným způsobem chlazení jader je využití **tepelné trubice**, viz obr. 2-14. Tato metoda využívá tepelných vlastností teplotnosného média, kterým bývá čpavek, freon, methylalkohol, rtuť, difenyl nebo voda a pláště trubice vyrobeného z hliníku, mědi nebo oceli. Tento tlakotěsný plášť naplněn teplotnosným médiem přenáší teplo z oblasti o vyšší teplotě do oblasti o nižší teplotě. Tento proces probíhá odpařením teplotnosného média na teplé straně trubice a kondenzací na chladném konci, přičemž přenos tepla obstarává kapalina nebo pára, viz obr. 2-15.

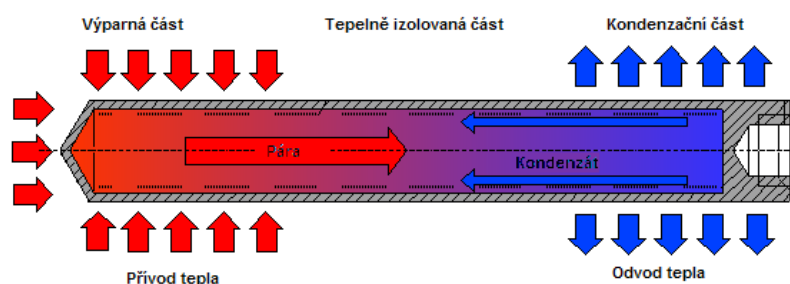
Vyrábí se celá řada typů tepelných trubic, např. gravitační, kapilární, rotační, atd. Trubice mají různé tvary - nejčastěji válcové, kuželové nebo deskové a různé pracovní rozsahy. Např. ocelový plášť s difenylovou náplní má rozsah 150- 350°C.

Tepelné trubice zabudované v jádrech odvádějí teplo do chladnější části formy nebo je jejich kondenzační část chlazena temperačním médiem chladicího okruhu. Nejvýhodnější je používat trubice s co největším průměrem odpovídající minimálně polovině průměru jádra. Délka trubic vychází z předpokladu, že výparná část, tepelně izolovaná část a kondenzační část tvoří vždy jednu třetinu tepelné trubice.

Vzhledem k jejich nízkému výkonu nenašly tepelné trubice v tlakovém lití hliníku příliš velké uplatnění.



Obr. 2-14 Chlazení pomocí tepelných trubic, [9]



Obr. 2-15. Schéma tepelné trubice, [9]

Chlazení pomocí tekutého CO₂ je inovativní způsob temperace, respektive chlazení doplňující běžné vodní chlazení tlakových forem. Aplikace kapalného oxidu uhličitého se používá především na chlazení přehřátých a obtížně dostupných částí slévárenské formy, jako jsou tepelné uzly, tvarově členité části formy nebo tenká jádra, kde je vodní chlazení z technických důvodů nemožné.

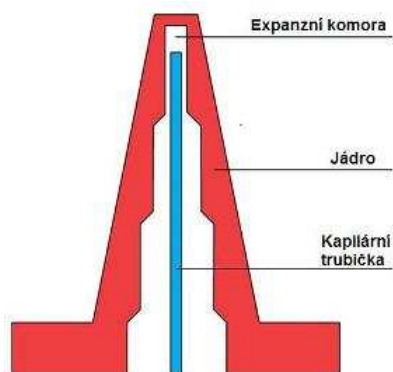
Využívá expanze kapalného CO₂ do expanzních prostorů formy. CO₂ existuje v kapalném skupenství při tlaku 0,5 MPa a vyšším. Rozeznáváme dvě možné aplikace, tj. **Technologii Tool-Vac** a **Spot cooling**.

Technologie Tool-Vac je nový intenzivní způsob vyvinutý německou firmou Doboha Werkzeugbau GmbH ve spolupráci se švédskou firmou AGA Gas AB, [4]. Způsob chlazení je založen na odpařování kapalného CO₂ přiváděného zpravidla do speciálních mikroporézních ocelových tvarových částí tlakové formy „Toolvac-Stahl“ (např. ocel TVBX 03). Transport kapalného CO₂ ze zásobníku do expanzního prostoru zajišťují kapiláry o světlosti 0,3-0,5 mm. Na základě poklesu tlaku mezi zásobníkem a formou se kapalný CO₂ začne vypařovat a měnit své skupenství na plynné. Plyn snadno projde skrz porézní ocel až k povrchové vrstvě dutiny formy. Z fyzikálního vztahu mezi teplotou a tlakem je zřejmé, že energetický obsah CO₂ je v plynné fázi mnohem větší než v kapalně a v důsledku toho se začne pohlcovat tepelná energie vycházející z odlitku. Výhodou tohoto chlazení je oproti vodnímu temperačnímu systému schopnost udržet teplotu na konstantní hodnotě v celé dutině formy. Kapalný CO₂ je do formy přiváděn v předem naprogramovaných časových impulsech a celý proces je kontrolován řídicí jednotkou.

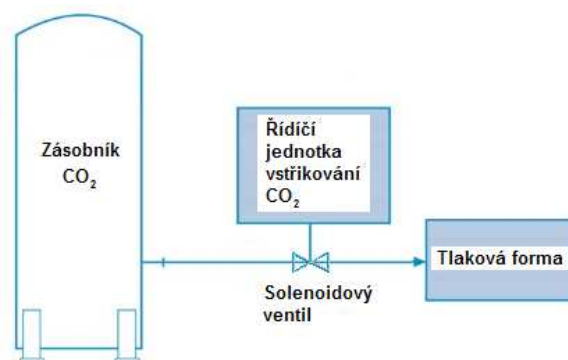
Tento způsob temperace je ve velké míře požíván ve formách pro zpracovávání plastů. Na chlazení tlakových forem pro hliníkové odlitky jej bohužel není možné aplikovat.

Pro chlazení přehřátých míst tlakových licích forem vyrobených z konvenční nástrojové oceli se uplatňuje metoda chlazení **Spot cooling**. Při temperování „konvenční“ tlakové formy je kapalný CO₂ přiváděn do expanzního prostoru, kde dochází k jeho odpařování, avšak na rozdíl od mikroporézní oceli, nemůže oxid uhličitý být veden stěnou oceli a k přenosu tepla tak slouží jen povrch expanzního prostoru, nikoliv celý prostor obklopující tvarovou dutinu formy, viz obr. 2-16.

Kapalně CO₂ se ze zásobníku přivádí do solenoidových ventilů, odkud je pak v předem naprogramovaných intervalech, navolených v řídicí a kontrolní jednotce, obr. 2-17, dále rozváděn kapilárami až do expanzních komůrek. Vlivem poklesu tlaku mění své skupenství při teplotě -78,5°C na plynné. K tomu je potřeba energie, kterou odebírá CO₂ formou tepla z odlitku a tímto způsobem je odlitek chlazen. Okamžik pro vpuštění CO₂ do kapilár je u poloautomatických strojů nejčastěji signál stroje o sepnutí plnicí rychlosti. Kapilární trubičky z ušlechtilé oceli mají vnější průměr 0,8 až 1,6 mm a vnitřní 0,4 až 0,5 mm. Pro zvýšení účinnosti se dodává tekuté CO₂ do expanzní komůrky v pulzech a odvádí teplo z oblasti v okruhu 30 až 35 mm. Expandované CO₂ uniká podél kapilár z formy, v případě uzavřeného okruhu se vrací k novému zkapalnění a uskladnění do tlakových lahví.



Obr. 2-16 Kapilární trubička přivádějící CO₂ do expanzní komůrky, [15]



Obr. 2-17 Schéma zařízení na temperaci slévárenské formy pomocí kapalného CO₂, [18]

2.4 Fyzikálně chemické vlastnosti CO₂

Oxid uhličitý je za laboratorní teploty a atmosférického tlaku bezbarvý plyn bez chuti a zápachu. Jeho molekula je tvořena jedním atomem uhlíku, který na sebe dvojnými vazbami váže dva atomy kyslíku. Jinak je oxid uhličitý chemicky velmi stálý a nerozkládá se ani za vysokých teplot (2000°C). Oxid uhličitý, jak již bylo zmíněno, je při laboratorní teplotě a atmosférickém tlaku v plynném skupenství. Pokud však tento plyn stlačíme a zchladíme, zkapalní. Takto lze získat kapalný oxid uhličitý. Existuje však i oxid uhličitý v pevném stavu – suchý led. Snížením tlaku v nádobě s kapalným oxidem uhličitým se část kapalného oxidu odpaří, což způsobí rychlé snížení teploty zbylé kapaliny. Výsledkem je, že tato extrémně nízká teplota způsobí přechod kapaliny do pevné fáze a vzniká sněhu podobný suchý led. Důležitou vlastností suchého ledu je jeho schopnost sublimace. Při zvýšení teploty tedy netaje, ale přechází rovnou do plynného stavu. Navíc přímou sublimací na plyn nevznikají žádné odpadní produkty. Proto je suchý led využíván zejména jako chladící medium. Oproti vodě je pomocí něj možné chladit na velmi nízké teploty, [13], [14].

Oxid uhličitý je obvykle dodáván v tlakových lahvích jako zkapalněný plyn, jeho teplota je tedy stejná jako teplota okolí a produkt je pod tlakem kapalný. Jakmile

jej začneme z lahve odebírat, dochází k poklesu teploty produktu vlivem výparného a expanzního tepla, které je mu odebíráno. To se nejprve projeví ochlazováním příslušenství a rozvodů, se kterými je produkt v kontaktu a při výraznějším poklesu teploty tyto části namrzají. Efekt ochlazování je tím větší, čím rychlejší je odběr produktu. Při rychlém úniku produktu do atmosféry dochází ke tvorbě vloček pevného CO₂ (suchého ledu), které mají za normálních atmosférických podmínek teplotu -78,5 °C, [13], [14].

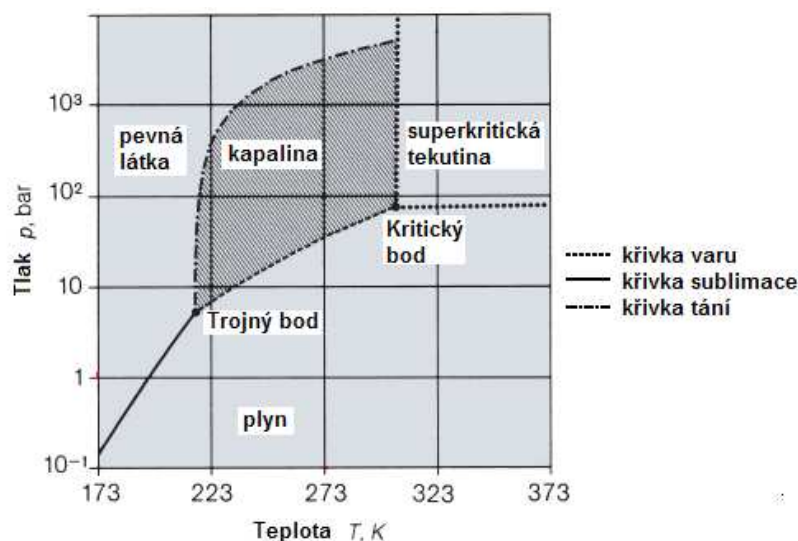
Fyzikálně chemické vlastnosti CO₂ jsou uvedeny v tabulce 2 a na obr. 2-18 je uveden jeho fázový diagram.

Tab. 2 Fyzikálně chemické vlastnosti CO₂, [19].

Molekulární váha	Molekulová váha	44,01 g/mol
Pevná fáze	Bod tání (1,013 barů a 0 °C)	-56,57 °C
	Latentní teplo fúze (1,013 barů, v trojném bodu)	204,93 kJ/kg
	Hustota pevné látky	1562 kg/m ³
Kapalná fáze	Hustota kapaliny (při -20 °C) a 19,7 barech)	1256,74 kg/m ³
	Ekvivalent kapalina/plyn (1,013 barů a 15 °C (na kg pevné látky))	845 vol/vol
	Bod varu (Sublimace)	-78,5 °C
	Tlak par (při 20 °C)	57,291 bar
Kritický bod	Kritická teplota	31,01 °C/ 304,16 K
	Kritický tlak	7,386 MPa
	Kritická hustota	467,6 kg/m ³
Trojný bod	Teplota trojného bodu	-56,6°C/ 216,55 K
	Tlak trojného bodu	0,5185 MPa
Plynná fáze	Hustota plynu (1,013 barů při bodu sublimace)	2,813 kg/m ³
	Hustota plynu (1,013 barů a 15 °C)	1,8714 kg/m ³
	Faktor stlačitelnosti (Z) (1,013 barů a 15 °C)	0,99435
	Měrná tíha	1,53
	Měrný objem (1,013 barů a 21 °C)	0,5532 m ³ /kg
	Měrné teplo při konstantním tlaku (Cp) (1,013 barů a 25 °C)	0,0374 kJ/(mol.K)
	Tepelná kapacita při konstantním objemu (Cv) (1,013 barů a 25 °C)	0,0289 kJ/(mol.K)
	Poměr měrných tepel (Gamma: Cp/Cv) (1,013 barů a 25 °C)	1,2941
	Viskozita (1,013 barů a 0 °C)	1,3711x10 ⁻⁰⁴ Poise
	Tepelná vodivost (1,013 barů a 0 °C)	14,674 mW/(m.K)
Různé	Rozpustnost ve vodě (1,013 barů a 0 °C)	1,7163 vol/vol
	Koncentrace ve vzduchu	0,04 %

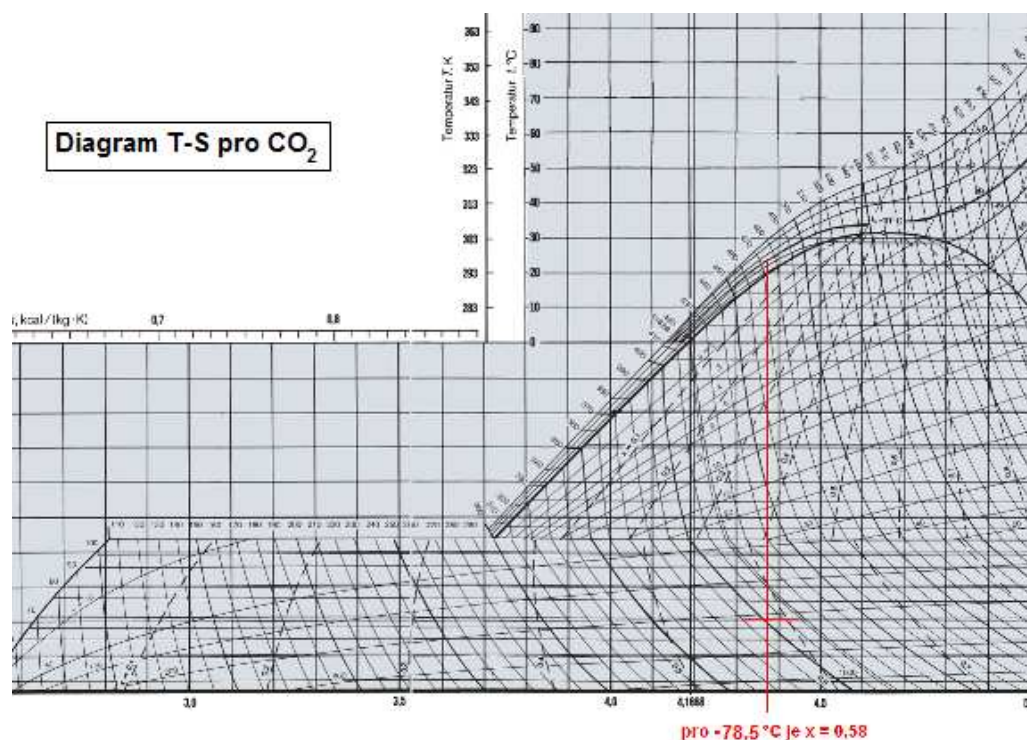
Z fázového diagramu je patrné, že vzhledem k vysokému tlaku trojného bodu (teplota 216,55 K, tlak 5,185 bar) nemůže oxid uhličitý existovat v kapalném stavu za atmosférického tlaku, může být pouze ve skupenství plynném, nebo pevném (suchý led). Kritický bod CO₂ má teplotu 304,15 K, a tlak 73,86 bar). Kritická teplota je však vyšší než teplota laboratorní. Lze tedy oxid uhličitý zkapalnit zvýšením tlaku i za

normálních teplot. Při teplotě přesahující teplotu kritickou nelze již plyn stlačením zkapalnit, [16].



Obr. 2-18 Fázový diagram CO₂, [17]

Při úniku kapalného CO₂ do atmosféry vzniká směs sněhových vloček a plynu. Toho se využívá v bodovém chlazení. Za předpokladu, že v tlakové láhvi má tekutý CO₂ teplotu 20 °C a při adiabatické expanzi (izentropický děj) se při teplotě – 78,5 °C vyskytuje 58% plynné fáze a 42% pevné fáze (suchý led), která dále sublimuje. Procentuální vznik plynné fáze je patrný z T–S diagramu pro CO₂ uvedeném na obr. 2-19, [12].



Obr. 2-19 Diagram T – S pro CO₂ s vyznačeným poměrem vzniklých produktů při adiabatické expanzi kapalně fáze z teploty -78,5 °C, [12]

Za předpokladu dávky 1g tekutého CO₂ vznikne 0,42 g suchého ledu a 0,58 g plynu. Množství tepla odebraného sublimací 0,42 g suchého ledu je dáno vztahem (2.2). Latentní teplo při -78,5°C a 0,1 MPa = 573130 [J. kg⁻¹], [12].

$$Q_{\text{sub}} = m_{\text{CO2S}} \cdot L_{\text{sub}} = 0,42 \cdot 573130 \cdot 10^{-3} = 240,7 \text{ [J]} \quad (2.1)$$

Množství tepla odebrané při ohřevu 0,58 g plynné fáze vzniklé při expanzi a 0,42 g plynné fáze vzniklé sublimací z teploty -78,9 °C na konečnou uvažovanou teplotu T₂ = 20°C je vyjádřeno vztahem 2.2, [12].

$$Q_{\text{ohř}} = m_{\text{CO2G}} \cdot c_p(T_2 - T_1) = 1 \cdot 845 \cdot 10^{-3} \cdot (20 - (-78,5)) = 83,6 \text{ [J]} \quad (2.2)$$

Celkový teoretický ochlazovací potenciál 1g tekutého CO₂ odebraného z tlakové láhve při 20°C a uvažovaném ohřevu plynných produktů na 20°C je dán vztahem 2.3, [12].

$$Q_{\text{CO2}} = Q_{\text{sub}} + Q_{\text{ohř}} = 240,7 + 83,6 = 324,3 \text{ [J]} \quad (2.3)$$

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Cílem tohoto experimentu, v rámci řešení mé diplomové práce, je optimalizace chlazení jádra slévárenské formy kapalným CO_2 při jeho různých způsobech vstřikování. K tomuto účelu bylo použito experimentální zařízení, které je k dispozici na KSP, viz kapitola 3.1. Toto zařízení slouží k simulaci chladicího účinku technických plynů v kovových tělesech, tak jak odpovídá reálným podmínkám ve slévárenství. Proto k měření bylo použito kovové jádro, viz obr. 3-2. Experimentální teplota tohoto jádra byla zvolena 400°C . Tato teplota odpovídá teplotě ve slévárenské formě při vysokotlakém odlévání. Cílem experimentů bylo stanovení chladicího účinku CO_2 přiváděného do zkušebního jádra v různých dávkách, viz kapitola 3.3. Byl sledován pokles teplot na povrchu zkušebního jádra, který souvisí s vytipováním vhodného způsobu dávkování CO_2 při výrobě odlitků vysokotlakým litím.

3.1 Měřicí zařízení

Měření bylo provedeno na speciálně navrženém a sestaveném měřicím zařízení, viz obr. 3-1. Měřicí zařízení je složeno z elektrické odporové pece, zásobníku kapalného CO_2 , řídicí jednotky pro vstřikování CO_2 a zaznamenávacího zařízení. Dále z termoelektrických článků pro měření a registraci teplot, kapilárních trubic a přívodní tlakové hadice chladicího média.

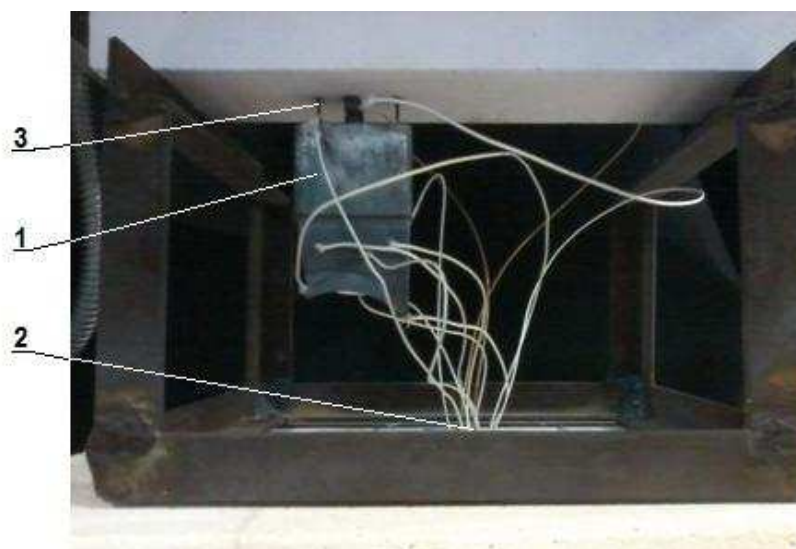


1 – odporová pec, 2 – zásobník CO_2 , 3 – řídicí jednotka vstřikování CO_2 , 4 – regulátor pece, 5 – zaznamenávací zařízení

Obr. 3-1 Měřicí zařízení

V podstavě pece je zaizolován vstupní otvor pro přívod termoelektrických článků a kapilár kapalného CO₂ ke zkoušenému jádru.

Zkušební jádro bylo v peci uloženo na speciálním přípravku. Tento přípravek, připevněný na podstavě pece nad vstupem termočlánků a kapiláry umožňuje montáž a fixaci kapilár k jádru, a dále držení jádra v centru pece viz obr. 3-2.



1 – zkušební jádro, 2 – vstupní otvor pro termočlánky a kapilární trubičky, 3 – kapilární trubička

Obr. 3-2 Jádru upevněné v přípravku

Kapilární trubičky z ušlechtilé oceli přivádí kapalně CO₂ od solenoidového ventilu do místa měření. Tento solenoidový ventil byl dále tlakovou hadicí propojen přes uzavírací ventil k zásobníku kapalného CO₂. Impuls pro otevření solenoidového ventilu, vstříknutí CO₂, zajišťuje programovatelná řídicí jednotka. Tato řídicí jednotka zobrazená na obr. 3-3 umožňuje kontinuální či sekvenční vstřikování. Délka vstřiku u kontinuálního nebo cyklus „vstřik-pauza-vstřik“ a počet opakování u sekvenčního vstřikování je možné volit dle potřeb uživatele. Řízení vstřikování je časové. Jedna vteřina vstřikování odpovídá hmotnosti 2,2 g vstříknutého CO₂.



Obr. 3-3 Řídicí jednotka vstřikování CO₂

Teplotní pole zkušebního jádra bylo měřeno pomocí termoelektrických článků chromel - almel (typ K). Termočlánky jsou na jedné straně připevněny svarem ke zkušebnímu vzorku. Na straně druhé byly zapojeny do sběrnice, které předávají signál do zaznamenávacího zařízení. Toto zaznamenávací zařízení je zobrazené na obr. 3-4. Teploty, které měří termoelektrické články, rozmístěné na zkušebním jádře je možné sledovat na displeji zaznamenávacího zařízení v reálném čase. Zápis měřených hodnot do paměti probíhá pomocí USB portu. Intenzita snímání byla 20 scanů za sekundu.



Obr. 3-4 Pohled na display zaznamenávacího zařízení

3.2 Zkušební jádro

Zkušební jádro bylo zhotoveno z materiálu DIEVAR, viz obr. 3-5. Chemické složení materiálu jádra je uvedeno v kapitole 2.2, tabulce 1 a jeho tepelně - fyzikální vlastnosti v tabulce 3.

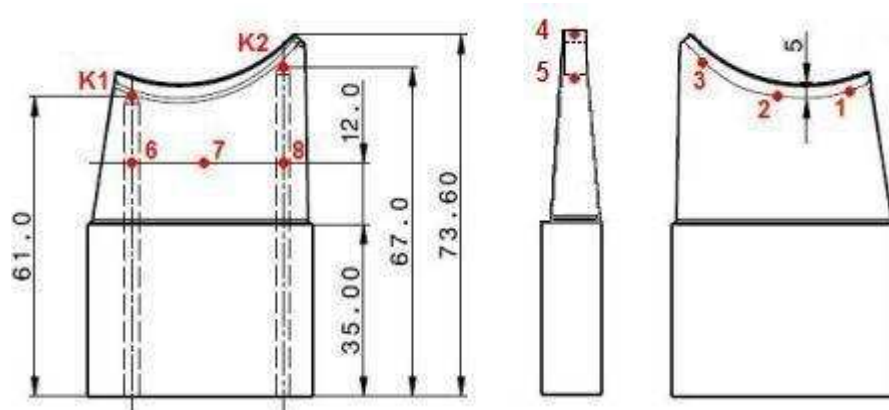
Tab. 3 Přehled tepelně - fyzikálních vlastností materiálu DIEVAR, [20].

Fyzikální vlastnosti	Teplota		
	20°C	400°C	600°C
Hustota [kg.m ⁻³]	7 800	7 700	7 600
Měrná tepelná kapacita [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	460	460	460
Koeficient tepelné roztažnosti za °C od 20°C	-	12,7 x 10 ⁻⁶	13,3 x 10 ⁻⁶
Teplená vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	-	31	32

V jádru jsou vyvrtány dva rovnoběžné otvory pro kapiláry přivádějící chladicí médium, resp. CO_2 . Mezi otvory pro kapiláry je závitový upínací otvor. Na obr. 3-6 je zobrazeno rozmístění termoelektrických článků na jádře. Termoelektrické články, které jsou označeny K1, K2 jsou umístěny v expanzních komůrkách jádra. Termočlánky 1 až 8 na povrchu jádra. Rozměry jádra jsou pak zřejmé z výkresu, viz příloha 1.



Obr. 3-5 Zkušební jádro



Obr. 3-6 Místa zabudovaných termoelektrických článků do jádra

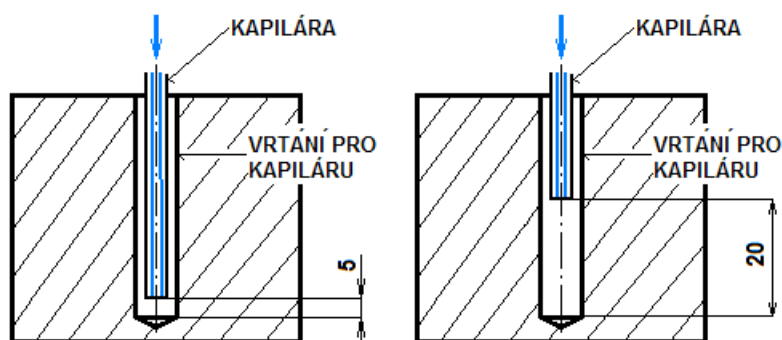
3.3 Popis experimentů

Nejprve bylo jádro předehřáto na počáteční teplotu 400°C . Po dosažení požadované teploty v peci, následuje prodleva pro ustálení teploty v celém objemu jádra. Prohřátí jádra bylo možno sledovat na displeji měřicího zařízení pomocí termočlánků připojených k jádru. Po ustálení teploty následovalo vstřikování různých

dávek kapalného CO₂.

To umožňovala řídicí jednotka měřicího zařízení. Otevřením ventilu zásobníku kapalného CO₂ se naplní chladicí část systému médiem. Pomocí řídicí jednotky byla nastavena doba, případně intervaly vstřikování média (viz tabulka 4) z kapiláry do expanzní komůrky. Bezkontaktním spínačem bylo spouštěno vstřikovací zařízení (otevře se solenoidový ventil). Kapalně CO₂ proudilo kapilární trubicí a v expanzní komůrce CO₂ expandovalo. To se projevilo snížením teploty na povrchu zkušebního jádra. Po určité době došlo k vyrovnání teplot na povrchu jádra na počáteční teplotu (cca 400 °C).

Vstřikování kapalného CO₂ bylo prováděno při dvou variantách poloh kapilár ve vrtání jádra. V prvním případě byla vzdálenost kapiláry od dna expanzní komůrky 5 mm a ve druhém případě 20 mm, viz obr. 3-7.



Obr. 3-7 Polohy kapilár ve vrtání jádra

S použitím každé této polohy kapilár bylo prováděno pět způsobů měření, z toho tři měření byla kontinuální, tj. po otevření solenoidového ventilu byla expanzní komůrka plněna chladicím médiem nepřetržitě. Doba plnění, resp. doba mezi otevřením a uzavřením ventilu byla pro jednotlivá měření 6, 12 a 20 sekund.

Zbývající dvě měření byla prováděna sekvenčním způsobem. V obou případech byla celková délka cyklů 12 sekund. V jenom případě byl takt plnění po 1 s, v druhém případě po 0,5 s. V tabulce 4 jsou uvedeny podmínky provedených experimentů.

Jak již bylo výše uvedeno, cílem těchto měření bylo zjištění změny teploty v různých místech jádra, při různých podmínkách vstříknutí CO₂ a současně i zjištění teplot v expanzních komůrkách.

Každý způsob měření byl proveden 7 krát a byla stanovena průměrná hodnota poklesu teplot na povrchu jádra. Tento pokles je mírou předpokládaného chladicího účinku CO₂.

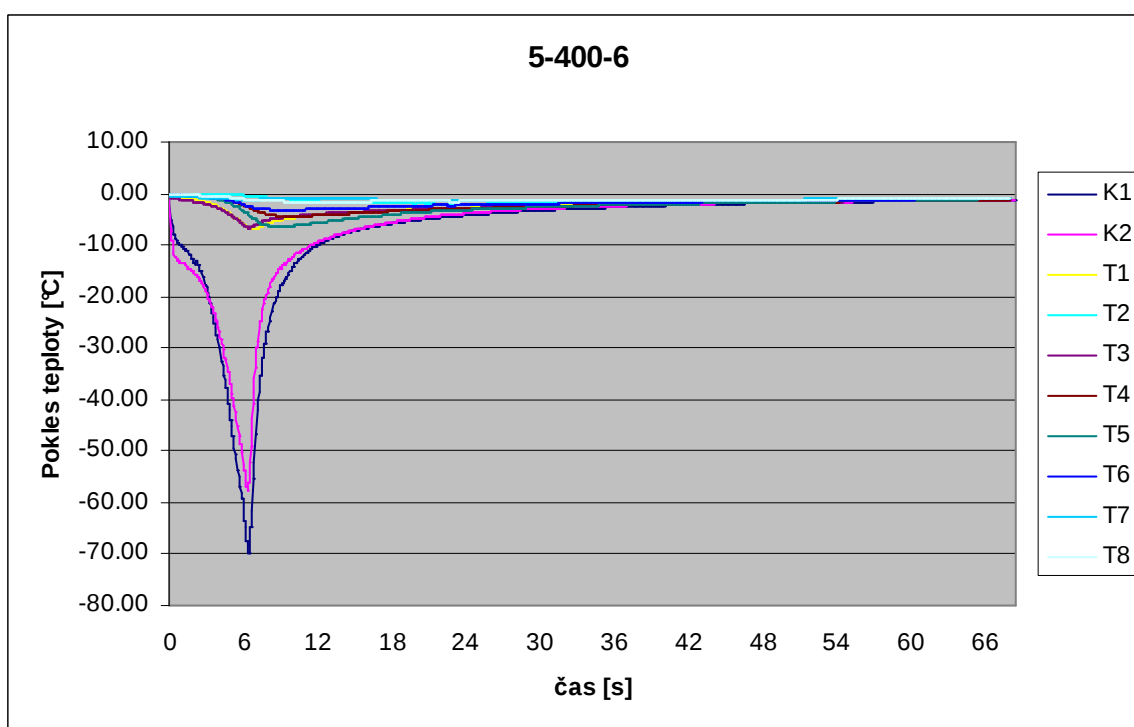
Tab. 4 Přehled podmínek experimentu

Materiál	DIEVAR				
Teplota [°C]	400				
Vzdálenost kapiláry od dna vrtání [mm]	5			20	
Doba chlazení [s]	6	12			20
Množství vstříknutého CO ₂ [g]	13,2	26,4	13,2	13,2	44
Interval vstřikování [s]	kontinuální vstřikování	kontinuální vstřikování	po 1,0	po 0,5	kontinuální vstřikování

3.4 Přehled naměřených výsledků

Z výše uvedených experimentů byly získány grafické závislosti poklesů teplot na čase, viz obr. 3-8 až 3-17. Současně pro jednodušší orientaci jsou uvedeny i příslušné tabulky 5 až 14, ve kterých jsou uvedeny maximální poklesy teplot a jejich časové dosažení. Každé měření je označeno číselným znakem, např. 5 - 400 - 6, značí: 5 - vzdálenost kapiláry od dna expanzní komůrky mm; 400 - teplota přehřevu jádra °C; 6 - doba vstřikování sekundy.

Doba vstřikování kapalného CO₂ 6 sekund, maximální pokles na povrchu jádra 7°C za 6 sekund na termočlánku 1. Minimální pokles 2°C za 31 sekund na termočlánku 7.

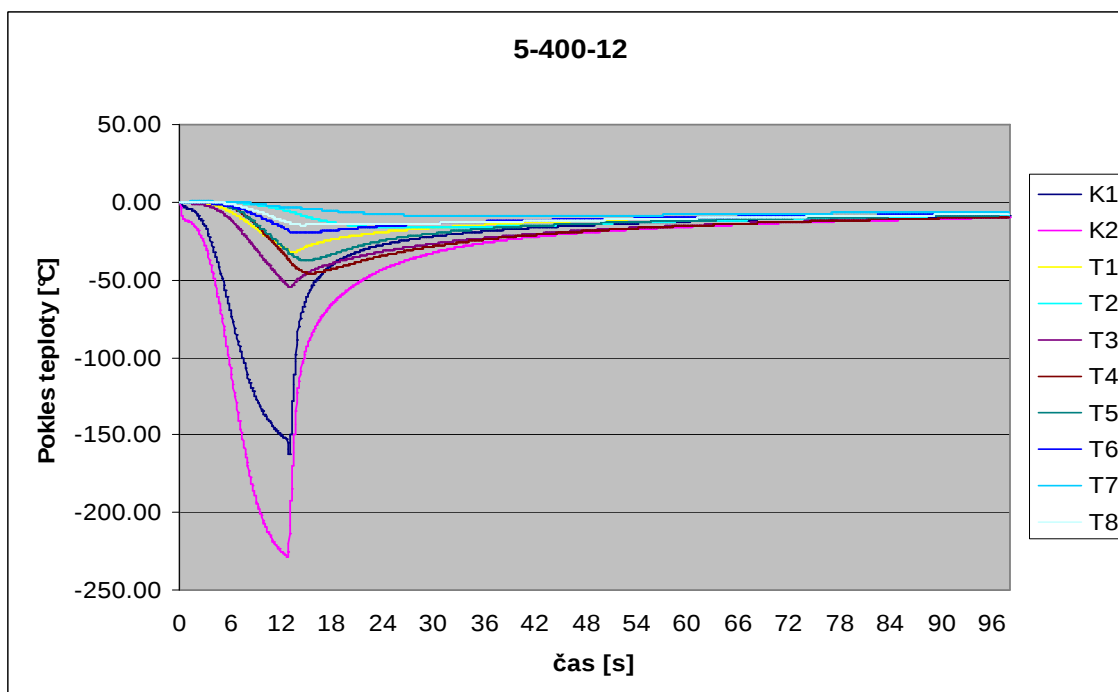


Obr. 3-8 Grafická závislost změny teplot na čase při vzdálenosti kapiláry 5mm od dna expanzní komůrky, kontinuální vstřik 6 sekund

Tab. 5 Maximální pokles teplot při ochlazovacím účinku CO₂ 5 - 400 – 6

5 - 400 - 6			
	Termočlánek	Maximální naměřené rozdíly teplot [°C]	Doba dosažení [s]
Expanzní komůrky	K1	70	6
	K2	58	6
Označení míst termočlánků na povrchu jádra	1	7	6
	2	2	17
	3	7	6
	4	4	10
	5	6	8
	6	3	9
	7	2	31
	8	2	12

Doba vstřikování kapalného CO₂ 12 sekund, maximální pokles na povrchu jádra 55°C za 13 sekund na termo článku 3. Minimální pokles 9°C za 34 sekund na termočlánku 7.

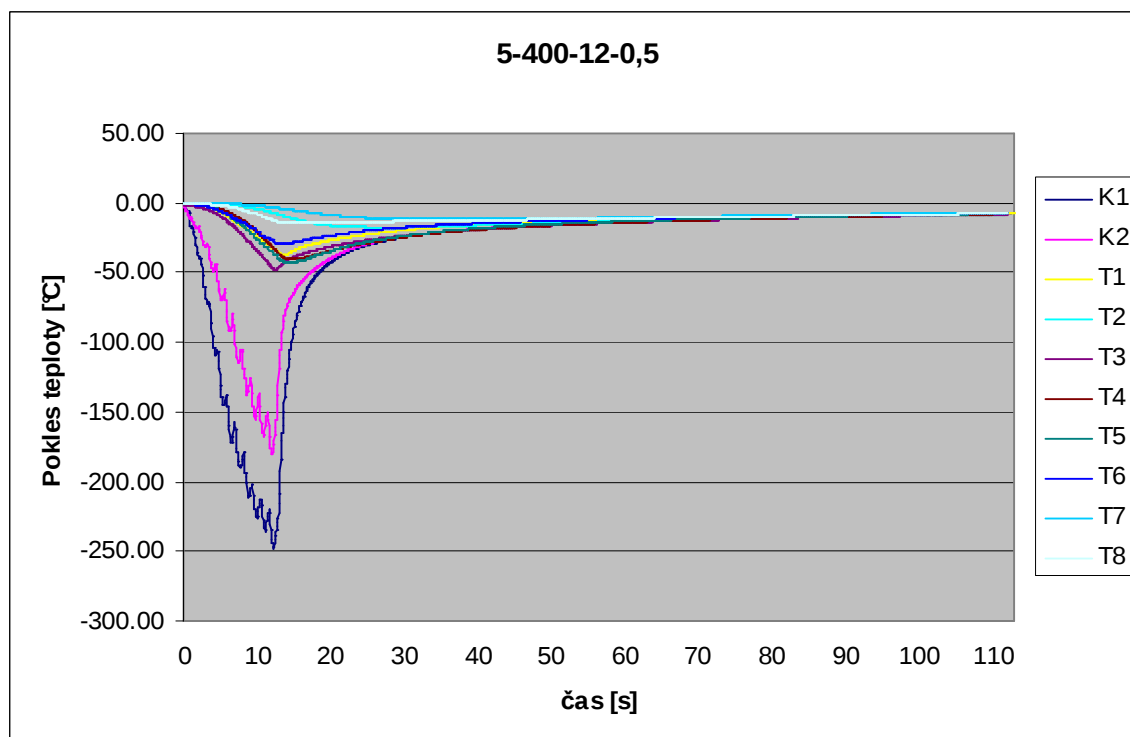


Obr. 3-9 Grafická závislost změny teplot na čase při vzdálenosti kapiláry 5mm od dna expanzní komůrky, kontinuální vstřik 12 sekund

Tab. 6 Maximální pokles teplot při ochlazovacím účinku CO₂ 5 - 400 – 12

5 - 400 - 12			
	Termočlánek	Maximální naměřené rozdíly teplot [°C]	Doba dosažení [s]
Expanzní komůrky	K1	162	12
	K2	229	12
Označení míst termočláneků na povrchu jádra	1	32	12
	2	17	27
	3	55	15
	4	46	15
	5	38	12
	6	20	12
	7	9	34
	8	15	14

Doba vstřikování kapalného CO₂ 12 sekund, sekvenčně po 0,5 sekundy, maximální pokles na povrchu jádra 48°C za 12 sekund na termočlánek 3. Minimální pokles 12°C za 34 sekund na termočlánek 7.

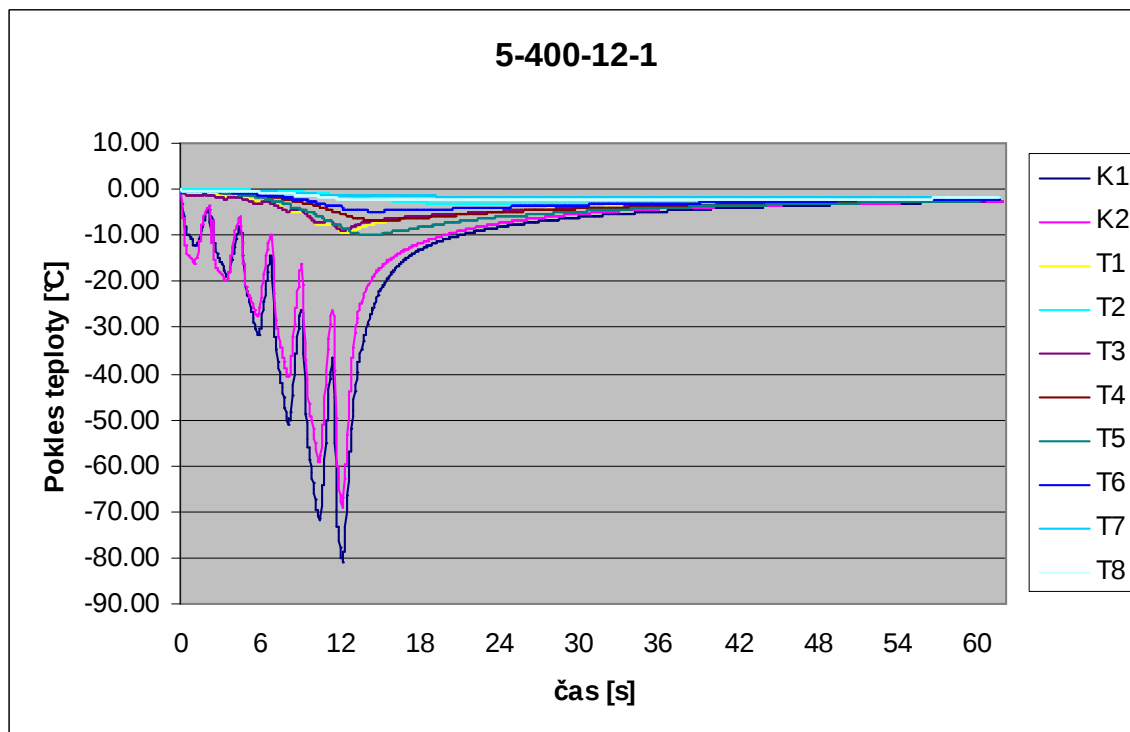


Obr. 3-10 Grafická závislost změny teplot na čase při vzdálenosti kapiláry 5mm od dna expanzní komůrky, sekvenční vstřik po 0,5 sekundy a 12 opakováních (12s)

Tab. 7 Maximální pokles teplot při ochlazovacím účinku CO₂ 5-400-12-0,5

5 - 400 - 12 - 0,5			
	Termočlánek	Maximální naměřené rozdíly teplot [°C]	Doba dosažení [s]
Expanzní komůrky	K1	248	12
	K2	181	12
Označení míst termočlánků na povrchu jádra	1	37	13
	2	18	28
	3	48	16
	4	41	15
	5	43	13
	6	29	14
	7	12	34
	8	14	14

Doba vstřikování kapalného CO₂ 12 sekund, sekvenčně po 1 sekundě, maximální pokles na povrchu jádra 10°C za 14 sekund na termočlánek 5. Minimální pokles 2°C za 29 sekund na termočlánek 7.

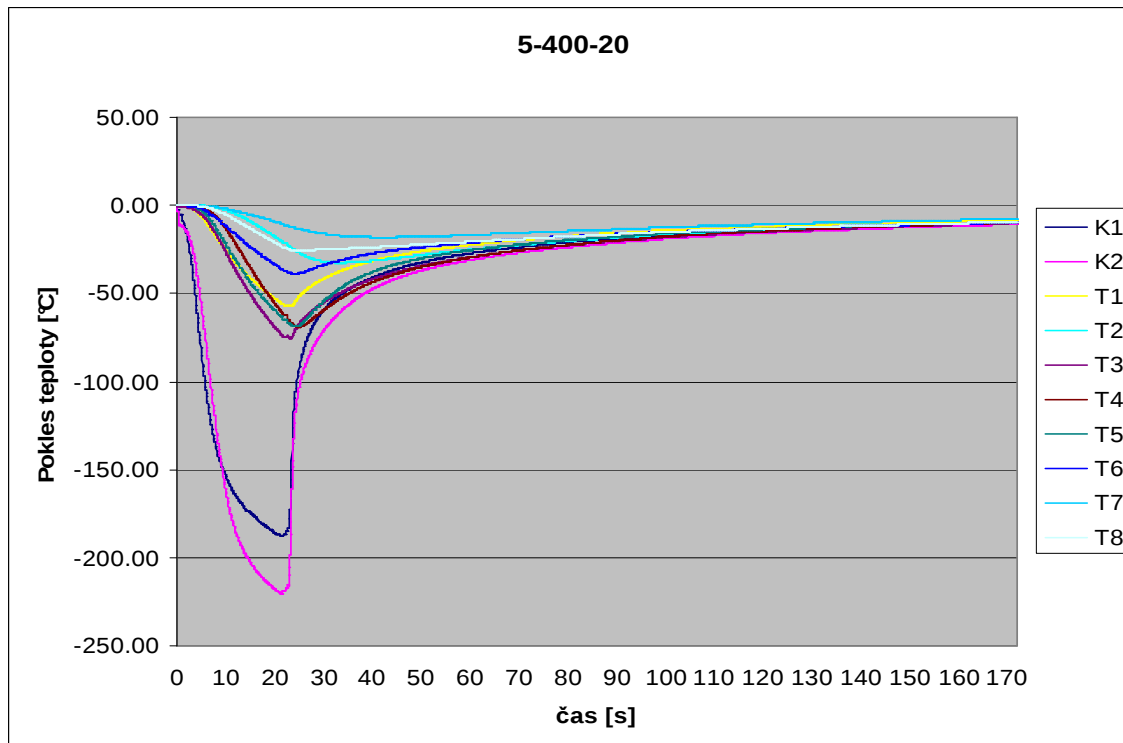


Obr. 3-11 Grafická závislost změny teplot na čase při vzdálenosti kapiláry 5mm od dna expanzní komůrky, sekvenční vstřik po 1 sekundě a 6 opakování (12s)

Tab. 8 Maximální pokles teplot při ochlazovacím účinku CO₂ 5-400-12-1

5 - 400 - 12 - 1			
	Termočlánek	Maximální naměřené rozdíly teplot [°C]	Doba dosažení [s]
Expanzní komůrky	K1	81	12
	K2	69	12
Označení míst termočlánků na povrchu jádra	1	9	13
	2	3	23
	3	9	13
	4	7	15
	5	10	14
	6	5	14
	7	2	29
	8	2	18

Doba vstřikování kapalného CO₂ 20 sekund, maximální pokles na povrchu jádra 76°C za 25 sekund na termo článku 3. Minimální pokles 18°C za 40 sekund na termo článku 7.

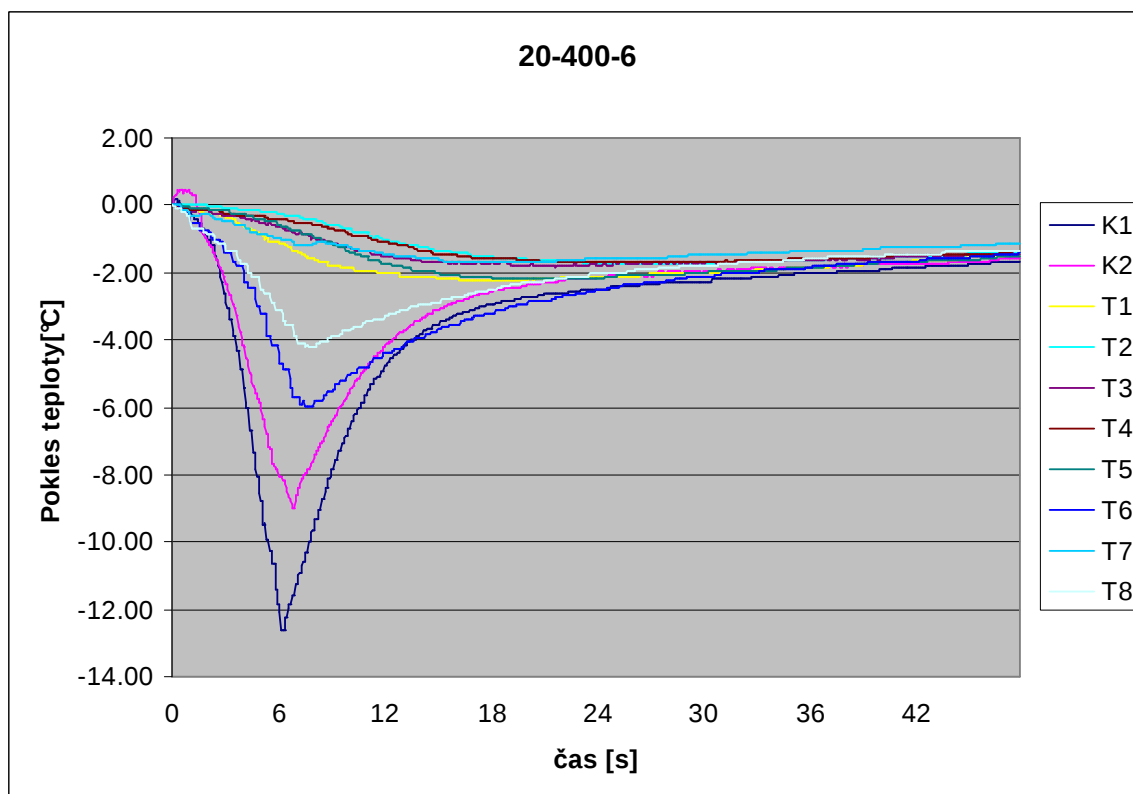


Obr. 3-12 Grafická závislost změny teplot na čase při vzdálenosti kapiláry 5mm od dna expanzní komůrky, kontinuální vstřik 20 sekund

Tab. 9 Maximální pokles teplot při ochlazovacím účinku CO₂ 5 - 400 - 20

5 - 400 - 20			
	Termočlánek	Maximální naměřené rozdíly teplot [°C]	Doba dosažení [s]
Expanzní komůrky	K1	188	20
	K2	221	20
Označení míst termočláneků na povrchu jádra	1	57	22
	2	32	32
	3	76	25
	4	69	23
	5	69	22
	6	39	22
	7	18	40
	8	26	24

Doba vstřikování kapalného CO₂ 6 sekund, maximální pokles na povrchu jádra 6°C za 7 sekund na termo článek 6. Minimální pokles 2°C za 22 sekund na termočlánek 2.

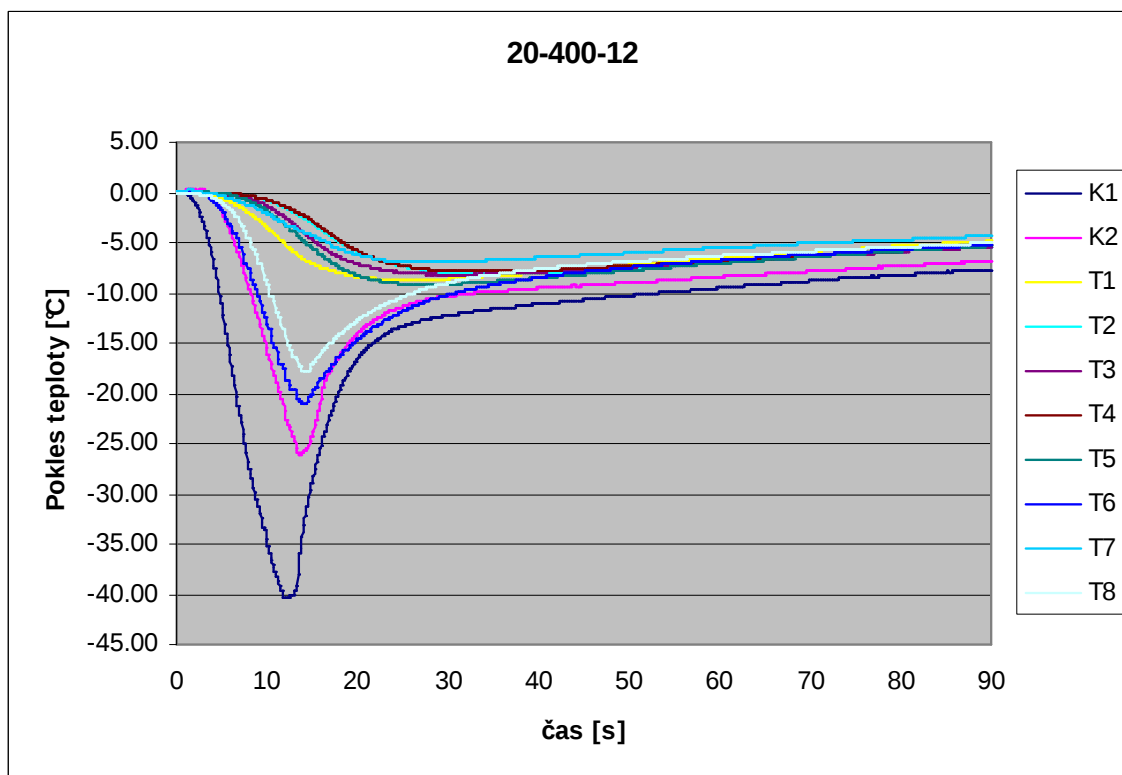


Obr. 3-13 Grafická závislost změny teplot na čase při vzdálenosti kapiláry 20 mm od dna expanzní komůrky, kontinuální vstřik 6 sekund

Tab. 10 Maximální pokles teplot při ochlazovacím účinku CO₂ 20-400-6

20 – 400 - 6			
	Termočlánek	Maximální naměřené rozdíly teplot [°C]	Doba dosažení [s]
Expanzní komůrky	K1	14	6
	K2	9	7
Označení míst termočlánků na povrchu jádra	1	2	15
	2	2	22
	3	2	21
	4	2	20
	5	2	19
	6	6	7
	7	2	15
	8	4	7

Doba vstřikování kapalného CO₂ 12 sekund, maximální pokles na povrchu jádra 21°C za 13 sekund na termo článku 6. Minimální pokles 7°C za 25 sekund na termo článku 7.

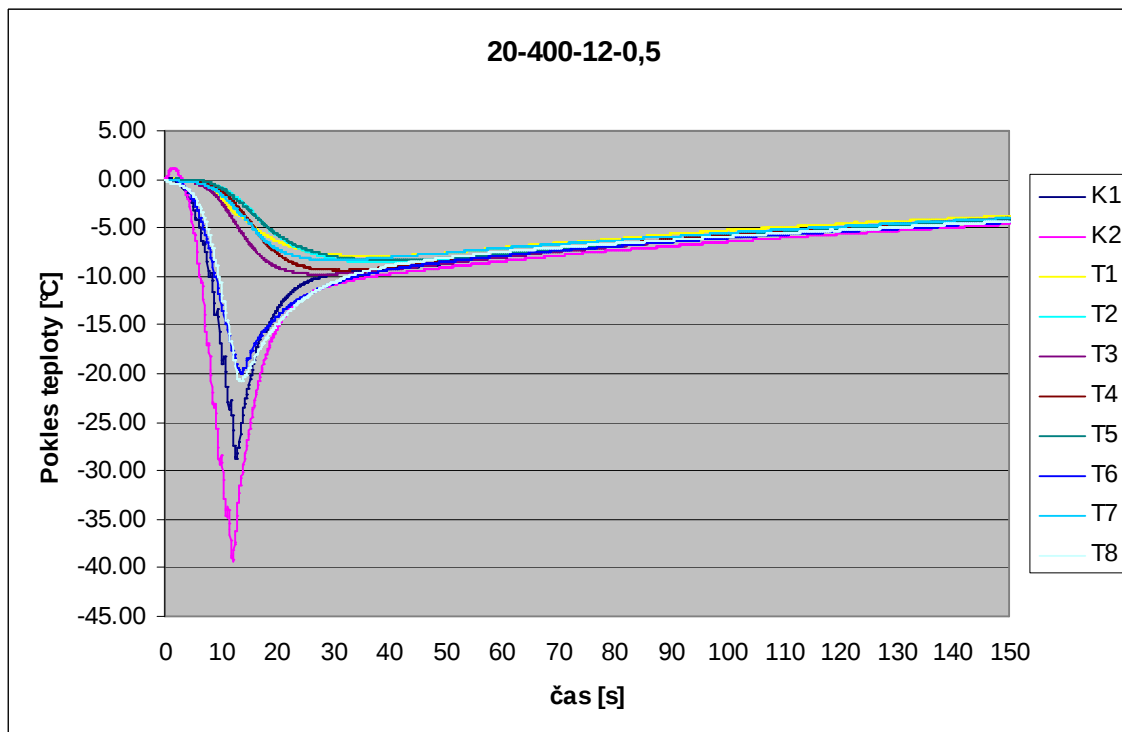


Obr. 3-14 Grafická závislost změny teplot na čase při vzdálenosti kapiláry 20 mm od dna expanzní komůrky, kontinuální vstřik 12 sekund

Tab. 11 Maximální pokles teplot při ochlazovacím účinku CO₂ 20-400-12

20 - 400 - 12			
	Termočlánek	Maximální naměřené rozdíly teplot [°C]	Doba dosažení [s]
Expanzní komůrky	K1	44	12
	K2	26	13
Označení míst termočlánků na povrchu jádra	1	9	24
	2	8	33
	3	8	30
	4	8	32
	5	9	26
	6	21	13
	7	7	25
	8	18	14

Doba vstřikování kapalného CO₂ 12 sekund, sekvenčně po 0,5 sekundy, maximální pokles na povrchu jádra 21°C za 13 sekund na termočlánek 8. Minimální pokles 8°C za 39 sekund na termočlánek 7.

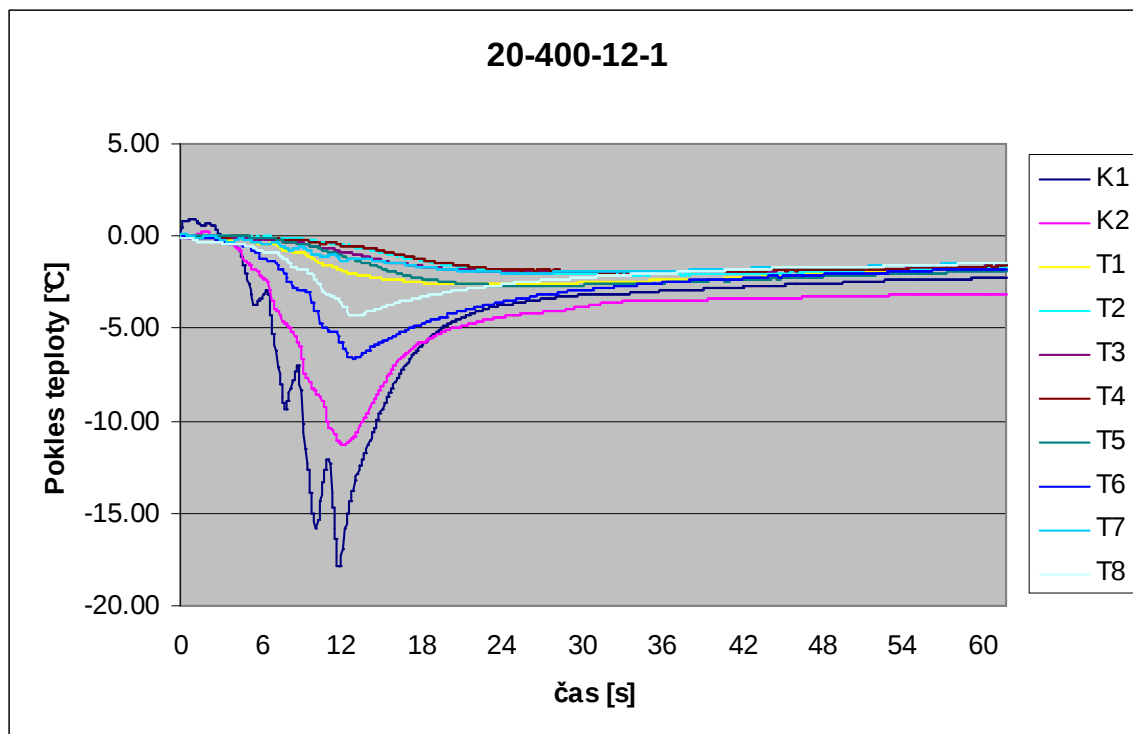


Obr. 3-15 Grafická závislost změny teplot na čase při vzdálenosti kapiláry 20 mm od dna expanzní komůrky, sekvenčním vstřikování po 0,5 sekundy a 12 opakováních (12 s)

Tab. 12 Maximální pokles teplot při ochlazovacím účinku CO₂ 20-400-12-0,5

20 - 400 - 12 - 0,5			
	Termočlánek	Maximální naměřené rozdíly teplot [°C]	Doba dosažení [s]
Expanzní komůrky	K1	29	12
	K2	39	12
Označení míst termočlánků na povrchu jádra	1	8	34
	2	9	35
	3	10	26
	4	9	30
	5	8	38
	6	20	12
	7	8	39
	8	21	13

Doba vstřikování kapalného CO₂ 12 sekund, sekvenčně po 1 sekundě, maximální pokles na povrchu jádra 7°C za 12 sekund na termočlánek 6. Minimální pokles 2 °C za 34 sekund na termo článek 2.

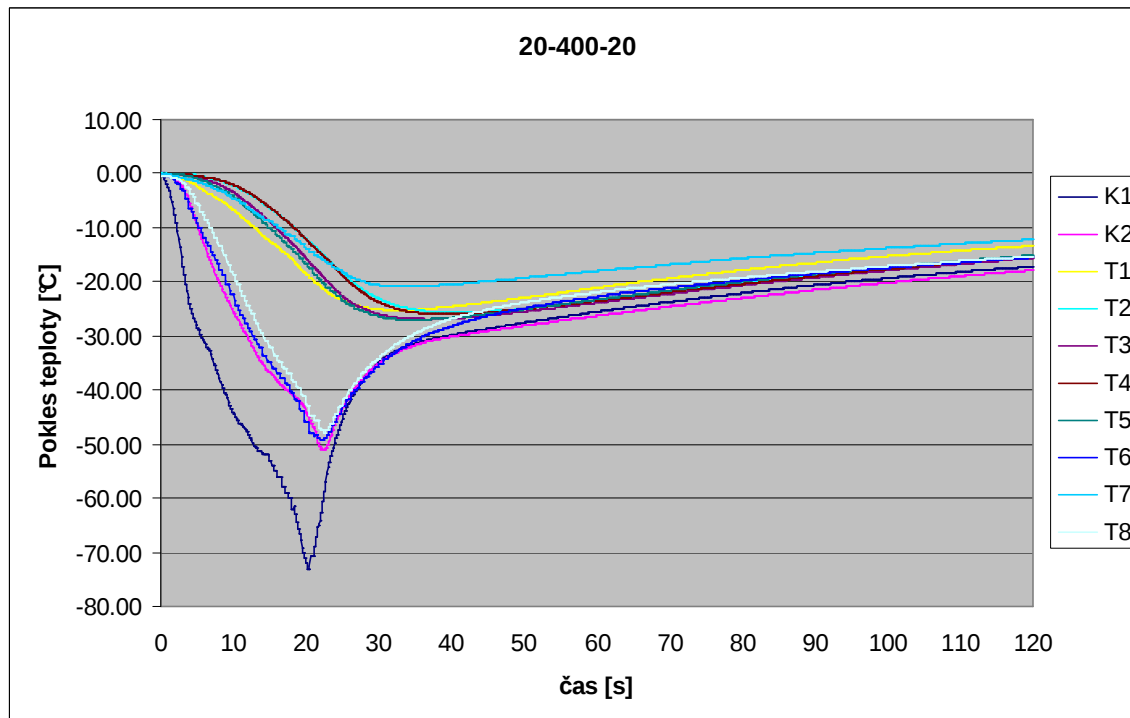


Obr. 3-16 Grafická závislost změny teplot na čase při vzdálenosti kapiláry 20 mm od dna expanzní komůrky, sekvenční vstřik po 1 sekundě a 6 opakování (12s)

Tab. 13 Maximální pokles teplot při ochlazovacím účinku CO₂ 20-400-12-1

20 - 400 - 12 - 1			
	Termočlánek	Maximální naměřené rozdíly teplot [°C]	Doba dosažení [s]
Expanzní komůrky	K1	18	12
	K2	12	12
Označení míst termočlánků na povrchu jádra	1	3	22
	2	2	34
	3	2	24
	4	2	31
	5	3	25
	6	7	12
	7	2	24
	8	4	12

Doba vstřikování kapalného CO₂ 20 sekund, maximální pokles na povrchu jádra 49°C za 22 sekund na termo článek 6. Minimální pokles 21°C za 32 sekund na termočlánek 7.



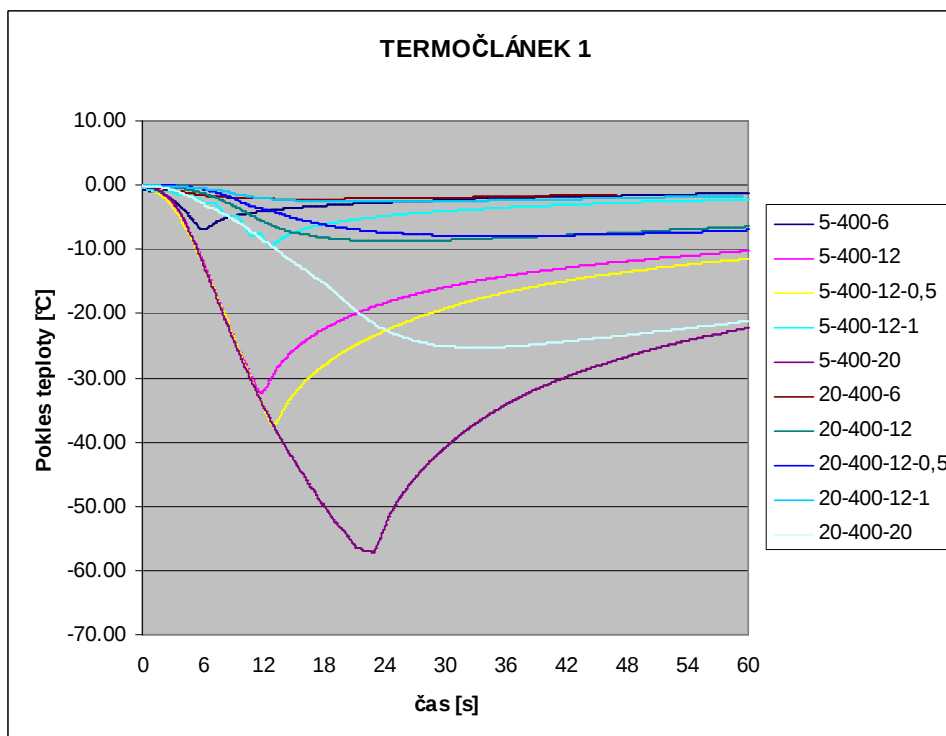
Obr. 3-17 Grafická závislost změny teplot na čase při vzdálenosti kapiláry 20 mm od dna expanzní komůrky, kontinuální vstřik 20 sekund

Tab. 14 Maximální pokles teplot při ochlazovacím účinku CO₂ 20-400-20

20 - 400 - 20			
	Termočlánek	Maximální naměřené rozdíly teplot [°C]	Doba dosažení [s]
Expanzní komůrky	K1	73	20
	K2	51	21
Označení míst termočlánků na povrchu jádra	1	25	32
	2	26	41
	3	27	36
	4	26	37
	5	27	33
	6	49	22
	7	21	32
	8	48	22

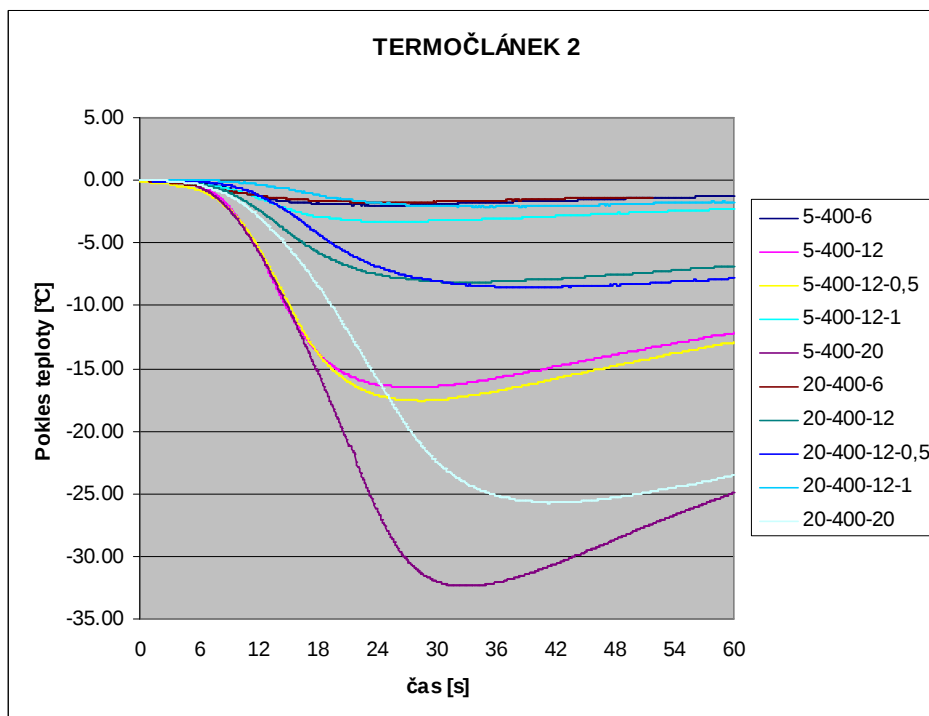
3.5 Vyhodnocení naměřených výsledků

Z naměřených výsledků byly sestrojeny grafické závislosti poklesů teplot na čase vztažené ke zkoumaným bodům na povrchu jádra (termoelektrické články 1 až 8), viz obr. 3-18 až 3-25.



Obr. 3-18 Grafické závislosti poklesu teplot na čase, termočlánek 1

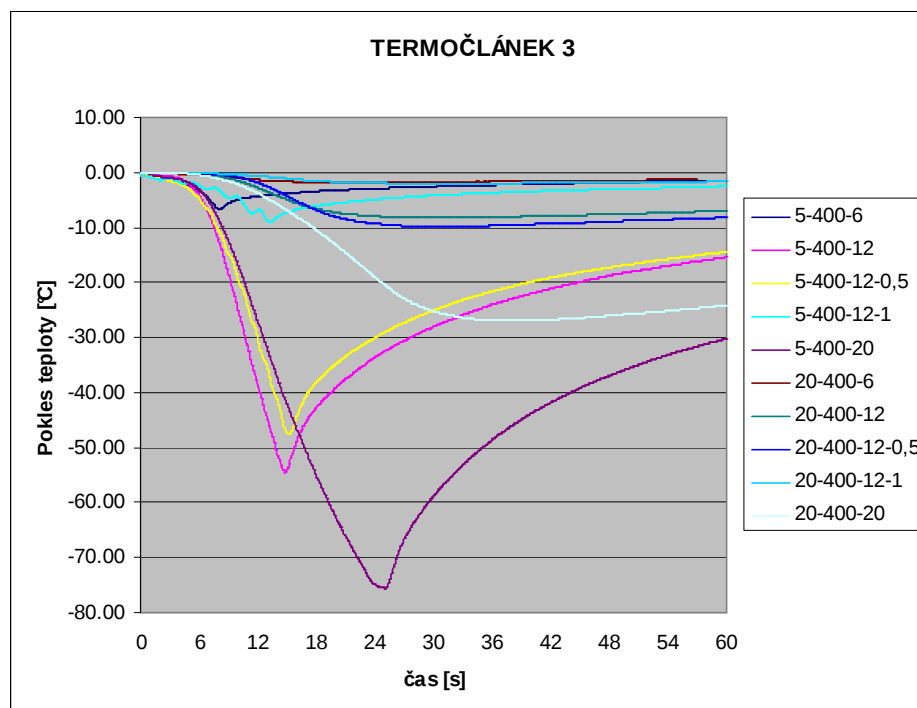
Z výše uvedené grafické závislosti je patrné, že největšího chladicího účinku na termočlánek 1 je dosaženo způsobem chlazení 5-400-20. Pokles teploty tohoto způsobu je 57°C za 22 sekund. Nižších hodnot ochlazení je dosaženo sekvenčním způsobem 5-400-12-0,5 o poklesu teploty 37°C za 13 sekund, kontinuálním způsobem 5-400-12 o poklesu teploty 32°C za 12 sekund a způsobem 20-400-20 o poklesu teploty 25°C za 32 sekund. Ochlazovací účinek ostatních způsobů měření nepřesahuje hodnotu 10°C.



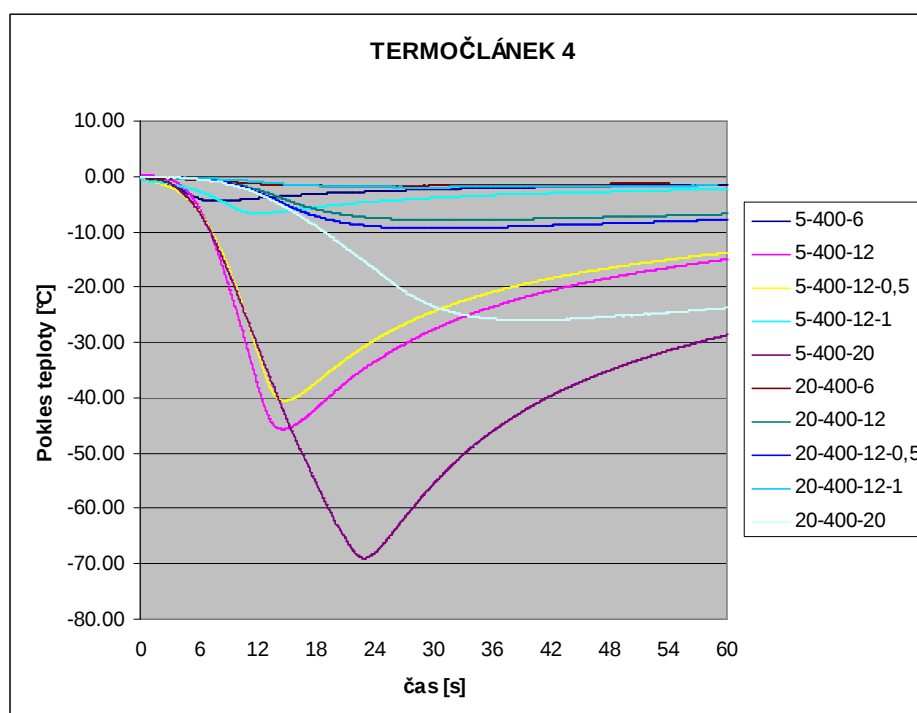
Obr. 3-19 Grafická závislost poklesu teploty na čase, termočlánek 2

Nejvyššího ochlazovacího účinku na termočlánek 2 bylo dosaženo způsobem chlazení 5-400-20. Pokles teploty tohoto způsobu je 32°C za 32 sekund. Nižších hodnot ochlazení je dosaženo způsobem chlazení 20-400-20 o poklesu teploty 26°C za 41 sekund, 5-400-12-0,5 o poklesu teploty 18°C za 28 sekund a 5-400-12 o poklesu teploty 17°C za 27 sekund. Ochlazovací účinek ostatních způsobů měření nepřesahuje hodnotu 10°C.

Nejvyššího ochlazovacího účinku na termočlánek 3 bylo dosaženo způsobem chlazení 5-400-20. Pokles teploty tohoto způsobu je 76°C za 25 sekund. Nižších hodnot ochlazení je dosaženo způsobem chlazení 5-400-12 o poklesu teploty 55°C za 15 sekund, 5-400-12-0,5 o poklesu teploty 48°C za 16 sekund a 20-400-20 o poklesu teploty 27°C za 36 sekund. Ochlazovací účinek ostatních způsobů měření nepřesahuje hodnotu 10°C.

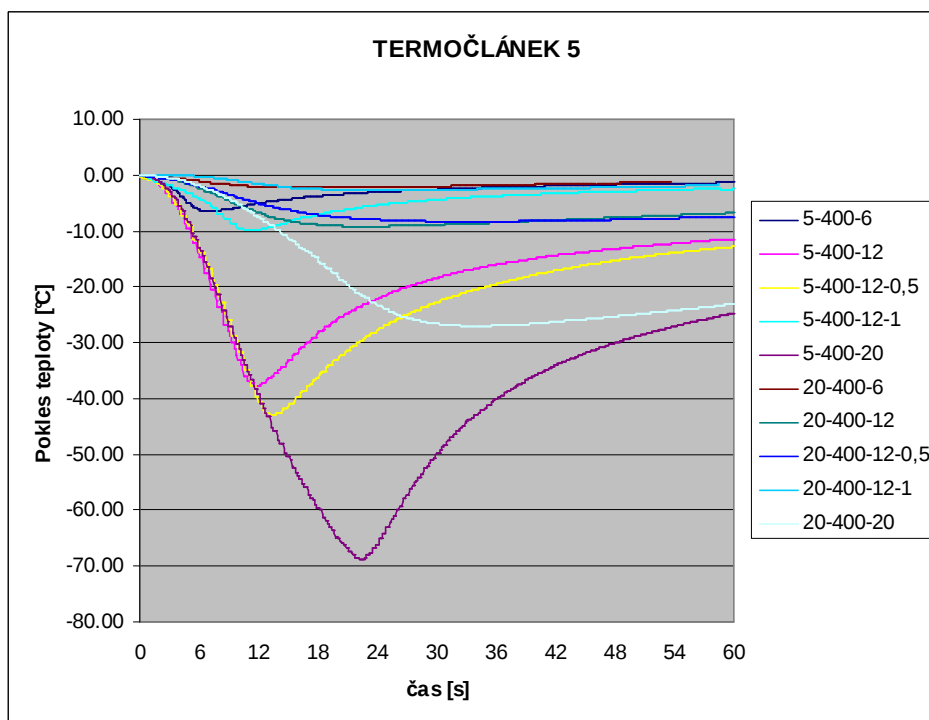


Obr. 3-20 Grafická závislost poklesu teplot na čase, termočlánek 3



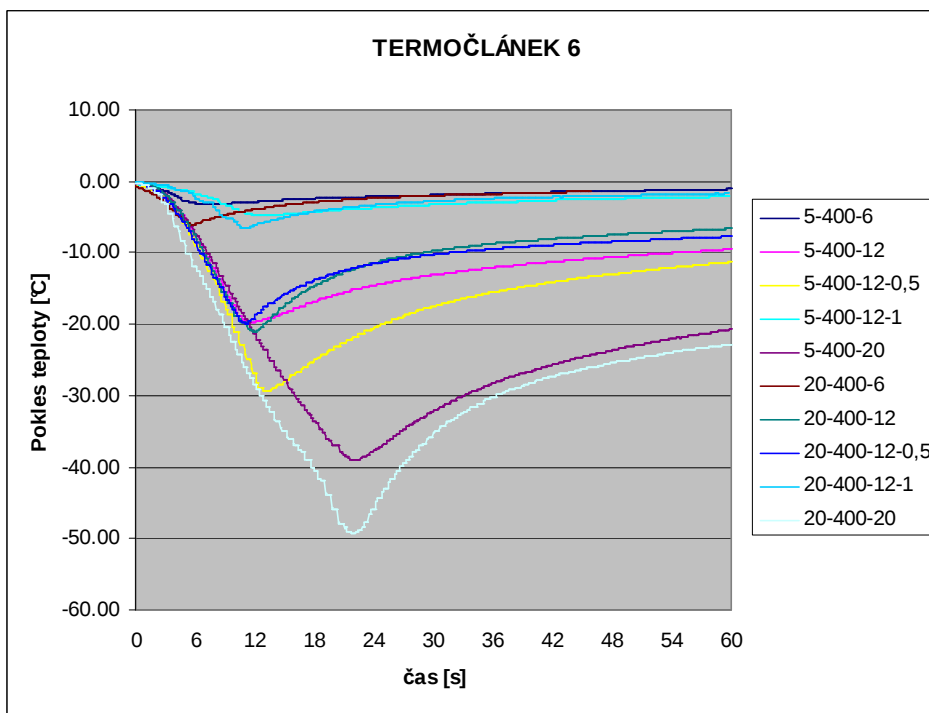
Obr. 3-21 Grafická závislost poklesu teplot na čase, termočlánek 4

Nejvyššího ochlazovacího účinku na termočlánek 4 bylo dosaženo způsobem chlazení 5-400-20. Pokles teploty tohoto způsobu je 69°C za 23 sekund. Nižších hodnot ochlazení je dosaženo způsoby chlazení 5-400-12 o poklesu teploty 46°C za 15 sekund, 5-400-12-0,5 o poklesu teploty 41°C za 15 sekund a 20-400-20 o poklesu teploty 26°C za 37 sekund. Ochlazovací účinek ostatních způsobů měření nepřesahuje hodnotu 10°C.



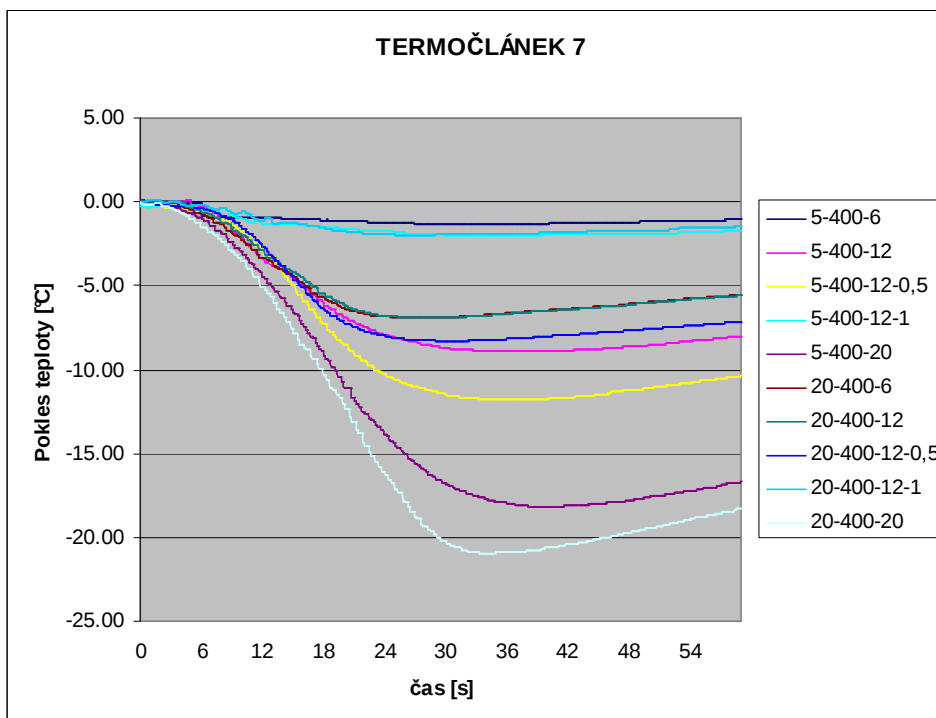
Obr. 3-22 Grafická závislost poklesu teplot na čase, termočlánek 5

Nejvyššího ochlazovacího účinku na termočlánek 5 bylo dosaženo způsobem chlazení 5-400-20. Pokles teploty tohoto způsobu je 69°C za 22 sekund. Nižších hodnot ochlazení je dosaženo způsoby chlazení 5-400-12-0,5 o poklesu teploty 43°C za 13 sekund, 5-400-12 o poklesu teploty 38°C za 12 sekund a 20-400-20 o poklesu teploty 27°C za 33 sekund. Ochlazovací účinek ostatních způsobů měření nepřesahuje hodnotu 10°C.



Obr. 3-23 Grafická závislost poklesu teplot na čase, termočlánek 6

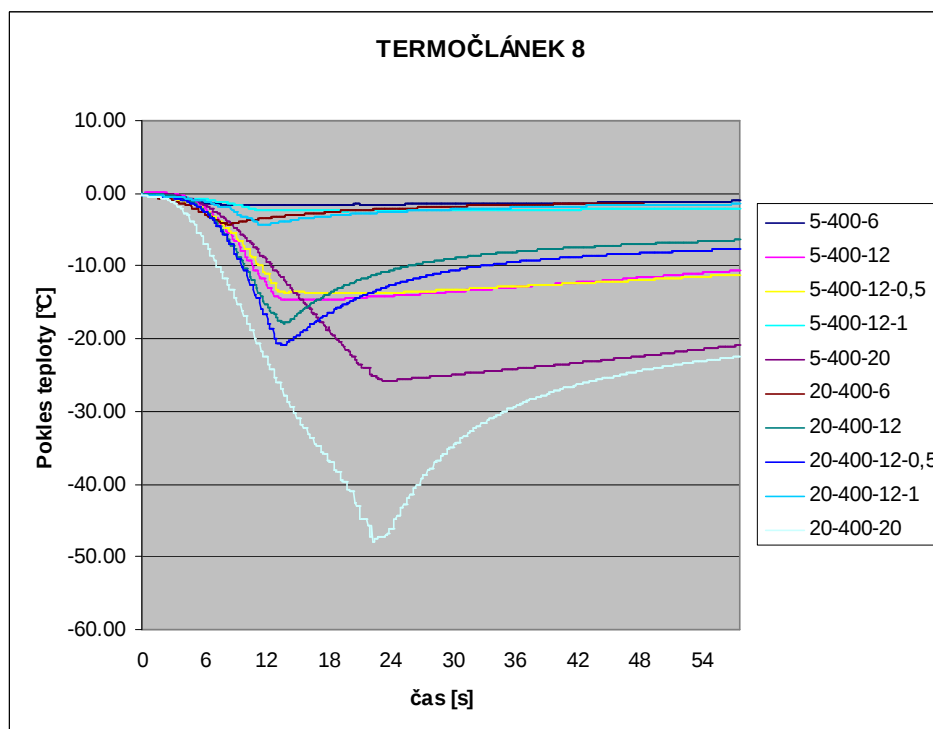
Nejvyššího ochlazovacího účinku na termočlánek 6 bylo dosaženo způsobem chlazení 20-400-20. Pokles teploty tohoto způsobu je 49°C za 22 sekund. Nižších hodnot ochlazení je dosaženo způsobem chlazení 5-400-20 o poklesu teploty 39°C za 22 sekund, 5-400-12-0,5 o poklesu teploty 29°C za 14 sekund, 20-400-12 o poklesu teploty 21°C za 13 sekund, 20-400-12-0,5 o poklesu teploty 20°C za 12 sekund a 5-400-12 o poklesu teploty 20°C za 12 sekund. Ochlazovací účinek ostatních způsobů měření nepřesahuje hodnotu 10°C.



Obr. 3-24 Grafická závislost poklesu teploty na čase, termočlánek 7

Nejvyššího ochlazovacího účinku na termočlánek 7 bylo dosaženo způsobem chlazení 20-400-20. Pokles teploty tohoto způsobu je 21°C za 33 sekund. Nižších hodnot ochlazení je dosaženo způsobem chlazení 5-400-20 o poklesu teploty 18°C za 40 sekund a 5-400-12-0,5 o poklesu teploty 12°C za 34 sekund. Ochlazovací účinek ostatních způsobů měření nepřesahuje hodnotu 10°C.

Nejvyššího ochlazovacího účinku na termočlánek 8 bylo dosaženo způsobem chlazení 20-400-20. Pokles teploty tohoto způsobu je 48°C za 22 sekund. Nižších hodnot ochlazení je dosaženo způsobem chlazení 5-400-20 o poklesu teploty 26°C za 24 sekund, 20-400-12-0,5 o poklesu teploty 21°C za 13 sekund, 20-400-12 o poklesu teploty 18°C za 14 sekund, 5-400-12 o poklesu teploty 15°C za 14 sekund a 5-400-12-0,5 o poklesu teploty 14°C za 14 sekund. Ochlazovací účinek ostatních způsobů měření nepřesahuje hodnotu 10°C.



Obr. 3-25 Grafická závislost poklesu teplot na čase, termočlánek 8

4 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Výsledky uvedené v této diplomové práci přináší dílčí informace o možnostech aplikace chlazení kapalným médiem CO₂ ve slévárenských formách. Současně je nutno konstatovat, že tato metoda pro chlazení slévárenských jader není obvyklá a její použití v podmínkách našeho slévárství je v prvopočátcích. Nižší uplatnění této metody souvisí se složitostí zavedení kapilár pro přívod CO₂ do jader, náročností celého procesu chlazení a vynaloženými finančními prostředky. V současné době je snaha v praxi aplikovat tento způsob chlazení tenkých částí tlakových licích forem.

1. Teploty v expanzních komůrkách úzce souvisí s dobou a způsobem vstřikování chladicího média, resp. CO₂. Sledování poklesů teplot v komůrkách, při experimentu 5 mm od dna komůrky, lze konstatovat, že rozdíly teplot se pohybují od 58 °C do 248 °C. V komůrce K1 jsou tyto rozdíly teplot od 70 °C do 248 °C, nejnižší rozdíl teplot byl zjištěn u experimentu 5-400-6, naopak nejvyšší rozdíl teplot činí 248 °C byl zjištěn u experimentu 5-400-12-0,5. V komůrce K2 byly zjištěny rozdíly teplot od 58 °C do 229 °C, nejnižší rozdíl teplot byl zjištěn u experimentu 5-400-6, nejvyšší rozdíl teplot byl u experimentu 5-400-12.

Sledování poklesů teplot v komůrkách, při experimentu 20 mm od dna komůrky, lze konstatovat, že rozdíly teplot vykazují nižší hodnoty než tomu bylo v předchozím případě. Zjištěné rozdíly teplot se pohybují od 9 do 73 °C. V expanzní komůrce K1 je minimální rozdíl teplot 14 °C u experimentu 20-400-6 a nejvyšší hodnotu rozdílu teplot 73 °C vykazuje experiment 20-400-20. V expanzní komůrce K2 je minimální rozdíl teplot 9 °C, experiment 20-400-6, naopak nejvyšší rozdíl teplot 51 °C byl zjištěn u experimentu 20-400-20. Zde byl jednoznačně potvrzen předpoklad, že čím je nižší doba vstřikování CO₂ do expanzní komůrky, tím je menší rozdíl teplot.

2. Také rozdíly teplot sledované v jednotlivých místech jádra úzce souvisí se vzdáleností od dna komůrky, dobou a způsobem vstřikování CO₂.

Rozdíly teplot v místě **termočlátku 1** při experimentech s 5 mm od dna expanzní komůrky se pohybují od 7 °C do 57 °C. Nejnižší hodnota 7 °C, která byla dosažena za 6 sekund, byla zjištěna u experimentu 5-400-6. Naopak nejvyššího hodnota rozdílu teplot činila 57 °C, která byla dosažena za 22 sekund, experiment 5-400-20. U experimentů s 20 mm od dna expanzní komůrky rozdíly teplot v místě termočlátku 1 se pohybují od 2 °C do 25 °C. Nejnižší hodnota 2 °C, která byla dosažena za 15 sekund, byla zjištěna u experimentu 20-400-6. Naopak nejvyššího

hodnota rozdílu teplot činila 25 °C, která byla dosažena za 32 sekund, experiment 20-400-20.

Rozdíly teplot v místě **termočláčku 2** při experimentech s 5 mm od dna expanzní komůrky, již jsou nižší, se pohybují od 2 °C do 32 °C. V této souvislosti je nutno konstatovat, že rozdíl teplot 2 °C již úzce souvisí s rozsahem přesnosti měření termoelektrickými články. Hodnota 2 °C byla naměřena u experimentu 5-400-6 a byla dosažena za 17 sekund. Nejvyšší teplota 32 °C byla dosažena u experimentu 5-400-20 za 32 sekund. U experimentů s 20 mm od dna expanzní komůrky rozdíly teplot v místě termočláčku 2 se pohybují od 2 °C do 26 °C. Nejnižší hodnota 2 °C, která byla dosažena za 22 sekund, byla zjištěna u experimentu 20-400-6. Naopak nejvyššího hodnota rozdílu teplot 26 °C, byla dosažena za 41 sekund, experiment 20-400-20.

Rozdíly teplot v místě **termočláčku 3** při experimentech s 5 mm od dna expanzní komůrky se pohybují od 7 °C do 76 °C. Hodnota 7 °C byla naměřena u experimentu 5-400-6 a byla dosažena za 6 sekund. Nejvyšší hodnota rozdílu teplot 76 °C byla dosažena u experimentu 5-400-20 za 25 sekund. U experimentů s 20 mm od dna expanzní komůrky rozdíly teplot v místě termočláčku 3 se pohybují od 2 °C do 27 °C. Nejnižší hodnota 2 °C, která byla dosažena za 21 sekund, byla zjištěna u experimentu 20-400-6. Naopak nejvyššího hodnota rozdílu teplot 27 °C, byla dosažena za 36 sekund, experiment 20-400-20.

Rozdíly teplot v místě **termočláčku 4** při experimentech s 5 mm od dna expanzní komůrky se pohybují od 4 °C do 69 °C. Hodnota 4 °C byla naměřena u experimentu 5-400-6 a byla dosažena za 10 sekund. Nejvyšší hodnota rozdílu teplot 69 °C byla naměřena u experimentu 5-400-20, byla dosažena za 25 sekund. U experimentů s 20 mm od dna expanzní komůrky rozdíly teplot v místě termočláčku 4 se pohybují od 2 °C do 26 °C. Nejnižší hodnota 2 °C, která byla dosažena za 20 sekund, byla zjištěna u experimentu 20-400-6. Nejvyšší hodnota rozdílu teplot 26 °C byla naměřena u experimentu 5-400-20, byla dosažena za 37 sekund.

Rozdíly teplot v místě **termočláčku 5** při experimentech s 5 mm od dna expanzní komůrky se pohybují od 6 °C do 69 °C. Hodnota 6 °C byla naměřena u experimentu 5-400-6 a byla dosažena za 8 sekund. Nejvyšší hodnota rozdílu teplot 69 °C byla zjištěna u experimentu 5-400-20, byla dosažena za 22 sekund. U experimentů s 20 mm od dna expanzní komůrky rozdíly teplot v místě termočláčku 5 se pohybují od 2 °C do 27 °C. Nejnižší hodnota 2 °C, která byla dosažena za 19 sekund, byla zjištěna u experimentu 20-400-6. Nejvyšší hodnota rozdílu teplot 27 °C

byla naměřena u experimentu 5-400-20, byla dosažena za 33 sekund.

Rozdíly teplot v místě **termočlátku 6** při experimentech s 5 mm od dna expanzní komůrky se pohybují od 3 °C do 39 °C. Hodnota 3 °C byla naměřena u experimentu 5-400-6 a byla dosažena za 9 sekund. Nejvyšší hodnota rozdílu teplot 39 °C byla zjištěna u experimentu 5-400-20, byla dosažena za 22 sekund. U experimentů s 20 mm od dna expanzní komůrky rozdíly teplot v místě termočlátku 6 se pohybují od 6 °C do 49 °C. Nejnižší hodnota 6 °C, která byla dosažena za 7 sekund, byla zjištěna u experimentu 20-400-6. Nejvyšší hodnota rozdílu teplot 49 °C byla naměřena u experimentu 5-400-20, byla dosažena za 22 sekund.

Rozdíly teplot v místě **termočlátku 7** při experimentech s 5 mm od dna expanzní komůrky se pohybují od 2 °C do 18 °C. Hodnota 2 °C byla naměřena u experimentu 5-400-6 a byla dosažena za 31 sekund. Nejvyšší hodnota rozdílu teplot 18 °C byla zjištěna u experimentu 5-400-20, byla dosažena za 40 sekund. U experimentů s 20 mm od dna expanzní komůrky rozdíly teplot v místě termočlátku 7 se pohybují od 2 °C do 21 °C. Nejnižší hodnota 2 °C, která byla dosažena za 15 sekund, byla zjištěna u experimentu 20-400-6. Nejvyšší hodnota rozdílu teplot 21 °C byla naměřena u experimentu 5-400-20, byla dosažena za 32 sekund.

Rozdíly teplot v místě **termočlátku 8** při experimentech s 5 mm od dna expanzní komůrky se pohybují od 2 °C do 26 °C. Hodnota 2 °C byla naměřena u experimentu 5-400-6 a byla dosažena za 12 sekund. Nejvyšší hodnota rozdílu teplot 26 °C byla zjištěna u experimentu 5-400-20, byla dosažena za 24 sekund. U experimentů s 20 mm od dna expanzní komůrky se rozdíly teplot v místě termočlátku 8 pohybují od 4 °C do 48 °C. Nejnižší hodnota 4 °C, která byla dosažena za 7 sekund, byla zjištěna u experimentu 20-400-6. Nejvyšší hodnota rozdílu teplot 48 °C byla naměřena u experimentu 20-400-20, byla dosažena za 22 sekund.

Dále je z naměřených hodnot patrné, že nejnižší hodnoty příslušných rozdílů teplot byly zjištěny u experimentů s nejnižší dobou vstřikování CO₂, tj. 6 sekund, to byly série experimentů 5-400-6 a 20-400-6. Naopak nejvyšší rozdíly teplot byly zjištěny u příslušných experimentů s nejdelší dobou vstřikování CO₂, tj. 20 sekund, což odpovídá experimentům 5-400-20 a 20-400-20. Současně vyšší rozdíly teplot jsou patrné z experimentů prováděných při podmínkách 5 mm od dna expanzní komůrky. Současně při podmínkách 5 mm od dna expanzní komůrky jsou nejvyšší rozdíly teplot patrné v místě termočlátku 3. Při podmínkách 20 mm od dna expanzní komůrky jsou nejvyšší rozdíly teplot patrné z místa termočlátku 6.

3. Z výše uvedených grafických závislostí je dále patné, že pokles teploty způsobu chlazení 5-400-6 nepřevyšuje v žádném bodě měření (termočlátku) hodnotu 10°C. Nejvyšší pokles teploty zaznamenaly termočlásky 1 a 3 o hodnotě 7°C za 6 sekund, dále pak termočlásky 4, 5 o poklesu 4 a 6 °C. Teplota na ostatních termočláscích poklesla cca o 2 °C.

Způsobem ochlazování 5-400-12 poklesly teploty na termočlásku 4 o 46°C za 15 sekund a termočlásku 5 o 38°C za 12 sekund. Tyto hodnoty řadí tento způsob chlazení mezi tři nejintenzivnější způsoby chlazení těchto tenkých míst jádra. Nejvyšší pokles teploty je na termočlásku 3 55°C za 15 sekund. Nejnížší na termočlásku 7 9°C. Na termočláscích 2,6 a 8 je pokles teploty v rozmezí 15 až 20°C.

Způsob 5-400-12-0,5 je další intenzivní způsob chlazení především v oblasti tenkých míst 4 a 5. Pokles teploty na termočlásku 4 je 41°C za 15 sekund, na termočlásku 5 je pokles teploty 43°C za 13 sekund. Průběhy tohoto způsobu chlazení kopírují průběhy 5-400-12, ale při poloviční spotřebě CO₂.

Způsob chlazení 5-400-12-1 je v porovnání s výše uvedenými dvanáctisekundovými způsoby měření méně efektivní. Maximální hodnota poklesu teploty je 10°C za 14 sekund na termočlásku 5. Na termočlásku 4 je pokles teploty 7°C za 15 sekund. Na termočláscích 1 a 3 je pokles teploty 9°C za 13 sekund. Pokles v ostatních termočláscích je cca 2°C.

5-400-20 je nejintenzivnější způsob chlazení tenkých míst 4 a 5 s poklesem teplot 69°C za 23 a 22 sekund. Maximální pokles teploty je 76°C za 25 sekund na termočlásku 3. Minimální 18°C za 40 sekund na termočlásku 7.

20-400-6 je způsob chlazení s nízkou intenzitou, ale velkou homogenitou ochlazení povrchu jádra. Pokles teplot na celém povrchu jádra je 2°C. Výjimku tvoří maximální pokles teploty 6°C za 7 sekund na termočlásku 6 a pokles teploty 4°C za 7 sekund na termočlásku 8. Oba tyto termočlásky jsou v blízkosti expanzních komůrek.

20-400-12 je obdobně homogenní způsob chlazení povrchu jádra. Dvanáctisekundový cyklus chlazení zvýšil maximální pokles teploty na 21°C za 13 na termočlásku 6, teplotu na termočlásku 8 na 18°C za 14 sekund. Pokles teplot na povrchu jádra se zvýšil na cca 8°C.

20-400-12-0,5 je sekvenční způsob vstřikování CO₂. Maximální pokles teplot je na 21°C za 13 sekund na termočlásku 8, a pokles teploty na termočlásku 6 je 20°C za 12 sekund. Průběhy poklesů teplot na povrchu jádra kopírují průběhy měření 20-400-12, při poloviční spotřebě CO₂. Pokles teplot na povrchu jádra je cca 9°C.

20-400-12-1 je další méně efektivní způsob chlazení. Maximální pokles teploty je 7°C za 12 sekund na termo článku 6 a pokles teploty na termočlánku 8 je 4°C za 12 sekund. Homogenní teplota na povrchu jádra je cca 2°C. Nízký pokles teplot s nejdelší dobou náběhu na maximální hodnotu ochlazení řadí tento způsob chlazení na konec vhodnosti použití.

20-400-20 je nejintenzivnější způsob chlazení se vzdáleností kapiláry 20 mm od dna expanzní komůrky. Vyznačuje se vysokou homogenitou poklesu teplot na povrchu jádra. Je to čtvrtý nejintenzivnější způsob chlazení v tenkých oblastech jádra (termočlánky 1,3,4,5) a nejintenzivnější v oblastech termočlánků 6,7,8. Maximální pokles teploty je 49°C a 48°C za 22 sekund na termo člancích 6 a 8. Homogenní teplota na povrchu jádra je cca 26°C.

Z výše uvedených grafických závislostí změny teplot na čase je patrné, že při umístění kapiláry ve vzdálenosti 5mm ode dna expanzní komůrky (měření 5-400-6 až 20) je nástup a tudíž i doba dosažení maximálních hodnot výrazně kratší než je tomu u vzdálenosti 20 mm (měření 20-400-6 až 20). Toto je dobře viditelné především na termočláncích 1, 3, 4 a 5. Dále je u umístění kapiláry 5 mm ode dna expanzní komůrky kromě vyšších maximálních hodnot i poměrně vysoký rozptyl teplot v jednotlivých částech jádra. Rovnoměrnějšího ochlazení jádra v celém jeho objemu dostaneme při vstřikování kapalného CO₂ kapilárou ve vzdálenosti 20 mm. Zde výkyv teploty představují pouze měřící body 6 a 8 v blízkosti expanze CO₂. Platí zde však pravidlo, že homogennější ochlazení jádra je zde na úkor celkové nižší ochlazovací teploty.

4. Současně je nutno konstatovat, že v reálných technických podmínkách bude důležité množství vstříknutého kapalného CO₂, které ovlivní nejen tepelné poměry na povrchu jádra, ale i jeho okolních partií.

5. Výše uvedené výsledky rozdílů teplot s využitím CO₂ mohou být základem pro výpočty tepelné bilance chlazení vysokotlakých slévárenských forem. Nebo mohou být využity při simulačních výpočtech tuhnutí a chladnutí odlitků ve formách s jádrem chlazenými CO₂.

5 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá chladícím účinkem kapalného CO_2 u kovových jader slévárenských forem. V teoretické části je komplexně shrnuta problematika chlazení v tlakových licích formách. Velká pozornost je věnována chladícímu účinku kapalného CO_2 . Experimentální část práce popisuje provedené experimenty, které simulují ochlazovací účinek CO_2 v podmínkách kovových forem. K tomuto účelu bylo použito speciálně navržené a sestavené měřicí zařízení, které umožňuje sledovat ochlazovací účinek chladícího média CO_2 při určitých podmínkách.

Volba způsobu dávkování CO_2 vycházela z praktických předpokladů, že doba působení dotlaku (možnost ovlivnění kvality struktury daného místa odlitku) činí cca 6s. Od této hodnoty doba do otevření formy je dalších 6 s, proto byla volena další hodnota působení chladícího média 12 s. Po otevření formy je za 8 s vyjmut odlitek. Proto byla další hodnota časového údaje volena 20 s.

Na základě výsledků provedených experimentů lze shrnout tyto dílčí výsledky:

1. Použité měřicí zařízení svou konstrukcí vyhovuje k provedení potřebných experimentů za účelem zjištění změn teplot na povrchu jádra v určitých časových okamžicích.
2. Použité termočlánky Chromel - Almel jsou vhodné pro sledování změn teploty na povrchu jádra. V této souvislosti je nutné při navařování termočlánků na jádro dbát zásady umístění termočlánků v součinnosti s maximálním tepelným tokem.
3. Výsledky experimentu ukázaly, že největší ochlazovací účinek má chlazení s podmínkami 5-400-20, tj. při vzdálenosti kapiláry od dna expanzní komůrky 5 mm, při teplotě přehřevu jádra $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ a době vstřikování CO_2 20 sekund.
4. Výsledky experimentu ukázaly, že nejvýhodnější poměr mezi maximálním poklesem teploty a množstvím vstříknutého CO_2 je při podmínkách chlazení 5-400-12-0,5, tj. při vzdálenosti kapiláry od dna expanzní komůrky 5 mm, při teplotě přehřevu jádra $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ a době vstřikování CO_2 , sekvenční vstřik po 0,5 sekundy a 12 opakováních (12s).
5. Výsledky experimentu ukázaly, že nejnižší pokles teploty s nejdelší dobou náběhu na maximální hodnotu je dosaženo při podmínkách experimentu 20-400-12-1, tj. za podmínek vzdálenosti kapiláry od dna expanzní komůrky 20 mm, při teplotě přehřevu jádra $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ a době vstřikování CO_2 , sekvenční vstřik po 1 sekundě a 6 opakováních (12s).
6. Výsledky experimentu ukázaly, že největšího ochlazovacího účinku při homogenní

teplotě na povrchu jádra je dotaženo při chlazení 20-400-20, tj. při vzdálenosti kapiláry od dna expanzní komůrky 20 mm, při teplotě přehřevu jádra 400 °C a době vstřikování CO₂ 20 sekund.

Na základě získaných výsledků lze pro budoucí práce doporučit odzkoušení i dalších vhodných médií, což by v tomto případě mohlo být využití kapalného dusíku (N₂), který umožňuje vyšší ochlazovací účinek.

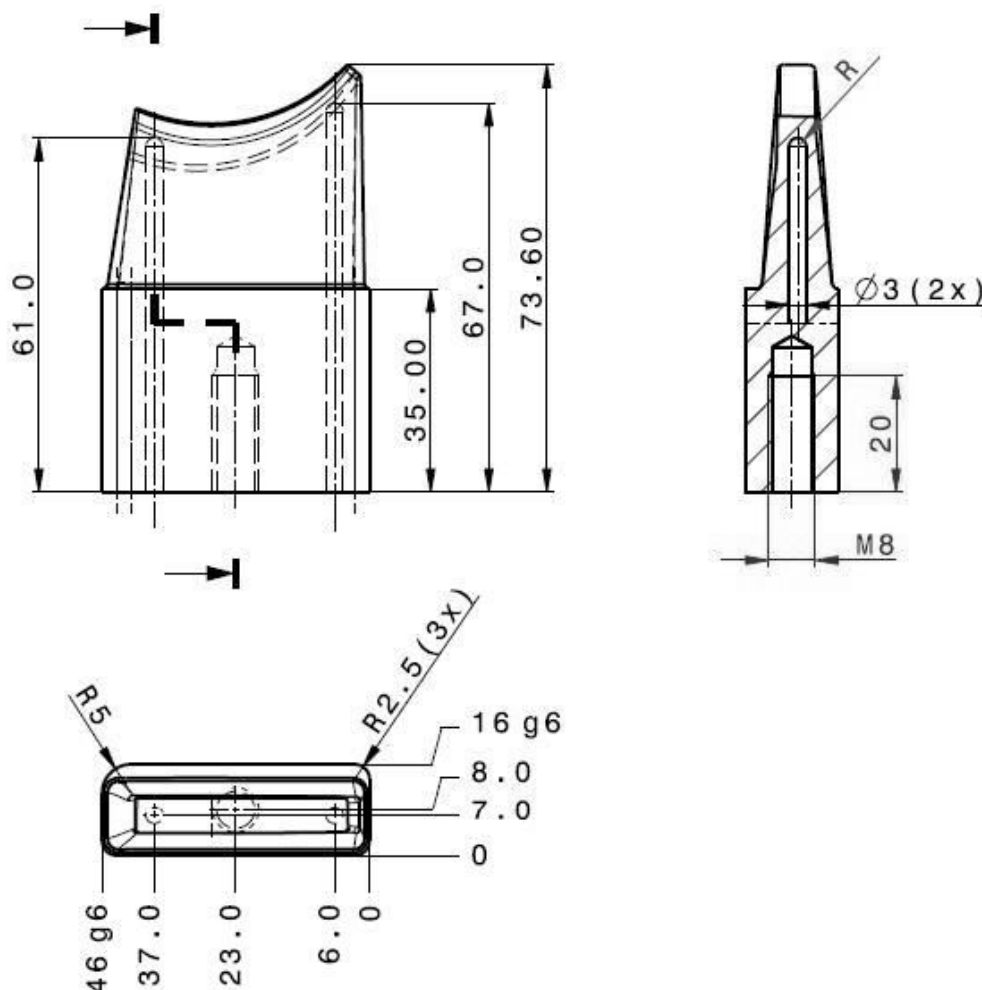
Protože se jedná o prvotní experimenty ryze výzkumného charakteru se zaměřením na hodnocení chladicího účinku CO₂, bez průmyslové aplikace, nebylo provedeno ekonomické hodnocení výsledků diplomové práce.

6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HAVEL, J. *Tlakově lité odlitky z Al slitin pro automobilový průmysl*. Brno, 2001. Diplomová práce. VUT Brno.
- [2] RAGAN, E. *Litie kovov pod tlakom*. Prešov, 2007. ISBN 97-80-8073-979-9 .
- [3] *Metalurgická výroba* [online]. Liberec: TU v Liberci. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/MV-cv_3.pdf
- [4] BĚHÁLEK, L. *Temperace vstřikovacích forem* [online]. Liberec: TU v Liberci 2013 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tzn/8.pdf
- [5] ELAP. *Tlakové licí stroje* [online]. 2009 [cit. 2014-03-05]. Dostupné z: <http://www.elap.eu/other/tl56.htm>
- [6] NOVÁ, I., NOVÁKOVÁ, I., BRADÁČ, J. *Technologie I*. Liberec. TU v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-052-3.
- [7] AHRESTY-TEC. *Jet Cool Systém* [online]. Nedatováno [cit. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.ahresty-tec.jp/2013catalog/en_pdf/9-16.pdf
- [8] ŠTROBACH, V. *Vliv teplotních režimů formy na jakost vysokotlakých odlitků*. Liberec, 2011. Disertační práce. TU v Liberci.
- [9] WAERMELEITROHRE. *Tepelné trubice* [online]. 2011 [cit. 2014-03-28].. Dostupné z: <http://www.waermeleitrohre.de/eng/index.htm>
- [10] BĚHÁLEK, L. *Termoplasty v praxi: Kapalné CO2* [online]. Liberec. TU v Liberci. Nedatováno [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/lidi/behalek/Termoplastyvpraxi.pdf>
- [11] UDDEHOLM DIEVAR . *Materiály na výrobu forem* [online]. 2012 [cit. 2014-04-04]. Dostupné z: http://www.uddeholm.com/files/AB_die_casting_eng.pdf.
- [12] Nováková, I., Nová, I., Solfronk, P., aj.: *Aplikovaný multioborový výzkum a vývoj progresivních způsobů chlazení u technologických procesů*, Průběžná zpráva TL_2013_01, TA03010492, TU v Liberci, 2013.
- [13] KUTĚJ, P., HANZAL, J.: *Oxid uhličitý*. ČATP. Praha 2002
- [14] *Plynný a pevný oxid uhličitý* [online]. Nedatováno [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: www.eprojekt.gjs.cz/Services/Downloader.ashx?id=19748
- [15] *Jádro pro Spot Cooling*: [online]. 2014 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://www.ptonline.com/articles/liquid-co2-spot-cooling-gets-into-tight-spots-in-molds>
- [16] BUŠTA, K., WAGNER, Z.: *Oxid uhličitý možnosti jeho využití I* [online]. 2012

- [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/8492-oxid-uhlicity-a-moznosti-jeho-vyuziti-i>
- [17] UNION ENGINEERING, *Eigenschaften Der Kohlensaure* [online]. Nedatováno [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.union.dk/media/CO2EigenschaftenBrochure.pdf>
- [18] *Schéma systému CO₂* [online]. 2010 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: http://www.linde-gas.cz/internet.lg.lg.cze/cs/images/Linde_brozurka_plastik.prum_01.06.10_final79_14916.pdf
- [19] *Gas Encyclopedia* [online]. Nedatováno.[cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp?GasID=26&LanguageID=17&CountryID=32>
- [20] UDDEHOLM DIEVAR . *DIEVAR tepelně - fyzikální vlastnosti* [online]. 2012 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.uddeholm.com/files/dievar-english.pdf>

Příloha



NEKÓTOVANÉ TVARY DLE 3D MODELU
TVAR LEŠTIT
ALL UNSPECIFIED SHAPES ACCORDING TO 3D MODEL
SHAPE BURNISH

2			UDDEHOLM DIEVAR	KALIT, POPUŠTIT 46-2 HRC QUENCHED-TEMPERED 46-2 HRC	12
POČET K.: PCS:	NÁZEV-ROZMĚR/TITLE-SIZE	POLOTOVAR: INTERMEDIATE:	MATERIAL:	TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ: HEAT TREATMENT:	ČÍSLO VÝKRESU: DRAWING NO.
MĚŘÍTKO: SCALE: 1:1	KRESLIL: DRAWN: Vojna	TOLERANCE: ROZMĚR S DESETINNÝM MÍSTEM DIMENSION WITH DECIMALS	- .0 - .00	±0.1mm ±0.01mm	VIEW CONVENTION:
FORMAT: A4	DATUM: DATE: IX/2013	ZMĚNA/CHANGE	DATUM/DATE	PROVEDL/NAME	INDEX
Shape Design Nemanická 141640 České Budějovice tel. 0042 0 38 7222889		NÁZEV: TITLE: VLOŽKA IV INSERT IV	ČÍSLO VÝKRESU: DRAWING NO.: 295 01 22		1/1 LIST Č. SHEET NO. 42