



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



SLEDOVÁNÍ ROZMĚROVÝCH ZMĚN PŘI TUHNUTÍ A CHLADNUTÍ ODLITKŮ ZE SLITIN HLINÍKU

Diplomová práce

Jiří Morávek

2008





TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M2301- strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenské metalurgie

Sledování rozměrových změn při tuhnutí a chladnutí odlitků ze slitin hliníku

Observing the proportions changes during solidification and cooling cast of alluminium alloys

Jiří M o r á v e k

KSP – SM – 529

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Machuta

Rozsah práce a příloh: 90

Počet stran: 74

Počet tabulek: 11

Počet obrázků: 66

Počet příloh: 16

23. 5. 2008

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: M2301- Strojní inženýrství

Diplomant: Jiří Morávek

Téma práce: Sledování rozměrových změn při tuhnutí a
chladnutí odlitků ze slitin hliníku
Observing the proportions changes during
solidification and cooling cast of aluminium alloys

Číslo DP: KSP – SM – 529

Vedoucí DP: Prof. Ing. Iva Nová, CSc.- TU v Liberci

Konzultant: Ing. Jiří Machuta - TU v Liberci

Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá sledováním rozměrových změn hliníkových odlitků z pístové slitiny používané pro odlévání pístů spalovacích motorů. Diplomová práce je rozdělena na dvě základní části. V části teoretické je popsána krystalizace kovů a slitin a změny, které jí provázejí a vlastnosti slitin používaných pro odlévání pístů spalovacích motorů. V části praktické jsou provedena vyhodnocení experimentů prováděných na měřicím zařízení, která by měla ukázat působení jednotlivých parametrů na rozměrové změny dané slitiny.

Anotation:

This thesis deals with observing the proportions changes of aluminum casts of piston alloy used for casting pistons of gas engines. Thesis is divided into two basic parts. Theoretical part describes the metals and alloys crystallization and changes which go along with this process and properties of alloys used for casting pistons of gas engines. Practical part contains evaluation of experiments which shall show the action of parameters on proportion changes of this alloy.

**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci 23. 5. 2008

.....

Jiří Morávek

Irkutská 117

460 08 Liberec 19



Poděkování

Děkuji všem, kteří svou pomocí a podporou přispěli k vypracování této diplomové práce, zejména pak paní Prof. Ing. Ivě Nové, CSc. a Ing. Jiřímu Machutovi za pomoc, cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat panu Drahoslavu Vinšovi a Ing. Bc. Stanislavě Krýslové za pomoc při provádění experimentů. Také děkuji svým rodičům za morální a hmotnou podporu při studiu.

V Liberci 23. 5. 2008

.....
Jiří Morávek
Irkutská 117
460 08 Liberec 19

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	8
1. ÚVOD	10
2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE	11
2.1 Struktura tuhých látek	11
2.2 Struktura tavenin a kapalin.....	12
2.3 Porovnání vlastností kovů v tuhém a kapalném stavu	16
2.4 Tavení kovů	16
2.5 Krystalizace a chladnutí kovů.....	19
2.6 Lineární a objemové změny tuhnoucího odlitku	23
2.6.1 Smršťování v tekutém stavu	24
2.6.2 Smršťování v intervalu tuhnutí	25
2.6.3 Smršťování odlitku při ochlazování	34
2.7 Obecné vlastnosti hliníku a jeho slitin	36
2.8 Vlastnosti slitin používaných pro odlévání pístů spalovacích motorů.....	41
2.9 Obecně o pístech spalovacích motorů.....	42
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	44
3.1 Podmínky při provádění experimentů	44
3.1.1 Charakteristika použitých slévárenských forem	45
3.1.2 Příprava taveniny	48
3.1.3 Charakteristika použitého měřicího zařízení a prov. experimentů	49
3.2 Vyhodnocení experimentů	55
3.2.1 Výpočet součinitele teplotní smrštivosti odlitků	64
3.2.2 Vyhodnocení maxima, minima a rozdílu dilatací	65
3.2.3 Porovnání dilatace při ohřevu a chladnutí	66
4. DISKUZE VÝSLEDKŮ	68
5. ZÁVĚR.....	72
6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	74
PŘÍLOHA.....	75

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

$\Delta H_{tá}^0$	–	molové teplo tání [J.kmol ⁻¹]
$l_{tá}$	–	měrné teplo tání [J.g ⁻¹]
M	–	molekulová hmotnost [g.mol ⁻¹]
$\frac{dT}{dp}$	–	diferenciální kvocient [K.Pa ⁻¹]
T	–	teplotu tání [°C]
$V(l)-V(s)$	–	rozdíl molových objemů v kapalném a tuhém stavu [m ³ .mol ⁻¹]
$\%X_s$	–	koncentrace uvažovaného prvku na čáře solidu [%]
$\%X_l$	–	koncentrace uvažovaného prvku na čáře likvidu [%]
G_L^0	–	molová volná entalpie taveniny [J.mol ⁻¹]
G_S^0	–	molová volná entalpie tuhé fáze [J.mol ⁻¹]
σ	–	napětí mezi krystalovým zárodkem a taveninou [N.m ⁻¹]
G	–	volná entalpie [J]
$T_{tá}$	–	teplota tání [°C]
T_p	–	teplota přechlazení [°C]
γ	–	koeficient objemové roztažnosti [K ⁻¹]
ΔV	–	změna objemu [m ³]
ΔT	–	změna teploty [K]
V_0	–	počáteční objem [m ³]
γ_L, γ_S	–	součinitel objemového smrštění [K ⁻¹]
δ	–	šířka pórovitého pásma [m]
X	–	polovina tloušťky stěny odlitku [m]
ΔT_{KR}	–	interval tuhnutí slitiny [K]
T_{OP}	–	teplota okolí [K]
ρ_S	–	hustota slitiny v tuhém stavu [kg.m ⁻³]
ρ_L	–	hustota slitiny v tekutém stavu [kg.m ⁻³]
Bi	–	Biotovo kritérium [-]
α_{k-f}	–	součinitel přestupu tepla [W.m ⁻² .K ⁻¹]
λ_f	–	tepelná vodivost formy [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Δl_V	–	úbytek rozměru odlitku [m]

l_p –	počáteční rozměr odlitku [m]
l_V –	rozměr odlitku po volné dilataci [m]
α –	součinitel volného délkového smrštění [K^{-1}]
Rm –	mez pevnosti v tahu [MPa]
Re_{02} –	mez kluzu v tahu [MPa]
A_{02} –	tažnost [%]
HB –	tvrdost podle Brinella

1. ÚVOD

Slévárenství je výrobní technologie, kde se výrobek tzv. odlitek vyrábí odlitím roztaveného kovu nebo slitiny kovů do dutiny slévárenské formy, která je negativem budoucího odlitku. V technické praxi se ve většině případů používají slitiny kovů, protože mají lepší slévárenské vlastnosti, než čisté kovy, jsou to především slitiny železa a z těchto jsou to oceli na odlitky a litiny, dále slitiny neželezných kovů, ze kterých jsou jedny z nejvýznamnějších pro průmyslové použití slitiny hliníku na bázi Al - Si, jedná se tzv. siluminy. Siluminy jsou slitiny, které mají značné uplatnění při výrobě odlitků v automobilovém průmyslu, jako např. bloky spalovacích motorů osobních automobilů, skříň převodovek, disky kol, víka, hlavy a písty spalovacích motorů. Tyto slitiny jsou zpracovávány progresivními technologiemi (vysokotlaké, nízkotlaké, gravitační lití, atd.).

Pro výrobu odlitků jsou velmi důležité slévárenské vlastnosti použitých slitin, především jejich sklon ke stahování a lineárnímu smršťování. Tyto rozměrové změny jsou důležité při návrhu dutiny slévárenské formy nebo volbě velikosti nálitku především při jejich gravitačním odlévání. Obecně je známo, že siluminy se vyznačují poměrně velkou lineární smrštlivostí i stahováním při tuhnutí. Přesná hodnota těchto změn závisí na obsahu křemíku v siluminu, slitiny tuhnoucí při jedné teplotě (eutektické) vykazují nejmenší hodnotu těchto vlastností. Po odlití kov vyplní dutinu slévárenské formy kde ztuhne, při tomto procesu dochází na rozhraní slévárenská forma - odlitek k různým teplotně-fyzikálně-chemickým dějům, které jsou ovlivněny vlastnostmi odlévaného kovu ale i vlastnostmi slévárenské formy. Tyto děje přímo ovlivňují konečné vlastnosti odlitku.

Problematikou stahování a lineárním smršťováním odlitků ze slitin hliníku se zabývají pracovníci Katedry strojírenské technologie TU v Liberci v rámci řešení výzkumného záměru MSM 4674788501.

Vlivem těchto dějů dochází mimo jiné také ke změnám tvaru a rozměrů odlitku při jeho tuhnutí a chladnutí, kterými se zabývá tato diplomová práce na téma: „Sledování rozměrových změn při tuhnutí a chladnutí odlitků ze slitin hliníku“.

Diplomová práce vznikla s podporou výzkumného záměru MSM 4674788501

2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

2.1 Struktura tuhých látek

Veškeré kovy s výjimkou rtuti jsou za normální teploty krystalické. Změna skupenství při přechodu ze stavu kapalného do tuhého je vedle objemových změn doprovázena i změnami pohyblivosti a uspořádání částic, resp. atomů, koordinační síly řadí tyto atomy ve zcela přesném pořadí. Pohyblivost atomů se omezuje a hmota ztrácí vlastnosti taveniny, tj. izotropii, volnost pohybu atomů. Postupně vzniká útvar, ve kterém se atomy uspořádávají prostorově periodicky, pravidelně podle určitých zákonitostí, mluvíme o krystalech. Stavební částice krystalu však nejsou úplně nehybné, ale kmitají podle svých středních poloh, jež jim přísluší v krystalické struktuře. Při utváření odlitku ve slévárenské formě je možno sledovat nárůst krystalických vrstev, tento proces se označuje jako tuhnutí. Krystaly slitiny, v nichž jsou přítomny atomy obou kovů, základního i přídavného, se nazývají tuhým roztokem.

Čisté kovy tuhnou při konstantní teplotě při níž se atomy kovů uspořádávají do krystalické mřížky. Protože tavenina má nižší uspořádání atomů a tím vyšší entropii než tuhá fáze, je Gibbsova energie tuhé fáze do teploty tuhnutí menší než fáze kapalné. Proto dochází ke krystalizaci, při které se uvolňuje určitá energie ve formě tzv. skupenského krystalizačního tepla. Z termodynamického hlediska je teplota tuhnutí teplotou teoretickou při níž Gibbsova energie tuhé fáze a kapalné fáze mají stejnou hodnotu.

I když tuhnutí kovů probíhá teoreticky při konstantní teplotě, je nutno v praktických podmínkách vyvolat určité podchlazení kapalné fáze, resp. taveniny. To je vytvoření ještě nižší teploty v tavenině, než je teplota tuhnutí. Pak krystalizace začne probíhat při „skutečné“ teplotě. To vyplývá z termodynamiky krystalizace, jejíž podstatou je záporná hodnota změny Gibbsovy energie.

2.2 Struktura tavenin a kapalin

Strukturu kapalin nebo tavenin určuje způsob uspořádání jejich základních částic. Kapaliny mají vlastní objem ale jejich tvar je dán tvarem nádoby v níž se nacházejí. Z toho vyplývá, že mezi atomy nebo molekulami tavenin působí silné meziatomové nebo mezimolekulární síly, podmiňující jejich soudržnost. Existence kapalného stavu tedy závisí na určité rovnováze mezi přitažlivými meziatomovými nebo mezimolekulárními silami a silami vyvolanými tepelným pohybem, které sice znesnadňují rozmístění atomů v uzlových bodech krystalických mřížek, nejsou však natolik energické, aby převýšily působení těchto přitažlivých sil. Ukazuje to např. viskózní tok kapalin, který potvrzuje větší možnost pohybu atomů nebo molekul v kapalinách, což nutně souvisí s porušením pravidelnosti uspořádání, které je charakteristické pro krystalické látky.

Teoretické představy o struktuře kapalin či tavenin mohou v podstatě vycházet ze dvou navzájem rozdílných hledisek. Podle prvního hlediska jsou kapaliny považovány za plynulé pokračování plynného stavu v oblasti nízkých teplot a velmi vysokých tlaků, kdy se již velmi výrazně uplatňují vlastní objemy a mezimolekulární přitažlivé síly molekul plynů. Tuto teorii podpořily výsledky výzkumu při zkapalňování plynů a určování kritických teplot, které ukázaly na možnost plynulého přechodu ze skupenství plynného do kapalného. Rovněž z použitelnosti Van der Waalsovy rovnice jak pro plyny, tak pro kapaliny vyplývá podobnost mezi strukturou obou skupenství.

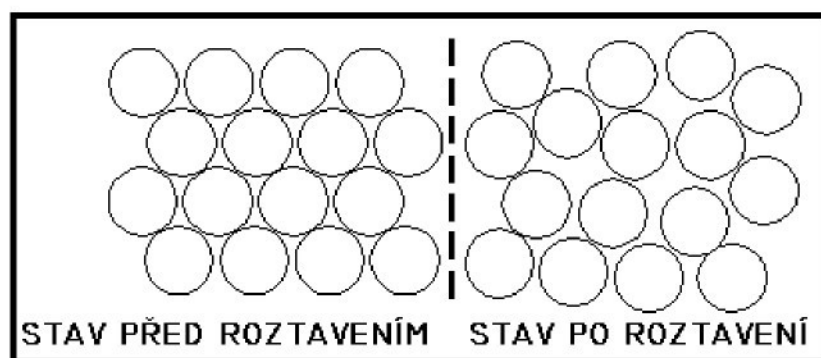
Druhé hledisko považuje taveniny za roztavené krystalické látky, jejichž prostorové uspořádání se částečně zachovává v určité formě po roztavení.

Výstižnost obou hledisek závisí především na podmínkách, ve kterých se kapalina nebo tavenina nachází. Při teplotách blízkých bodu varu se struktura kapalin a tavenin bude blížit značně nedokonalým plynům. Naproti tomu v oblasti teplot nad bodem tání bude mít kapalina nebo tavenina v souladu s druhým názorovým hlediskem řadu vlastností podobných tuhým látkám.

Protože většina metalurgických procesů probíhá při teplotách jen málo převyšujících teploty tání zúčastněných látek, vychází teorie metalurgických

tavenin z představy, že struktura metalurgických tavenin je více podobná struktuře tuhých krystalických látek než struktuře plynů.

Se strukturou roztavených kovů souvisí jejich vlastnosti, které se během každého metalurgického procesu mění podle potřeby. Obzvláště významné jsou změny vlastností spojené s prováděním odkysličení, odsíření, odfosfoření a legování, které dále významně ovlivňují vlastnosti jak polotovarů tak konečných výrobků.



Obr. 2 - 1 Rozmístění atomů v krystalové mřížce před a po roztavení

Podstatné údaje o struktuře tavenin kovů přinášejí výsledky jejich studia pomocí RTG, které potvrzují, že taveniny nemohou být homogenní v tom smyslu jako plyny, ale že vykazují určité uspořádání, jež je obdobné uspořádání základních strukturních částic v krystalických látkách.

V tuhých krystalických látkách charakterizuje uspořádání základních strukturních částic existence uspořádání na větší a menší vzdálenost (tzv. absolutní a relativní uspořádání). Uspořádání absolutní je u tuhých krystalických látek vyjádřeno tím, že ve směru jednotlivých os se vždy vyskytují po určitých přesných vzdálenostech analogické atomy což je zpravidla u dvou až čtyř vrstev, i když se vyskytují rovněž případy, kdy se pravidelné uspořádání struktury opakuje i u několika set vrstev. Relativní uspořádání vyjadřuje specifické uspořádání nejbližších sousedů vzhledem k danému atomu.

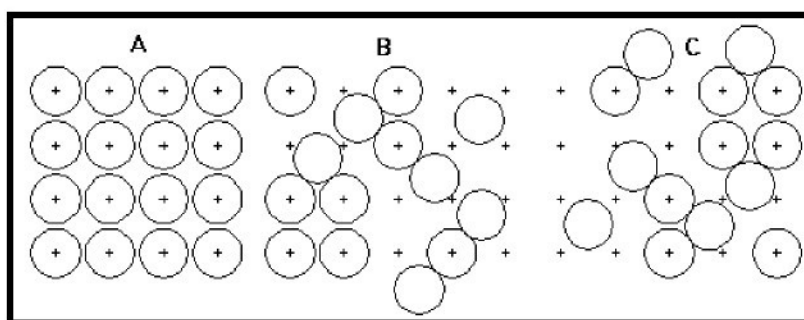
Na základě výše uvedených výsledků, které poskytlo studium struktury roztavených kovů pomocí RTG, vznikly v podstatě dvě teorie o uspořádání základních částic v taveninách a kapalinách.

1) Teorie kvasikrystalická říká, že základní strukturní rozdíl kapalin nebo tavenin oproti tuhým krystalickým látkám je v tom, že po roztavení kovů zůstává zachováno pouze relativní uspořádání, zatím co absolutní uspořádání zmizí. Rozdíl mezi tuhou a kapalnou fází je podle kvasikrystalické teorie tedy v:

- a) malé změně koordinačního čísla při tavení,
- b) malý vzrůst vzdálenosti mezi sousedními atomy při tavení,
- c) relativně velký vzrůst volného objemu,
- d) víceméně stejný stupeň relativního uspořádání.

2) Teorie rojů nebo sibotaxisů říká, že se v kapalinách nebo taveninách mohou vyskytnout různě velké skupiny částic (tzv. roje nebo sibotaxisy, viz. obrázek 2 - 2), které mají téměř stejné uspořádání jako krystalická látka v tuhém stavu. Tyto skupiny však nejsou rozloženy rovnoměrně v celém objemu a jejich struktura se mění s časem. Ve vnitřní struktuře existuje takto omezená uspořádanost, vztahující se pouze na malé nezávislé skupiny- sibotaxisy, které s časem mění svou velikost i vnitřní uspořádání tzn. že atomy dříve náležející k jedné skupině, přecházejí k druhé, nově vznikající se zcela jinými parametry symetrie. Uvážíme-li, že tavenina sestává z podobných stále vznikajících uspořádaných oblastí, mohou být v taveninách v libovolný časový okamžik rozděleny všechny částice do dvou skupin na částice:

- kmitající okolo rovnovážných poloh- center kmitů,
- nevázané s žádnou rovnovážnou polohou a pohybující se chaoticky.



Obr. 2 - 2 Struktura a)krystalické látky, b,c) kapaliny

Z toho vyplývá, že tepelný pohyb v kapalinách nebo taveninách má rysy jak tepelného pohybu u tuhých látek (kmitání okolo rovnovážných poloh) tak u plynů (chaotický pohyb volných částic).

Bezprostředně po roztavení tuhé krystalické látky sestává tavenina z uspořádaných kvasikrystalů a jednotlivých volných částic, kterých je relativně nejvíce v okolí mřížkových poruch. S rostoucí teplotou roste počet volných částic a současně dochází k rozrušování oblastí kvasikrystalů. Za velmi vysokých teplot dochází k destrukci posledních rysů struktury kvasikrystalů a začíná převládat chaotický pohyb volných částic tj. tavenina přechází v páru. Z toho vyplývá, že pravděpodobnost existence a stálost uspořádaných skupin v tavenině roste s tím, jak se teplota přibližuje teplotě tuhnutí taveniny.

S teorií rojů nebo sibotaxisů úzce souvisí teorie tzv. dírkové struktury podle níž dochází při tavení tuhých látek ke vzniku místních zárodečných trhlinek. Tyto trhlínky nezpůsobují úplné porušení souvislosti kapaliny, protože i když určitý atom taveniny přerušuje svou vazbu s jedním ze svých sousedů je nadále spojen vazbou se všemi okolními sousedními atomy. V tavenině je podobných trhlinek značné množství, takže okamžité uspořádání atomů je nepravidelné. Na určitých místech jsou vzdálenosti mezi atomy stejné jako u tuhé látky, na jiných jsou vzdálenosti prodlouženy trhlínkami. Když tyto vzdálenosti překročí rozměry atomů, bude pro libovolný sousední atom energeticky výhodnější opustit své původní místo a zaplnit příslušnou trhlínku čímž trhlínka zaniká a místo ní vzniká nová v sousední poloze.

Tyto teorie se týkají především ideálních tavenin nebo kapalin. Struktura reálných tavenin s určitým podílem rozpuštěných nebo nerozpuštěných příměsí bude poněkud odlišná, neboť změna ve složení taveniny se výrazně projevuje již při nízkých koncentracích příměsí v její struktuře a tím i na jejích vlastnostech jako jsou viskozita, povrchové napětí apod.

2.3 Porovnání vlastností kovů v tuhém a kapalném stavu

Ze zkoumání struktury roztavených kovů vyplývají jejich vlastnosti v roztaveném stavu. Během každého metalurgického procesu měníme podle potřeby vlastnosti roztaveného kovu. Zvláštní význam zde mají změny vlastností spojené s odkysličením, odsířením, legováním, atd., které dále výrazně ovlivňují jak vlastnosti polotovarů tak konečných výrobků.

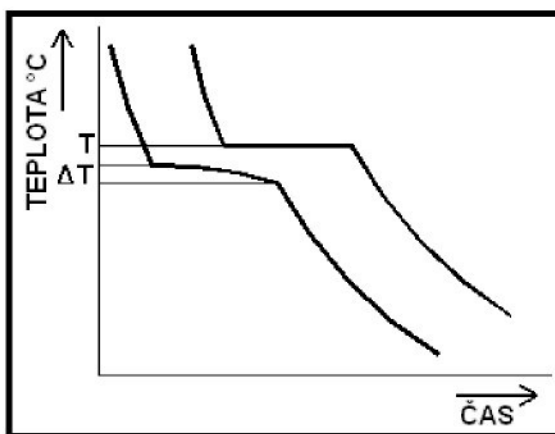
Na rozdíl od roztavených kovů byly již vlastnosti kovů v tuhém stavu podrobně prozkoumány, což bylo usnadněno tím, že kovy v tuhém stavu mají atomy uspořádány v krystalické mřížce. Toto umožnilo jejich výzkum metodami rentgenové strukturní analýzy. Řada vlastností kovů v tuhém stavu byla takto kvalitativně vysvětlena pomocí elektronové teorie a teorie dislokací.

Určitý obraz o struktuře metalurgických tavenin mám poskytují výsledky zkoumání jejich fyzikálních vlastností v oblasti teplot nad bodem tání. Z porovnání latentních tepel tání kovů s jejich latentním teplem vypařování vyplývá, že se struktura kovů při tavení mění méně výrazně, než při jejich vypařování, neboť latentní tepla tání jsou asi 30 až 40 krát menší než latentní tepla vypařování. U kovů s těsným uspořádáním atomů v krystalické mřížce roste po roztavení jejich objem o 2 až 6%. Hustoty kovů v tuhém a roztaveném stavu svědčí o tom, že volný objem v tavenině je jen o málo větší než v tuhém stavu. Hodnoty tepelných kapacit tavenin kovů se v blízkosti bodu tání blíží hodnotám tepelných kapacit tuhých krystalických kovů což ukazuje, že tepelný pohyb atomů v roztaveném kovu je řádově stejný jako u kovů v tuhém stavu. Také hodnoty koeficientů teplotních roztažností a tepelné a elektrické vodivosti se u kovů v tuhém a roztaveném stavu liší jen málo.

2.4 Tavení kovů

Tavení je přechod kovů a slitin nebo jakýchkoliv jiných látek z tuhého do kapalného stavu a je fázovou přeměnou. Čisté kovy se taví při přesně definované teplotě, kterou nazýváme teplotou tání. Tato teplota závisící na tlaku, zůstává během tání konstantní a charakteristická pro každý kov.

Tavení slitiny na rozdíl od čistého kovu tedy jednosložkové látky probíhá v určitém intervalu teplot, který je závislý na složení slitiny a vnějším tlaku. Při tavení dochází k náhlé změně vnitřní energie, objemu a entropie látek a ke změně jednotlivých fyzikálních vlastností. Tání kovů je spojeno se spotřebou tepla, jež je potřebné jednak k zeslabení meziatomových vazeb, jednak k určité objemové práci, spojené u většiny kovů se zvětšením objemu. Pohlcené teplo, které nezpůsobuje zvýšení teploty, nýbrž jen změnu skupenství z tuhého na kapalné nazýváme latentním teplem tání. Toto teplo se rovněž uvolňuje při tuhnutí kovů.



Obr. 2 – 3 Schéma krystalizace čistého kovu a slitiny

Molové teplo tání představuje množství tepelné energie, kterou potřebujeme k roztavení jednoho molu látky za stálé teploty. Oproti tomu měrné teplo tání vztahujeme na jeden gram látky. Souvislost mezi molovým teplem tání a měrným teplem vyjadřujeme rovnicí:

$$\Delta H_{tá}^0 = l_{tá} * M \quad (2.1)$$

kde značí: $\Delta H_{tá}^0$ – molové teplo tání,

$l_{tá}$ – měrné teplo tání,

M – molekulová hmotnost.

dále můžeme psát rovnici pro diferenciální kvocient:

$$\frac{dT}{dp} = \frac{T^* [V(l) - V(s)]}{\Delta H_{td}^0} \quad (2.2)$$

kde značí: $\frac{dT}{dp}$ – diferenciální kvocient udávající změnu teploty tání s tlakem,

T – teplotu tání,

$V(l) - V(s)$ – rozdíl molových objemů v kapalném a tuhém stavu,

ΔH_{td}^0 – molové teplo tání.

U většiny látek je objem v kapalném stavu větší než v tuhém stavu a proto také má diferenciální kvocient $\frac{dT}{dp}$, který udává změnu teploty tání s tlakem, kladnou hodnotu, proto teplota tání u většiny látek se vzrůstajícím tlakem roste. Vzhledem k malému rozdílu molových objemů látek v kapalném a tuhém stavu, je zvýšení nebo snížení teploty tání s tlakem samo o sobě poměrně malé.

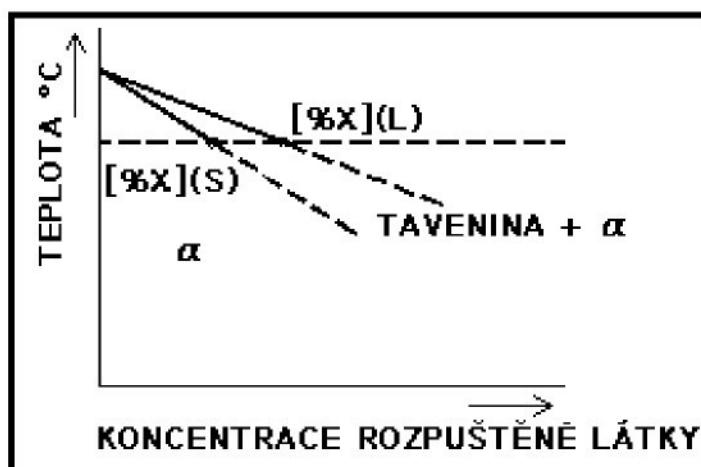
Teploty tání kovů se naopak výrazně mění s přítomností dalších prvků, přičemž jejich vliv závisí na jejich koncentraci, jejich atomové hmotnosti a jejich tendenci k odměšování a tuhnutí.

Tendenci jednotlivých prvků k odměšování vyjadřujeme rovnovážným rozdělovacím koeficientem k , který se při dané teplotě určuje pomocí rovnovážných stavových diagramů:

$$k = \frac{/%X/_s}{/%X/_l} \quad (2.3)$$

kde značí: $/%X/_s$ – koncentrace uvažovaného prvku na čáře solidu,

$/%X/_l$ – koncentrace uvažovaného prvku na čáře likvidu.

Obr. 2 - 4 Schéma rovnovážného diagramu pro $k < 1$

Tento vztah platí zcela přesně pouze při rovnovážných podmínkách. Čím nižší je hodnota rovnovážného rozdělovacího koeficientu tj. čím je větší rozdíl mezi koncentracemi prvku v tuhé a kapalně fázi, tím větší hodnotu má koeficient segregace a tím se ve větší míře odměšuje uvažovaný prvek v roztaveném kovu. V praxi se pro vyjádření tendence prvků k odměšování používá tzv. koeficient segregace $(1-k)$. Tavení látek je také spojeno se vzrůstem entropie, neboť se snižuje stupeň uspořádání jejich základních strukturních částic.

2.5 Krystalizace a chladnutí kovů

Většina technických kovů se vyrábí pyrometalurgickou technikou, což znamená, že v určitém stádiu výroby prochází kov kapalným stavem. Rovněž druhotné zpracování kovů slévarenskou technologií předpokládá ohřev kovů do oblasti tavenin. Výsledné vlastnosti takto zpracovávaných kovů závisí na řadě faktorů, z nichž nejdůležitější je krystalizace, což je přeměna kapalně fáze ve fázi tuhou. V důsledku přechodu kapalně fáze do fáze tuhé při krystalizaci kovů a jejich slitin vzniká průvodní jev - smršťování materiálu. Smršťováním se rozumí zmenšování objemu i rozměrů kovu vzhledem ke kapalně fázi (tavenině).

Jak již bylo řečeno krystalizace je fázová přeměna s růstem řízeným přenosem tepla. Její mechanismus je charakterizován vznikem stabilních

zárodků a jejich následným růstem. Základní podmínkou pro uskutečnění tohoto mechanismu je velké přechlazení taveniny. Krystalizace čistých kovů může probíhat formou:

a) Homogenní nukleace, což je proces, kdy v tavenině vznikají shluky atomů, které mají vzájemnou polohu, jaká odpovídá jejich krystalickému uspořádání. Tyto shluky se mohou rozpadat nebo se stabilizovat a dále růst. Stabilní zárodky vznikají tehdy, je-li jejich volná entalpie nižší než entalpie kapalného stavu, tedy je-li poloměr zárodku větší než poloměr kritický.

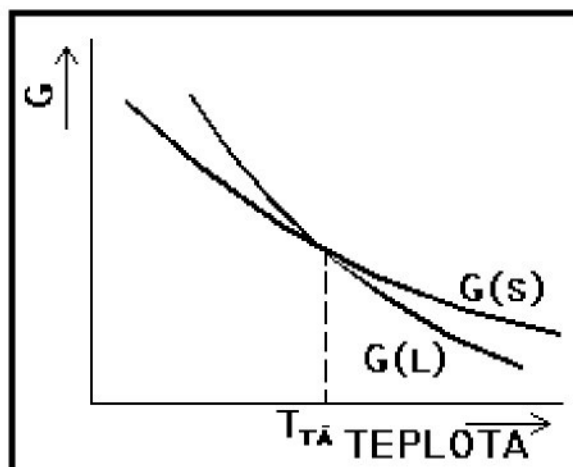
Homogenní nukleace při krystalizaci kovů probíhá pouze při extrémně velkém přechlazení taveniny. Za běžných podmínek probíhá v taveninách nukleace heterogenní,

b) Heterogenní nukleace je na rozdíl od homogenní iniciována přítomností cizích povrchů v tavenině jako jsou stěny formy, úlomky pecní vyzdívky, atd.. Je to tudíž proces energeticky výhodnější a změna volné entalpie spojená s tvorbou zárodku při heterogenní nukleaci je nižší než tatáž veličina při nukleaci homogenní. Heterogenní nukleace tedy usnadňuje proces krystalizace. U stěny formy dochází k nukleaci již při relativně malém přechlazení okolo $0,98 T_{td}$, zatímco homogenní potřebuje přechlazení $0,8 T_{td}$.

Jak již bylo popsáno výše po vytvoření stabilního zárodku jednou ze dvou možných forem nukleace je zárodek schopen dalšího růstu neboť jeho volná entalpie se snižuje s růstem jeho poloměru. Tento proces růstu je závislý na několika faktorech: velikosti přechlazení, difuzi, povrchovém napětí, atd..

Z obrázku 2 - 5, který znázorňuje teplotní závislost volné entalpie dané látky v kapalném a tuhém stavu vyplývá, že nad teplotou krystalizace T_{td} je tekutá fáze resp. tavenina oproti tuhé fázi stabilnější, zatím co při teplotách nižších je tomu naopak.

V tavenině, která dosáhla teploty krystalizace, případně určitého přechlazení, vznikají v určitých mikroobjemech podmínky pro vznik krystalizačních zárodků tuhé fáze.



Obr. 2 - 5 Teplotní závislost volné entalpie

Změnu volné entalpie soustavy při vzniku krystalizačních zárodků tuhé fáze v tavenině, jde-li o zárodek krychlového tvaru, lze vyjádřit rovnicí:

$$\Delta G = l^3 * \frac{\rho}{M} * (G_s^0 - G_L^0) + 6l^2 \sigma \quad (2.4)$$

kde značí: l – délka hrany krychlového krystalového zárodku,

ρ, M – hustota a molekulová hmotnost krystalového zárodku,

G_L^0 – molová volná entalpie taveniny,

G_s^0 – molová volná entalpie tuhé fáze,

σ – mezifázové napětí mezi krystalovým zárodkem a taveninou.

Kritickou velikost zárodku l_{krit} , jako délku hrany základní krychle lze odvodit:

$$l_{krit} = \frac{4\sigma T_{td}}{\Delta H_{td}^0 * (T_{td} - T_p)} * \frac{M}{\rho} \quad (2.5)$$

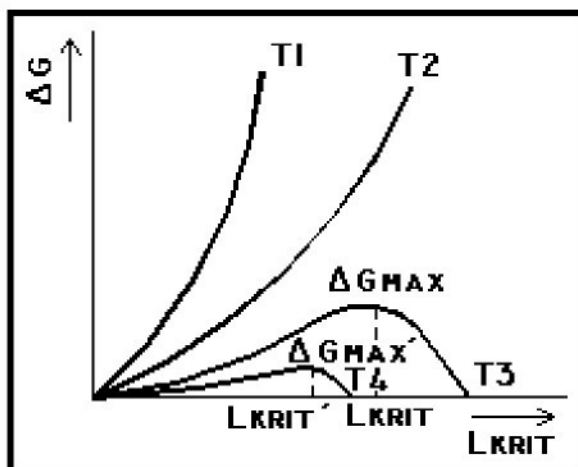
kde značí ΔH_{td}^0 – molové teplo tání,

T_{td} – teplota tání,

T_p – teplota přechlazení, přičemž $T_p < T_{td}$.

Z rovnice vyplývá, že při dané T_{ta} , ΔH_{ta}^0 , M a ρ bude kritický rozměr zárodku tím menší, čím větší bude přechlazení a čím bude menší mezifázové napětí.

Teoretickou teplotou krystalizace je teplota, při které je počet atomů přecházejících z taveniny na povrch zárodku roven počtu atomů přecházejících z povrchu zárodku do taveniny. Fázové rozhraní se v tomto stavu nepohybuje, je tedy v rovnovážném stacionárním stavu. Krystal může růst pouze do teploty, která je nižší než teoretická teplota krystalizace, protože pak je počet přeskoků atomů na povrch rostoucího krystalu větší. Tvar rostoucího krystalu je závislý na tepelných podmínkách v okolí fázového rozhraní. Obrázek 2 - 6 ukazuje potřebnou velikost zárodku tzv. kritickou, potřebnou k tomu aby zárodek při daném přechlazení nezanikl.



Obr. 2 - 6 Změna volné entalpie při vzniku krystalizačních zárodků v tavenině

Růst probíhá z tohoto hlediska buď za pozitivního nebo negativního teplotního gradientu taveniny. Uskutečňuje-li se růst podle pozitivního teplotního gradientu, je latentní teplo tuhnutí z rozhraní tuhá fáze - tavenina odváděno tuhým fází. Je-li teplotní gradient taveniny negativní, bude latentní teplo tuhnutí odváděno jak tuhým fází, tak taveninou.

Analýza tepelných podmínek na rozhraní tavenina - rostoucí krystal poskytuje informace o typu krystalizace (dendritická, celulární). U vícesložkových systémů závisí přechlazení nejen na teplotě, ale i na

chemickém složení. Typ krystalizace bude tedy záviset i na koncentraci přísad.

Proces růstu spočívá v připojování jednotlivých atomů z taveniny na povrch krystalu. Pro silové připoutání atomu je výhodné, když je povrch krystalu členitý.

Pro dosažení významně odlišné morfologie struktury a s tím spojené rozdíly v mechanických vlastnostech je možno dosáhnout tzv. řízenou krystalizací což je ovlivňování průběhu krystalizace.

Zjemnění struktury lze dosáhnout zvýšením rychlosti nukleace, tj. zvýšením počtu krystalizačních zárodků. Významný vliv na rychlost nukleace má rozsah přechlazení. Vysokého přechlazení dosáhneme zvýšením rychlosti ochlazování taveniny. Zvýšení počtu zárodků lze také získat pomocí přidávání přísad do taveniny tzv. očkování, které vytvoří cizí částice pro heterogenní nukleaci. Jinou, doposud málo používanou metodou zjemňování zrna je vibrace formy při krystalizaci, kdy účinek tlakových vln zmenšuje kritický rozměr zárodku. V neposlední řadě lze takto usměrňovat růst zrn.

2.6 Lineární a objemové změny tuhnutí odlitku

Objem kovu je při dané teplotě a tlaku konstantní. Při normálním tlaku je objem kovu funkcí teploty. Měřítkem přírůstku objemu na stupeň zvýšení teploty je koeficient objemové roztažnosti:

$$\gamma = \frac{1}{V_0} * \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2.6)$$

kde značí: γ – koeficient objemové roztažnosti [K^{-1}],

V_0 – počáteční objem [m^3],

ΔV – změna objemu [m^3],

ΔT – změna teploty [K].

Se stoupající teplotou se plynule zvětšuje objem kovových materiálů spolu s poklesem jejich hustoty. Při změně skupenství se objem mění

skokově s dalším plynulým přírůstkem v tekutém stavu. Fyzikální proces změny objemu při změně teploty je vratný proces, tj. objem, který se zvětšuje při ohřevu se při ochlazení vrátí do původní velikosti. Úbytek objemu při snížení teploty se nazývá smršťování, které lze rozdělit na smršťování

- a) v kapalném stavu,
- b) při změně skupenství,
- c) v tuhém stavu.

U slitin tuhnoucích při konstantní teplotě má závislost změny objemu na teplotě stejný průběh jako u čistých kovů. U slitin tuhnoucích v intervalu teplot nastává prudká změna objemu v intervalu mezi teplotami likvidu a solidu.

Smrštění odlitku vyrobeného z určité slitiny je odlišné od smrštění této slitiny, neboť smrštění slitiny je fyzikální vlastnost, kterou určuje fyzikální úbytek objemu při snížení teploty a smrštění odlitku je závislé jak na smrštění slitiny, tak na technologických podmínkách při výrobě odlitku, jako je teplota a čas lití, intenzita odvodu tepla a konstrukce odlitku. Změny objemu při smrštění odlitku charakterizuje technologický úbytek objemu.

Objemové změny při tuhnutí a chladnutí odlitku lze v souvislosti s teplotním intervalem rozdělit na:

- a) objemové změny v tekutém stavu tj. v intervalu teploty lití a teploty likvidu,
- b) objemové změny v intervalu tuhnutí tj. v intervalu teploty likvidu a teploty solidu,
- c) objemové (lineární) změny při chladnutí odlitku tj. v intervalu teplot mezi teplotou počátku lineárního smršťování a teplotou okolí.

Výsledkem těchto objemových změn je vznik dutin (staženin makroskopických a mikroskopických rozměrů) v odlitku, zmenšení rozměrů odlitku a vznik vnitřních pnutí v odlitku.

2.6.1 Smršťování v tekutém stavu

K tomuto smrštění dochází při chladnutí taveniny z teploty ukončení lití na teplotu likvidu. Objemové změny v tomto teplotním intervalu se projevují

poklesem hladiny taveniny vlivem gravitační síly, tj. zmenšením jednoho rozměru odlitku a to výšky hladiny. Tuto fázi smrštění v kapalném stavu charakterizuje úbytek objemu ΔV_L^I [m³]. Celá plocha hladiny klesá do té doby, dokud se na stěnách odlitku nevytvoří souvislá vrstva ztuhlého kovu až k povrchu hladiny. Od tohoto okamžiku se průřez klesající hladiny stále zužuje a roste rychlost klesání hladiny. V tomto okamžiku nastává úbytek objemu ΔV_L^{II} [m³]. Hodnota celkového smrštění v kapalném stavu pak bude:

$$\Delta V_L = \Delta V_L^I + \Delta V_L^{II} = \gamma_L * (T_{liti} - T_L) * V_0 \quad (2.7)$$

kde značí: V_0 – počáteční objem [m³],

γ_L – průměrná hodnota součinitele objemového smrštění taveniny v rozsahu teplot T_{liti} až T_L [K⁻¹].

Z tohoto vztahu vyplývá, že hodnota smrštění v kapalném stavu je přímo úměrná přehřátí taveniny nad teplotu likvidu a to znamená, že při výrobě odlitku lze hodnotu smrštění v kapalném stavu výrazně ovlivnit regulací teploty lití.

2.6.2 Smršťování v intervalu tuhnutí

Objemové změny při tuhnutí se projevují vznikem soustředěné staženiny, vnitrodendritické a mezidendritické pórovitosti. Rozdělení objemových změn mezi uvedené dutiny je odvislé od morfologie tuhnutí slitiny a od intenzity chladnutí odlitku.

Smrštění odlitku při tuhnutí začíná vznikem prvních tuhých částic z taveniny na stěnách formy a končí ztuhnutím poslední kapky taveniny v tepelné ose odlitku. Při tuhnutí taveniny se vyskytují všechny druhy objemových změn současně.

Při tuhnutí čistých kovů a slitin s nulovým intervalem tuhnutí, tj. při tuhnutí s plynulým postupem souvislého krystalizačního frontu, vzniká soustředěná staženina s objemem V_{st} [m³]. Staženina se začíná vytvářet

tehdy, když na celé ploše líce formy ztuhne souvislá vrstva kovu, uzavírající uvnitř taveninu. Od tohoto okamžiku plynule probíhá:

- zmenšení objemu taveniny uzavřené mezi stěnami odlitku o hodnotu ΔV_L^H [m³], což se projeví poklesem hladiny,
- zvětšení objemu tuhé fáze tzv. narůstáním a jeho postup k tepelné ose odlitku při současném zmenšení objemu o hodnotu ΔV_{L-S} [m³] při fázové přeměně:

$$\Delta V_{L-S} = \gamma_s * (T_L - T_s) * V_0 \quad (2.8)$$

kde značí: V_0 – počáteční objem [m³],

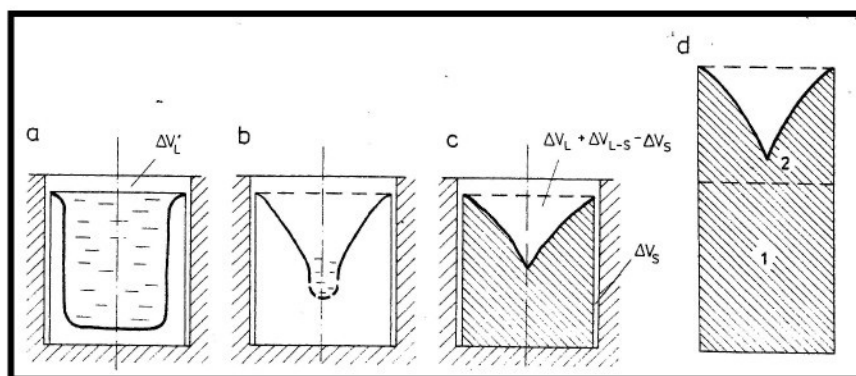
γ_s – průměrná hodnota součinitele objemového smrštění v intervalu teplot T_L až T_s [K⁻¹].

-zmenšení plochy klesající hladiny v důsledku postupu tuhé fáze k tepelné ose odlitku,

-smrštění ztuhlých částí při jejich ochlazování o hodnotu ΔV_s [m³], které se projevuje zmenšením lineárních rozměrů. Zmenšení lineárních rozměrů ovlivňuje rozměry vznikajících dutin tím, že se smršťující vrstva vtlačuje do taveniny a zvyšuje její hladinu.

Výsledek uvedených procesů je znázorněn na obrázku 2 - 7, ze kterého vyplývá celkový objem soustředěné staženiny:

$$V_{ST} = \Delta V_L^H + \Delta V_{L-S} - \Delta V_s \text{ [m}^3\text{]} \quad (2.9)$$



a) vytvoření souvislé tuhé vrstvy až k povrchu hladiny a začátek tvorby staženiny, b) pokles hladiny taveniny při soustavném zmenšování její plochy v důsledku růstu tuhé fáze, c) staženina ve ztuhlém odlitku, d) přemístění staženiny do nálitku.

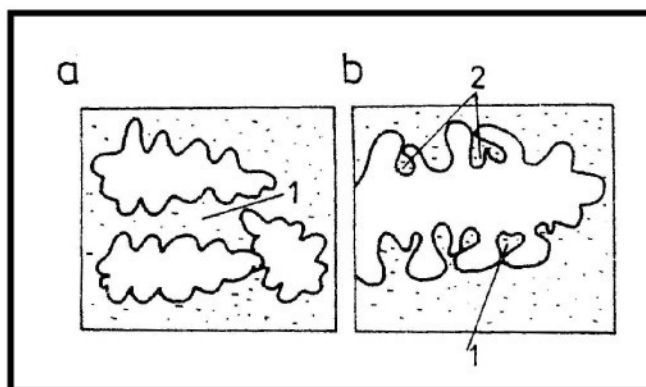
Obr. 2 – 7 Schéma etap smršťování odlitku [2]

Z porovnání vztahů (2.8) a (2.9) vyplývá, že objem soustředěné staženiny v odlitku je větší než úbytek objemu při změně skupenství ΔV_{L-S} [m³] a liší se o hodnotu ΔV_L^H [m³] a je menší o hodnotu ΔV_S [m³]. Úbytek objemu v odlitku V_{ST} se nahradí taveninou z nálitku, která se může lehce přemísťovat, protože je to volná a velmi pohyblivá tavenina.

Při tuhnutí slitiny s intervalem tuhnutí probíhají v podstatě ty samé procesy, ale úbytek objemu ΔV_{L-S} [m³] se rozděluje mezi soustředěnou staženinu V_{ST} , mezidendritickou pórovitost V_{MD} a vnitrodendritickou pórovitost V_{VD} . Tedy:

$$\Delta V_{L-S} = V_{ST} + V_{MD} + V_{VD} \text{ [m}^3\text{]} \quad (2.10)$$

Mezidendritické póry se vytvářejí při tuhnutí polostrůvku taveniny uzavřené mezi dendrity. Vnitrodendritické póry vznikají při tuhnutí ostrůvku taveniny mezi větvemi dentritu. Mají velmi malé rozměry, a protože síly přilnavosti taveniny při těchto rozměrech převyšují gravitační síly, nacházejí se v centrální části ostrůvku viz. obrázek 2 – 8.



a) schéma vzniku mezidendritického póru, b) schéma vzniku vnitrodendritického póru, 1) poloostřevky taveniny, 2) ostrůvek taveniny

Obr. 2 – 8 Schéma vzniku pórů [2]

Rozsah dendritické pórovitosti tj. hodnota V_D , je přímo závislá na šířce intervalu tuhnutí slitiny tzn. čím širší interval tuhnutí, tím větší je rozsah dendritické pórovitosti. Tato skutečnost souvisí se schopností slitiny nahradit úbytek vlastního objemu při tuhnutí, tj. je dána schopností taveniny přefiltrovat se přes svoje dvoufázové pásmo, protože pokud se mají kompenzovat ztráty objemu v době tuhnutí, musí se tavenina transportovat do nejhlubší části dvoufázového pásma, a to vždy k souvislému povrchu tuhé fáze. Zvýšením intenzity ochlazování je možno na začátku tuhnutí výrazně zmenšit dvoufázové pásmo, a tím rozsah dendritické pórovitosti.

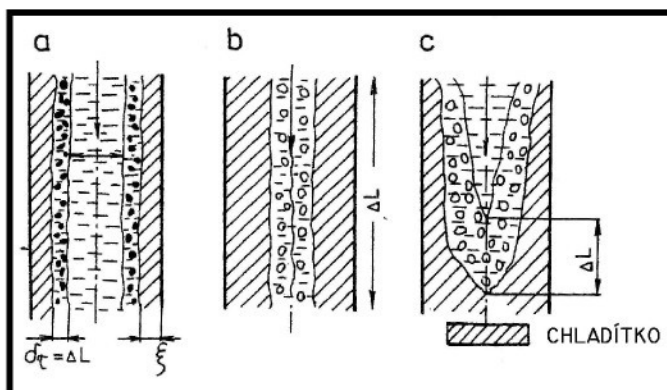
Vnitřní zdravost odlitku se hodnotí poměrem $\frac{V_{ST}}{\Delta V_{L-S}}$. Čím víc se tento

poměr blíží k 1, tím je větší zdravost odlitku. Tento způsob hodnocení má svůj smysl, neboť odstranění dendritické pórovitosti z odlitku (kompenzace objemu V_D), hlavně při objemovém tuhnutí, je těžší než kompenzace objemových ztrát V_{ST} , což souvisí se ztíženými podmínkami pro filtraci taveniny během tuhnutí τ_{3-4} . Přesun taveniny do dvoufázového pásma působením kapilárních sil je poměrně intenzivní, pokud existuje volná tavenina ve středu odlitku. K izosolidu filtruje tavenina přes relativně úzké dvoufázové pásmo, jehož šířka δ_r je v souladu s intervalem tuhnutí slitiny a s teplotním gradientem v odlitku, obrázek 2 – 9a. V průběhu třetí etapy tuhnutí postupně klesá hladina taveniny v centrální části odlitku, vytvářejíc

staženinu. Současně k izosolidu působením kapilárních sil postupuje tavenina, jejíž část se spotřebuje u izosolidu na kompenzaci ztrát objemu smrštěním. Proto se do centrální části odlitku vrátí vždy méně taveniny, než se předtím přesunulo k izosolidu.

Směr filtrace v této etapě (obrázek 2 – 9a) je protichůdný postupu tuhnutí. Rychlost filtrace je úměrná filtrační dráze ΔL , tj. tloušťce vertikálního pásma. Zvýšením intenzity ochlazování na začátku třetí etapy tuhnutí se zmenšuje ΔL , čímž se zvyšuje intenzita filtrace.

Podmínky zásobování dvoufázového pásma tekutým kovem se prudce mění po spojení izolikvidů v tepelné ose odlitku (obrázek 2 – 9b), ke kterému dochází v průběhu tuhnutí τ_{3-4} . Dvoufázové pásmo se vytvoří po celé délce odlitku, která je podstatně větší než tloušťka δ_τ . Hlavní směr filtrace taveniny je nyní rovnoběžný s tepelnou osou odlitku a tloušťka dvoufázového pásma z hlediska filtrace taveniny ztrácí svůj význam. Zvýšení intenzity ochlazování po dobu τ_{3-4} je nežádoucí, protože se zkracuje čas filtrace.



a) po dobu tuhnutí τ_3 (horizontální šipky znázorňují směr filtrace, vertikální šipky znázorňují směr dosazování kovu z nálitku, b) po dobu ukončení τ_3 a na začátku τ_4 (vertikální šipka znázorňuje směr filtrace), c) zkrácení filtrační dráhy ΔL při zvýšení usměrnenosti tuhnutí (vertikální šipka znázorňuje směr dosazování tuhnoucího odlitku taveninou).

Obr. 2 – 9 Změna filtrační dráhy ΔL v průběhu tuhnutí odlitku [2]

Šířka dvoufázového pásma po spojení izolikvidů v tepelné ose odlitku je hlavním zdrojem dendritické pórovitosti ve ztuhlém odlitku. Představu o postupu tuhnutí odlitku po spojení izolikvidů poskytuje schéma na obrázku 2

– 10 (str. 32), které je možno použít i při výpočtu šířky pórovitého pásma v odlitku podle vztahu:

$$\delta = X * \frac{\Delta T_{kr}}{T_L - T_{OP}} * \left(1 - \frac{1}{Bi}\right) * \frac{\rho_s - \rho_L}{\rho_L} \quad (2.11)$$

kde značí: δ – šířka pórovitého pásma [m],

X – polovina tloušťky stěny odlitku [m],

ΔT_{KR} – interval tuhnutí slitiny [K],

T_{OP} – teplota okolí [K],

ρ_s – hustota slitiny v tuhém stavu [kg.m⁻³],

ρ_L – hustota slitiny v tekutém stavu [kg.m⁻³],

Bi – Biotovo kritérium:

$$Bi = \frac{\alpha_{k-f}}{\lambda_f} * X \quad (2.12)$$

kde značí: α_{k-f} – součinitel přestupu tepla [W.m⁻².K⁻¹],

λ_f – tepelná vodivost formy [W.m⁻¹.K⁻¹].

Na obrázku 2 - 10, jsou křivkami 1,2,3 znázorněné teplotní gradienty v průřezu odlitku po ukončení třetí a po dobu čtvrté etapy tuhnutí. Křivka 4 znázorňuje průběh chladnutí odlitku po ztuhnutí poslední kapky taveniny.

Teplotní poměry ve stěně odlitku vyjádřené křivkou 1, odpovídají času, ve kterém se teplota taveniny v tepelné ose snížila na teplotu likvidu, a stěnu odlitku tvoří ztuhlá vrstva s tloušťkou ξ_1 a dvojité pásmo s tloušťkou δ_1 . Podíl tuhé fáze v dvoufázovém pásmu se zmenšuje směrem k tepelné ose odlitku. Dosazování tuhnoucí vrstvy se realizuje filtrací taveniny skrz vrstvu dvoufázového pásma vymezenou kolmicemi z průsečíku teploty začátku T_{zf} a teploty ukončení T_{kf} s křivkou 1. Teplotě T_{zf} odpovídá 30 až 40% tuhé fáze v dvoufázovém pásmu, teplotě T_{kf} odpovídá 70 až 80% tuhé fáze v dvoufázovém pásmu. S pokročením tuhnutí, kterému odpovídá křivka 2, se

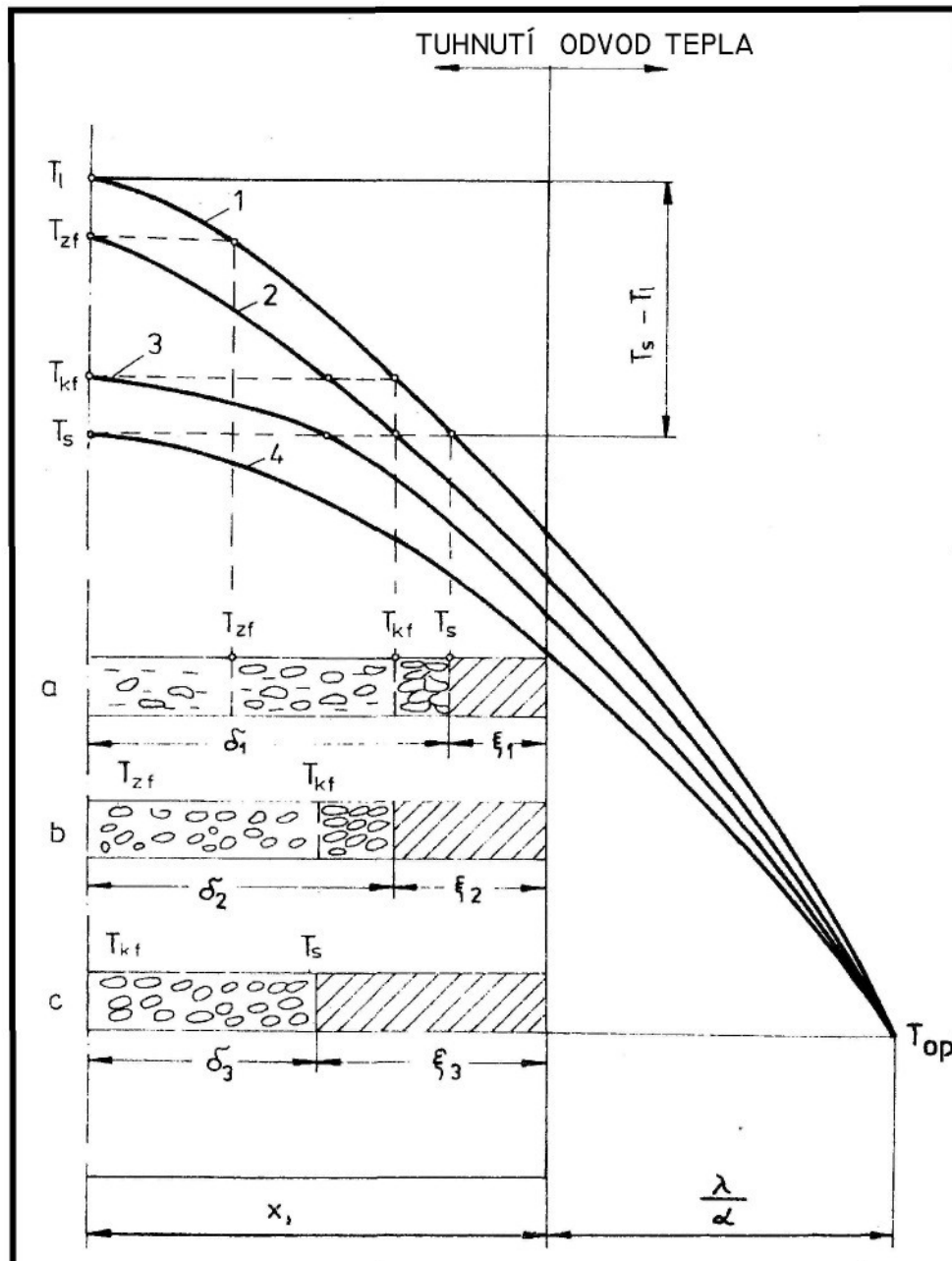
zvětšuje tloušťka ztuhlé vrstvy ξ_2 a též podíl tuhé fáze (na 30 až 40%) v dvoufázovém pásmu v blízkosti tepelné osy. (průsečík T_{zf} a křivky 2 je na tepelné ose odlitku). Filtrace ještě pokračuje, ale za velmi stížených podmínek. Pohyb taveniny se úplně zastaví při tepelném gradientu vyjádřeném křivkou 3. Teplotní interval $T_{zf} - T_S$ a křivka 3 vymezují tloušťku odlitku δ_3 , která ztuhne pórovitě.

Ve skutečnosti je šířka pórovitého pásma v odlitku užší, protože po dobu poklesu teploty z T_{zf} na T_{kf} ztuhne další vrstva zdravého kovu ve směru od stěny formy. Právě v tomto objemu ztuhne zdravě i vrstva odlitku vymezená intervalem $T_{kf} - T_S$. Proto se rozptýlená pórovitost obvykle projevuje v centrálních částech odlitku ve III. strukturní zóně. Při stejné intenzitě ochlazování je oblast zasažená pórovitostí tím větší, čím širší je interval tuhnutí slitiny.

Staženina po spojení izolikvidů už nezvětšuje svůj objem. Zbytková tavenina klesá mezi souvislou klostrou krystalů tvořících pevný povrch staženiny a vyplňuje jen blízké okolí pod ní. Proto je povrch staženin slitin tuhnuoucích v intervalu teplot drsný a tvoří ho předčasně obnažené dendrity.

Odlitky ze slitin s úzkým intervalem tuhnutí např. hliníkové bronzy, mosazi nebo siluminy se složením blízkým eutektickému, vytvářejí při tuhnutí soustředěné staženiny velkých rozměrů. Při tuhnutí těchto slitin v pískové slévárenské formě se vytváří jen úzké dvoufázové pásmo, ve kterém nevzniká dendritická pórovitost. Odlitek zde tuhne i od spodu při určitém stupni usměrněnosti. Objemové změny se kompenzují dosazováním taveniny (příp. velmi pohyblivé taveniny s malým podílem tuhé fáze) z nálitku.

Význam dvoufázového pásma se prohlubuje při objemovém tuhnutí, tj. při tuhnutí odlitku ze slitiny s širokým intervalem krystalizace např. cínové bronzy, slitiny typu Al-Mg, Al-Cu a Mg-Al. Objemové změny při tuhnutí odlitku z těchto slitin jsou dané staženinou malého rozměru a poměrně rozsáhlou



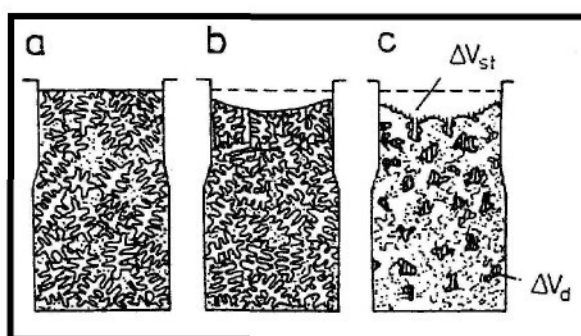
X- polovina tloušťky stěny odlitku, křivky 1,2,3- teplotní gradienty ve stěně odlitku ve třech po sobě jdoucích fázích tuhnutí odlitku, křivka 4 značí teplotní gradient v odlitku po ztuhnutí poslední kapky taveniny, T_L - teplota likvidu, T_{zf} a T_{kf} - teploty začátku a konce filtrace, T_s - teplota solidu, T_{op} - teplota okolního prostředí, δ - šířka pórovitého pásma, ξ - tloušťka ztuhlé vrstvy odlitku, λ - tepelná vodivost formy, α - součinitel přestupu tepla z odlitku do stěny formy, a,b,c- tloušťka stěny odlitku odpovídající teplotnímu gradientu znázorněnému křivkami 1,2,3.

Obr. 2 - 10 Schéma pro výpočet šířky pórovitého pásma v odlitku [2]

dendritickou pórovitostí. Je třeba uvést, že i při objemovém tuhnutí přesun taveniny filtrací ve třetí etapě tuhnutí stačí na pokrytí objemových ztrát ve

vnějších částech odlitku a tyto ztuhnou bez dendritické pórovitosti. Celý odlitek bude pórovitý, pokud se v okamžiku τ_{3-4} vytvořily podmínky, kterým odpovídá $\frac{\delta}{X} > 1$ (obrázek 2 – 9b).

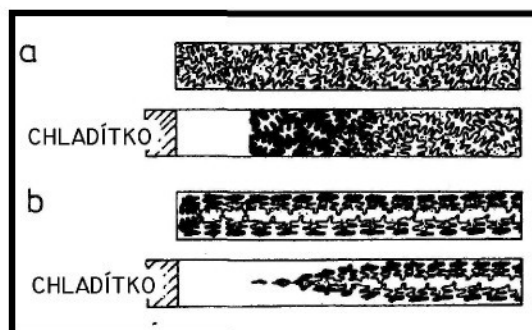
Nahrazování objemu V_D v tepelné ose odlitku pomocí nálitku při objemovém tuhnutí tudíž není účinné, neboť z nálitku se přemísťuje málo pohyblivá tavenina nebo dokonce tavenina kašovitá (obrázek 2 – 11).



a) vytvoření "kaše" v celém objemu, b) klesání "kaše" při tuhnutí

Obr. 2 – 11 Schéma objemového tuhnutí v třech po sobě jdoucích fázích [2]

Účinnějším způsobem potlačení rozsahu pórovitosti v odlitku je zvýšení stupně usměrněnosti tuhnutí. Na 2 – 9c je znázorněn velmi příznivý vliv kladně usměrněného tuhnutí hlavně při dosazování středních částí odlitku zkrácením délky filtrační dráhy ΔL . Často se používá i zvýšení příčného stupně usměrněnosti tuhnutí, viz obrázek 2 - 12.



a) objemové tuhnutí, b) dvojfázové tuhnutí

Obr. 2 – 12 Zvýšení příčného stupně usměrněnosti při tuhnutí [2]

Uvedený rozbor způsobu projevu objemových změn při tuhnutí odlitku se používá jako podklad pro určení velikosti nálitku. Náletek totiž plní svou funkci zásobníku tekutého kovu jen tehdy, pokud ztuhne později než odlitek a po dobu celého tuhnutí je schopný nahrazovat úbytek objemu v odlitku. Hospodárná výroba tudíž předpokládá použití nálitků takových velikostí, které při zabezpečení nahrazení objemových změn tuhnoucího odlitku mají po ztuhnutí stěnu s velmi malou tloušťkou. Účinnost nálitku lze podstatně zvýšit (a tím snížit jeho hmotnost) snížením intenzity jeho ochlazování např. použitím obalů nálitků s izolačními vlastnostmi nebo přímo použitím exotermických nálitků, doléváním kovu přes náletek apod.. Dalším velmi efektivním způsobem jak snížit hmotnost nálitku, je zvýšením stupně usměrněnosti tuhnutí čehož je možno dosáhnout např. vhodným zaústěním zářezů, polohou odlitku ve formě, použitím chladítek, apod..

V každém případě se má uskutečňovat tuhnutí odlitku směrem k nálitku.

2.6.3 Smršťování odlitku při ochlazování

Smrštění odlitku v tuhém stavu se projevuje především změnou rozměrů a proto se označuje jako lineární smrštění popř. tepelná dilatace. Pojem tepelná dilatace znamená souhrnnou změnu objemu (rozměrů) tuhé fáze v závislosti na teplotě, tj. při chladnutí a ohřevu. Praktický význam smrštění při ochlazování není menší než význam smrštění při tuhnutí, neboť určuje míru zmenšení odlitku oproti rozměrům formy a výrazně ovlivňuje velikost vnitřního napětí v odlitku.

Ke změně rozměrů odlitku při ochlazování dochází už v okamžiku vytvoření kostry s určitou pevností navzájem zaklíněných dendritů. Teplota, při níž se vytvoří tato kostra, se nachází v teplotním intervalu tuhnutí slitiny a je teplotou počátku lineárního smrštění T_{ZLS} . Po úplném ztuhnutí odlitku se plynule zmenšují jeho rozměry až do vychladnutí na teplotu okolního

prostředí. Dilatace odlitku bez působení odporů se nazývá volná tepelná dilatace. Volná objemová dilatace je dána vztahem:

$$\Delta V_V = \gamma_s * (T_{ZLS} - T_{OK}) * V_0 [\text{m}^3] \quad (2.13)$$

kde značí: γ_s – průměrná hodnota součinitele objemové dilatace materiálu v daném rozsahu teplot $[\text{K}^{-1}]$,
 V_0 – počáteční objem $[\text{m}^3]$.

a je spojena se změnou lineárních rozměrů přibližným vztahem:

$$\Delta V_V \cong 3\Delta l_V [\text{m}^3] \quad (2.14)$$

kde značí: Δl_V – hodnota úbytku rozměru odlitku $[\text{m}]$.

Rozměr odlitku l_V po jeho volném smrštění lze vyjádřit vztahem:

$$l_V = l_P - \Delta l_V = l_P - l_P * (T_{ZLS} - T_{OK}) [\text{m}] \quad (2.15)$$

dále lze psát vztah pro hodnotu relativní (poměrné) dilatace:

$$\varepsilon_V = \frac{l_P - l_V}{l_P} * 100 = \alpha * (T_{ZLS} - T_{OK}) * 100 [\%] \quad (2.16)$$

kde značí: l_P – počáteční rozměr odlitku při teplotě T_{ZLS} , který je roven rozměru slévárenské formy $[\text{m}]$,

l_V – rozměr odlitku po volné dilataci, tj. při teplotě T_{OK} což je teplota okolního prostředí,

α – průměrná hodnota součinitele volného délkového smrštění (volné dilatace) v intervalu teplot $T_{ZLS} - T_{OK} [\text{K}^{-1}]$.

Skutečný rozměr odlitku, tj. rozměr naměřený na odlitku těsně po jeho uvolnění z formy, je odlišný od hodnoty l_V , podle vztahu (2.15) a zpravidla je větší. Vysvětluje se to tím, že po vytvoření kostry dendritů určující geometrický tvar odlitku (tj. od T_{ZLS}), změna rozměrů odlitku probíhá při překonávání odporů působících proti smrštění. Smrštění odlitků při působení odporů je skutečné smrštění a označuje se jako bržděné smrštění nebo jako bržděná tepelná dilatace ε_B , přičemž $\varepsilon_B \neq \varepsilon_V$. Bržděné smršťování má za následek vznik vnitřních napětí v odlitku.

2.7 Obecné vlastnosti hliníku a jeho slitin

Hliník lze v dnešní době použít k řadě aplikací ve všemožných odvětvích průmyslu. Většinou se však nepoužívá čistý ale jeho slitiny. K masové aplikaci výrobků z hliníku vedlo především překonání úskalí jeho výroby z rud, které je zapříčiněno jeho příbuzností ke kyslíku. Celosvětová výroba oxidu hlinitého spotřebovává 90% vytěženého bauxitu, ze kterého se oxid hlinitý vyrábí především alkalickými metodami, které jsou energeticky náročné a navíc zatěžují životní prostředí, výtěžnost těchto metod je 1 tuna oxidu hlinitého na 6 tun bauxitu.

Hliník zaujímá v periodické soustavě prvků místo mezi hořčíkem a křemíkem. Počet valenčních elektronů je 3 což je rozhodující pro jeho fyzikální a chemické vlastnosti. Teplota tání čistého hliníku je 658°C a jeho hustota je 2698,9 kg.m⁻³ (při 20°C). Čistý hliník krystalizuje v krychlové prostorově středěné mřížce s těsným uspořádáním. Tato soustava má ve třech na sebe kolmých směrech stejnou tepelnou roztažnost. Objemový součinitel roztažnosti kovů je přibližně roven trojnásobku lineárního součinitele tepelné roztažnosti, který je závislý na teplotě.

Čistý hliník je výborným vodičem elektrického proudu jeho průměrná hodnota je 36,2 m.Ω⁻¹.mm⁻², ale přidáním legujících prvků, tepelným zpracováním nebo po tváření tato vodivost klesá. Poměr mezi elektrickou a tepelnou vodivostí je přibližně stejný. Z toho vyplývá že kovy s dobrou elektrickou vodivostí mají dobrou i vodivost tepelnou a totéž platí i pro hliník. Na tepelnou vodivost mají podobně jako na elektrickou vliv především

teplota, přítomnost cizích atomů v mřížce a tedy i struktura. Tepelná vodivost čistého hliníku při teplotě 20°C je v závislosti na jeho čistotě přibližně 234 W.m⁻¹. K⁻¹. Tepelná vodivost zvláště klesá jsou-li v základním kovu v tomto případě hliníku obsaženy atomy prvku, které vytvářejí se základním kovem tuhý roztok.

Je-li kovový materiál vystaven střídavému mechanickému namáhání, nastane po odstranění tohoto, utlumení kmitů na čemž se hlavně podílí vnitřní útlum. Toto tlumení je nezávislé na amplitudě, je však závislé na frekvenci. Na velikost vnitřního tlumení má vliv mnoho faktorů jako například čistota materiálu, chemické složení, teplota, atd.. Vnitřní útlum je nepřímo závislý na modulu pružnosti proto nejmenší útlum vykazují zušlechťené hliníkové slitiny pro slévárenské účely a pro tváření naopak největší útlum vykazuje čistý hliník. Střední hodnota modulu pružnosti u čistého hliníku a jeho slitin je 7.10³ MPa. Je však závislá jako ostatně všechny vlastnosti na různých podmínkách jako je například čistota, množství legujících prvků, teplota a velikost deformace za studena. Legující prvky a nečistoty s větším modulem pružnosti než hliník zvětšují modul pružnosti slitiny, tzn. že většina prvků s výjimkou např. hořčíku, cínu nebo olova jej zvětšuje. Vytváří-li některý prvek s hliníkem tuhý roztok, není vliv na modul pružnosti v tahu tak značný jako při heterogenním vyloučení. Mechanické vlastnosti hliníkových slitin používaných ve slévárenství jsou uvedeny v tabulce 2. 1. V tabulce 2. 2 jsou uvedeny mechanické vlastnosti pístových slitin, které jsou během používání namáhány při jiné teplotě než normální tj. při teplotě pracovní, která je u pístů spalovacích motorů vyšší než 200°C. Souhrnně lze říci, že zvýšením teploty se pevnost hliníkových materiálů sníží, tvárnost a

Tab. 2. 1 Informativní mechanické vlastnosti slévárenských hliníkových materiálů [3]

Typ materiálu	Norma materiálu	Stav	Re0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A0,2 [%]	HB [MPa]
AlSi12	42 4330	I	6-8	16-24	2-6	50-60
AlSi12Cu	42 4330	I	7-10	16-22	1-3	50-60
AlSi12Mg	42 4330	I	8-15	15-23	1-2	50-60
		z	18-26	20-30	1-2	60-100
AlSi5Cu	42 4380	I	9-15	15-22	0,5-2	60-70

		→	16-25	20-20	0,5-3	70-100
AlSiMg	42 4331	l	9-15	14-20	0,5-3	55-65
		z	15-25	16-26	0,5-4	70-100
AlMg3	42 4315	l	8-16	14-20	2-6	50-60
AlMg5	42 4315	l	9-10	16-25	1-4	55-75
AlMgSi	42 4315	l	9-15	13-20	1-4	50-60
		z	15-25	18-30	1-4	55-85
AlCu5Si	42 4357	l	11-16	15-20	0-2	65-85
AlCu4Ti	42 4357	l	18-22	25-35	4-10	80-100
		z	20-25	27-40	3-8	85-110

Označení: l- lité z- zušlechtěné

Tab. 2. 2 Mechanické vlastnosti pístových slitin [3]

Typ materiálu	Norma materiálu	Re0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A0,2 [%]	HB [MPa]
AlSi12NiCu	42 4336	14-19	16-21	0,5-1	100
AlCu4Ni2	42 4315	18-23	20-25	0,5-1	110
AlSi18CuNi		17-20	18-23	0,2-0,7	110
AlSi25CuNi		17-20	18-22	0-0,3	110

Odlito do kokil, v zušlechtěném stavu

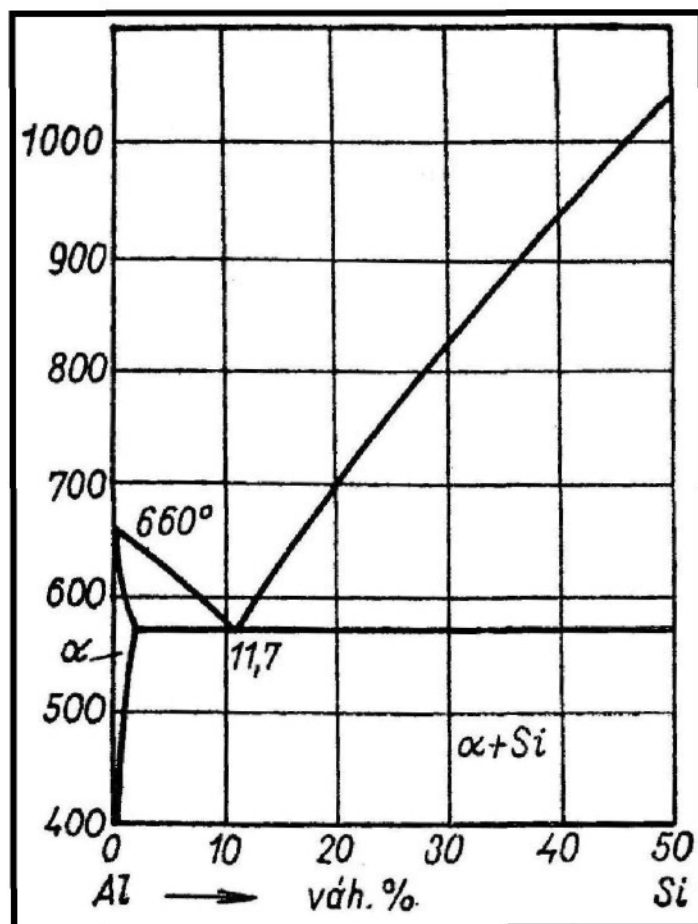
nárazová práce se zvýší. Pevnost pístových slitin s vysokým obsahem mědi a křemíku se do teploty 200°C podstatně nesnižuje. Při teplotě 250°C dosahuje asi 50 až 60% hodnoty odpovídající pokojové teplotě.

Hliník je kov slabě paramagnetický. Magnetická permeabilita hliníku je $1,000022 \text{ H.m}^{-1}$. Magnetické vlastnosti hliníku jsou tedy na intenzitě vnějšího pole téměř nezávislé, totéž platí i pro obsah železa do 2,4%. Na magnetické vlastnosti hliníku nemá významný vliv ani teplota nebo velikost deformace.

Korozní odolnost hliníku je vysoká a to především v atmosférických podmínkách, ale tato odolnost má řadu omezení. Při jejich překročení dochází k výrazné korozní degradaci hliníku. Hliník je kov neušlechtilý a proto při jeho korozi dochází k jeho anodické oxidaci. I když hliník jako čistý kov má vysokou korozní odolnost některé příměsi jako například: Co, Pt, Cr, Sn, atd. tuto odolnost snižují, protože jsou vůči hliníku katodou.

Technologické vlastnosti kovů tedy i hliníku v tomto případě slévatelnost je ovlivněna řadou vlastností, z nichž nejdůležitější je měrné teplo, skupenské teplo tání, tepelná vodivost, tepelná roztažnost, teplota

tavení, způsob tuhnutí, povrchové napětí, lící teplota kovu nebo slitiny, ale i druh a teplota formy, její tepelná vodivost a další vlastnosti. Obecně lze říci, že velmi dobrou slévateľnost vykazují ty kovové slitiny, které tuhnou při konstantní teplotě, tedy slitiny eutektické. Příkladem těchto slitin jsou slitiny hliníku a křemíku s obsahem křemíku 10 až 13 % tzv. siluminy.



Obr. 2 – 13 Rovnovážný diagram Al-Si [3]

Čistý hliník je sice dobře slévateľný, ale vzhledem k vysokému povrchovému napětí je špatná jeho zabíhavost. Pro lití pod tlakem jsou výhodné i slitiny s větším intervalem tuhnutí, neboť dobré vyplnění dutiny slévářenské formy je zde zajištěno vysokým tlakem při lití. Další podstatnou slévářenskou vlastností je tedy zabíhavost, která je jak již bylo řečeno, závislá nejen na vlastnostech použité slitiny ale i na lících podmínkách, vlastnostech formy, konstrukci formy a odlitku, atd.. Z hliníkových slitin mají

nejlepší zabíhavost slitiny s přibližně eutektickým složením jako například: AlSi12, AlSi10Mg nebo pístová slitina AlSi12CuNiMg. Dalšími technologickými vlastnostmi ovlivňujícími podstatně kvalitu odlitku jsou stahování a smršťování a s nimi související sklon k tvorbě trhlin a prasklin. Hliník a většina jeho slitin stahují více než jiné kovy. Opět jako u všech technologických vlastností nejméně stahují slitiny s přibližně eutektickým složením a větší objem staženin je u slitin s menším obsahem křemíku. Slitiny s malým intervalem tuhnutí mají sklon tvořit soustředěné staženiny a slitiny s velkým intervalem tuhnutí staženiny rozptýlené. Smršťování tj. rozměrové změny, ke kterým dochází po ztuhnutí odlitku je při odlévání do kokil menší než při odlévání do pískových slévárenských forem. Hodnoty smrštění u některých slitin hliníku jsou uvedeny v tabulce 2 . 3. Trhliny se tvoří jen v údobí intervalu tuhnutí tedy pokud existují současně dvě fáze tedy tuhá a tekutá. Praskliny vznikají za teplot podstatně nižších v důsledku vnitřního pnutí v odlitcích během chladnutí. Sклон ke vzniku trhlin je tím menší, čím menší je interval tuhnutí slitiny, proto čistý hliník a eutektické slitiny mají malý sklon k trhlinám. Dále zde má vliv jemnost zrna. Čím menší zrno, tím menší sklon ke tvorbě trhlin.

Tab. 2. 3 Směrné hodnoty smrštění odlitků [3]

Druh slitiny	Norma	Smrštění odlitků [%]		
		Lití do pískových forem	Lití do kokil	Lití pod tlakem
AlSi13	42 4330	1,00-1,15	0,5-0,8	0,4-0,6
AlSi10Mg	42 4331	1,00-1,10	0,5-0,8	0,4-0,6
AlSi7	42 4332	1,00-1,20	0,8-1,0	0,4-0,6
AlSi8Cu4	42 4338	1,00-1,20	0,8-1,0	-
AlSi5Cu2	42 4381	1,00-1,10	-	0,5-0,8
AlMg5	42 4515	1,00-1,50	0,8-1,3	0,5-0,7

Tab. 2. 4 Některé slévárenské vlastnosti hliníku [3]

Druh slitiny	Norma	Interval teplot tuhnutí [°C]	Hustota [kg*m]	Zabíhavost [mm]	Objem staženin [%]	Délkové smrštění [%]	Odolnost proti vzniku trhlin
AlSi13	42 4330	580-577	2650	510	3,0	0,80	velmi dobrá
AlSi125CuNiMg	42 4336	591-538	2660	500	4,3	0,80	velmi dobrá
AlSi10Mg	42 4331	601-569	2670	500	3,3	0,84	velmi dobrá
AlSi7	42 4332	620-577	2660	470	3,8	1,00	velmi dobrá
AlSi8Cu4	42 4338	590-530	2740	355	4,1	1,10	dobrá
AlSi5Cu2	42 4381	578-540	2740	405	4,9	1,08	dobrá
AlCu4Ni2Mg	42 4315	630-538	2810	235	5,3	1,40	malá
AlMg5	42 4515	641-579	2650	270	4,1	0,97	dobrá
AlMg11	42 4518	621-499	2580	260	4,9	1,30	malá

2.8 Vlastnosti slitin používaných pro odlévání pístů spalovacích motorů

V současné době se pro výrobu litých pístů spalovacích motorů používá dvou typů slitin Al-Si. Největší množství pístů se odlévá ze slitiny eutektické (podle ČSN 42 4336), modifikované až do nedávné doby sodíkem či jeho solemi. V poslední době se provádí též modifikace této slitiny fosforem (Nukleantem 10 nebo jinými preparáty na jeho základě). Dalším typem slitin, používaných zejména pro odlévání menších pístů, jsou slitiny nadeutektické, které se podle obsahu křemíku dělí na dvě skupiny:

- slitiny Al-Si 20;
- slitiny Al-Si 25.

Vlastnosti všech uvedených typů slitin musí odpovídat tomu, že jsou používány pro odlévání vysoce tepelně namáhaných pístů. Tyto vlastnosti lze zkusit např. takto: slitiny po roztavení v grafitovém kelímku a odplynění modifikovat hexachlorethanem. Slitiny eutektické přísadou 1% T3 sole při 760 °C a přísadou 0,5% Nukleantu 10 při téže teplotě. Nadeutektické slitiny přísadou 1% Nukleantu 10 při 810°C. Z odplyněné, modifikované slitiny se odlévají zkušební vzorky pro stanovení mechanických vlastností do kovové, hvězdicové kokily předehřáté na 220°C. Teplota lití se udržuje u eutektických slitin mezi 670 až 700°C a u nadeutektických mezi 760 až 800°C. Z odlitých vzorků se zhotoví krátké trhací tyče o průměru 10 mm na nichž se zkoumá vliv stárnutí na pevnost v tahu, mez kluzu, tažnost a kontrakce. Všechna

měření se provádí na slitinách tepelně nezpracovaných tj. ve stavu po odlití. Toto umožňuje porovnávat všechny zkoušené materiály při stejných podmínkách.

Výsledky těchto zkoušek ukazují, že mez pevnosti v tahu za normální teploty není o mnoho rozdílná u eutektické slitiny modifikované at' už sodíkem nebo fosforem. Slitiny nadeutektické vykazují menší pevnostní vlastnosti než slitiny eutektické. Při umělém stárnutí při teplotě 200°C se dosáhne zvýšení tvrdosti asi po 10 h, při 250°C dochází k poklesu tvrdosti až po 100 h a při 300°C je zpo čátku pokles tvrdosti razantní a později mírnější na což má vliv obsah hořčíku. V absolutním měřítku mají větší tvrdost eutektické slitiny modifikované fosforem než sodíkem a z nadeutektických slitin má nejvyšší tvrdost slitina Al-Si 25. Stabilita mechanických vlastností je sledována měřením tvrdosti, pevnosti v tahu, meze průtažnosti, tažnosti a kontrakce při normální teplotě po dlouhodobém ohřevu při pracovních teplotách hlavy pístu. Nejhorší stabilitu tvrdosti, při všech teplotách žhání vykazuje slitina Al-Si 20 s přísadou hořčíku pak následují eutektické slitiny modifikované fosforem a sodíkem. U pevnosti v tahu jsou výsledky obdobné.

Vzhledem k tomu, že písty spalovacích motorů pracují při vysokých teplotách, nelze uvažovat hodnoty naměřené při normálních teplotách za vypovídající. Proto je vhodné brát za směrodatné ty hodnoty, které byly naměřeny při teplotě 250°C, která je považována za průměrnou pracovní teplotu hlavy pístu.

2.9 Obecně o pístech spalovacích motorů

Písty do spalovacích motorů se vyrábějí ze slitin Al-Si s různým obsahem Si (cca 12-18 %) a dalších prvků v různém konstrukčním provedení (např. se zalitým ocelovým nosičem pístního kroužku, s chladicí dutinou vytvořenou rozpustným jádrem,...) podle požadovaného použití. Složení slitiny Al a výrobní technologie se tudíž liší v závislosti konkrétního použití pístu (písty pro dieselové motory v osobních automobilech, písty pro benzinové motory v osobních automobilech, písty pro dvoutaktní motory, písty pro nákladní automobily a pro další dopravní prostředky). Obecně je

odlévání pístů nejčastěji prováděno metodou gravitačního lití do kovových forem na licích strojích. Formy bývají ocelové s povrchovou úpravou nitridací funkčních ploch formy. Odlévaná slitina Al je modifikována a odplyněna. Dále se odlitky pístů jednostupňově či dvoustupňově tepelně zpracovávají (AlSi12NiCuMg: 1) Rozpouštěcí žíhání ($510\text{ }^{\circ}\text{C}/4 - 6\text{ hod.}$ voda ($80\text{ }^{\circ}\text{C}$)), 2) Umělé stárnutí ($230\text{ }^{\circ}\text{C}/6\text{ hod.}$ vzduch), 3) Stabilizací žíhání ($180\text{ }^{\circ}\text{C}/3 - 6\text{ hod.}$ vzduch)). Poté následuje velmi přesné opracování pístů obráběním na NC strojích s použitím vysokých řezných rychlostí.

Povrchová úprava pístů se dále provádí například eloxováním, fosfátováním, grafitovým kluzným lakem nebo kluzným lakem na bázi jiných prvků.



A) píst dvoutaktního spalovacího motoru z nadeutektické slitiny (18% Si, materiál KS 281.1), B) píst pro dieselový spalovací motor se zalitým nosičem pístního kroužku z eutektické slitiny (12% Si, materiál KS 1275), C) píst pro spalovací motor s přímým vstřikováním, D) píst zážehového spalovacího motoru z eutektické slitiny (12% Si, materiál KS 1275), E) píst pro kompresor z eutektické slitiny (12% Si, materiál KS 1275), F) píst dieselového spalovacího motoru se zalitým nosičem pístního kroužku z eutektické slitiny (12% Si, materiál KS 1295).

Obr. 2 - 14 Písty spalovacích motorů [7]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Cílem experimentální části této diplomové práce bylo na již navrženém zkušebním zařízení odlít odlitky jednoduchého tvaru válce z pístové slitiny AlSi12CuNiMg a při jejich tuhnutí a chladnutí sledovat jejich rozměrové změny.

Experimentální část práce byla rozdělena do několika oblastí:

- a) odlévání zkušebních vzorků do nepředehřáté kovové slévárenské formy o průměrech 40, 50 a 60 mm a sledování jejich rozměrových změn,
- b) odlévání zkušebních vzorků do na 200 °C předehřáté kovové slévárenské formy o průměrech 40, 50 a 60 mm a sledování jejich rozměrových změn. Teplota 200 °C byla zvolena záměrně, neboť na tuto teplotu se v praxi temperují slévárenské formy pro odlévání pístů spalovacích motorů,
- c) odlévání zkušebních vzorků do pískové slévárenské formy z CT směsi o průměrech 40, 50 a 60 mm a sledování jejich rozměrových změn. Tyto experimenty byly prováděny jako doplňující pro dosažení lepší vypovídající schopnosti této práce a pro porovnání dilatačních vlastností této slitiny v různých slévárenských formách,
- d) odlévání zkušebních vzorků do nepředehřáté kovové slévárenské formy o průměrech 40, 50 a 60 mm a sledování rozměrových změn slévárenské formy. Tato měření byla prováděna pro zjištění rozsahu ovlivnění rozměru slévárenské formy po nalití taveniny do její dutiny.

Všechny experimenty obsažené v této práci byly prováděny v dílnách a laboratořích Katedry strojírenské technologie TU v Liberci.

3.1 Podmínky při provádění experimentů

Celkem bylo pro účely této práce provedeno 24 experimentů, jejichž podmínky jsou uvedeny v tabulce 3.1 (str. 56). Podmínky experimentů byly ve všech případech totožné. Tedy složení vsázky, teplota a způsob tavení a teplota lití, jen se měnil materiál a průměr dutiny použité slévárenské formy. Teploty taveniny po natavení a před nalitím do dutiny slévárenské formy byly

měřeny a kontrolovány pomocí kontaktního digitálního teploměru GTH 1100 (Digital Thermometer, termočlánek NiCr-Ni, výrobce SRN). Po nalití taveniny do dutiny slévárenské formy bylo při dosažení teploty 500°C na měřícím termočlátku automaticky spuštěno měření, když teplota klesla na 100°C bylo měření ukončeno. Fotografie z průběhu měření je uvedena na obrázku 3-1.



Obr. 3 - 1 Pohled na měřící zařízení v průběhu měření

3.1.1 Charakteristika použitých slévárenských forem

Pro odlévání odlitků jednoduchého válcového tvaru byly použity kovové a z pískové CT směsi vyrobené slévárenské formy o průměrech 40, 50 a 60 mm. Kovové formy byly vyrobeny z litiny s lupínkovým grafitem a jejich temperace pro doplňující experimenty probíhala v elektrické odporové peci PEK-1 (výrobce PLR). Rozměry použitých slévárenských forem jsou uvedeny na obrázku 3-2, mění se pouze průměr dutiny formy, ostatní rozměry jsou stávající.

Tab. 3. 1 Tabulka naměřených a vypočítaných výsledků

Průměr [mm] a materiál formy	Teplota formy [°C]	Číslo experimentu	Součinitel teplotní smrštivosti v intervalu teplot [K ⁻¹]					Součinitel teplotní smrštivosti v intervalu teplot [K ⁻¹]			
			T _{kr} -100	T _{kr} -200	T _{kr} -300	T _{kr} -400	T _{kr} -500	100-200	200-300	300-400	400-500
Litina, Ø 40	20	1	6,551E-07	8,289E-07	1,128E-06	1,766E-06	4,058E-06	0,0000740	0,0000517	0,0000292	0,0000068
		2	4,56E-07	5,769E-07	7,852E-07	1,229E-06	2,825E-06	0,0000689	0,0000514	0,0000317	0,0000116
		3	4,193E-07	5,305E-07	7,22E-07	1,13E-06	2,597E-06	0,0000769	0,0000555	0,0000344	0,0000151
		4	4,665E-07	5,902E-07	8,032E-07	1,257E-06	2,89E-06	0,0000726	0,0000511	0,0000302	0,0000099
		5	6,237E-07	7,891E-07	1,074E-06	1,681E-06	3,864E-06	0,0000810	0,0000598	0,0000381	0,0000176
Litina, Ø 50	20	1	9,518E-07	1,204E-06	1,639E-06	2,565E-06	5,896E-06	0,0000561	0,0000180	0,0000026	0,0000150
		2	9,853E-07	1,247E-06	1,697E-06	2,655E-06	6,104E-06	0,0000612	0,0000408	0,0000210	0,0000042
		3	1,518E-06	1,92E-06	2,614E-06	4,09E-06	9,403E-06	0,0000676	0,0000465	0,0000261	0,0000072
		4	9,182E-07	1,162E-06	1,581E-06	2,475E-06	5,688E-06	0,0000831	0,0000610	0,0000382	0,0000133
		5	1,606E-06	2,032E-06	2,765E-06	4,328E-06	9,948E-06	0,0000642	0,0000456	0,0000272	0,0000094
Litina, Ø 60	20	1	9,119E-07	1,154E-06	1,57E-06	2,458E-06	5,649E-06	0,0000384	0,0000252	0,0000126	0,0000020
		2	2,058E-06	2,604E-06	3,544E-06	5,546E-06	1,275E-05	0,0000707	0,0000500	0,0000273	0,0000041
		3	4,123E-07	5,217E-07	7,1E-07	1,111E-06	2,554E-06	0,0000841	0,0000644	0,0000431	0,0000213
		4	2,46E-06	3,112E-06	4,236E-06	6,629E-06	1,524E-05	0,0000639	0,0000435	0,0000217	0,0000023
		5	2,547E-06	3,223E-06	4,386E-06	6,864E-06	1,578E-05	0,0000701	0,0000485	0,0000244	0,0000025
CT, Ø 40	20	1	6,394E-07	8,09E-07	1,101E-06	1,723E-06	3,961E-06	0,0000684	0,0000464	0,0000256	0,0000068
CT, Ø 50	20	1	2,348E-07	2,971E-07	4,043E-07	6,328E-07	1,455E-06	0,0000467	0,0000222	0,0000027	0,0000269
CT, Ø 60	20	1	2,568E-06	3,249E-06	4,422E-06	6,921E-06	1,591E-05	0,0000114	0,0000022	0,0000159	0,0000308
Litina, Ø 40	200	1	4,56E-07	5,769E-07	7,852E-07	1,229E-06	2,825E-06	0,0000721	0,0000563	0,0000309	0,0000094
Litina, Ø 50	200	1	9,56E-07	1,21E-06	1,646E-06	2,576E-06	5,922E-06	0,0000713	0,0000504	0,0000330	0,0000134
Litina, Ø 60	200	1	6,848E-07	8,665E-07	1,179E-06	1,846E-06	4,242E-06	0,0000246	0,0000053	0,0000048	0,0000074