



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**OPTIMALIZACE TECHNOLOGIE VÝROBY ODLITKŮ  
ZE SLITIN AL METODOU VYTAVITELNÉHO MODELU**  
OPTIMIZED MANUFACTURING OF ALUMINIUM CASTINGS BY USING LOST WAX  
TECHNOLOGY

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. IVAN TALANDA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.**

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Ivan Talanda

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

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

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

### **Optimalizace technologie výroby odlitků ze slitin Al metodou vytavitelného modelu**

v anglickém jazyce:

### **Optimized manufacturing of aluminium castings by using lost wax technology**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologie vytavitelného modelu je jednou z metod vhodných pro výrobu vysoce přesných odlitků, u kterých se předpokládá dosažení požadovaných úzkých rozměrových tolerancí konečného odlitku bez nutnosti dalšího obrábění. Jedná se o výrobu tvarově složitých odlitků "na hotovo", která ovšem vyžaduje precizní zvládnutí všech technologických fází, tj. zhotovení voskového modelu, skořepinové formy a následně i vlastního odlitku. Tematika této práce je součástí řešení vědecko-výzkumného projektu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje ALFA - TA01010766 "Výzkum a vývoj technologie výroby rozměrných, tenkostěnných a vysoce jakostních odlitků z Al slitin".

Cíle diplomové práce:

Optimalizace všech technologických fází při zhotovení vybraného odlitku metodou vytavitelného modelu se zaměřením na fázi první, tj. zhotovení dokonalého voskového modelu.



Seznam odborné literatury:

- [1] BEELEY, P.-R., SMART, R.-F. Investment Casting. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0 901716 66 9.
- [2] DOŠKÁŘ, J., GABRIEL, J., aj. Výroba přesných odlitků. Praha: SNTL, 1976. 315 s. DT 621.746.
- [3] CAMPBELL, J. Castings. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0-7506-1072.
- [4] HORÁČEK, M. Tradition, Present State and Perspectives of Foundry Industry. In: Proceedings of the World Technical Forum. Česká slévárenská společnost, Brno, 1.– 3.6.2009.
- [5] HORÁČEK, M., CILEČEK, J. Capabilities of Investment Casting Technology – Zmožnosti tehnologije precizijskega litja. Livarski Vestnik. Duben 2006, vol. 54, no. 4, p. 175-186. ISSN 0024-5135.
- [6] HORÁČEK, M., CILEČEK, J. Accurate and Complex NET-SHAPE Castings for Challenging Markets. Foundry Trade Journal. 2007, vol. 180, no. 3641, p. 32-35. ISSN 1758-9789.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 18.11.2010

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## Abstrakt

Cílem práce je vybrat nový modelový vosk pro slévárnu Fimes, a.s., jako náhradu za vosk stávající, již ne zcela vyhovující. Stávající vosková směs způsobovala problémy v technologickém procesu, které vedly ke zvýšené zmetkovitosti. Nová vosková směs má eliminovat stávající problémy a umožnit produkci rozměrných, tenkostěnných a vysoce jakostních odlitků. Důkladným zkouškám bylo podrobena několik vosků od předních světových výrobců. Vosky byly zkoušeny v laboratorních i poloprovozních podmínkách. Diplomová práce je řešena jako součást vědecko-výzkumného projektu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje ALFA - TA01010766: "Výzkum a vývoj technologie výroby rozměrných, tenkostěnných a vysoce jakostních odlitků z Al slitin".

## Klíčová slova

Přesné lití, technologie vytavitelného modelu, Blayson Olefines Ltd, Fimes a.s., modelový vosk, obsah plniva, obsah popelu, penetrace, DSC, statická zkouška ohybem, reologické vlastnosti, oscilace, viskozita, rozměrová analýza, bod tuhnutí, bod skápnutí, objemová roztažnost, zabíhavost.

## Abstract

Aim of this diploma thesis is to choose new pattern wax for Fimes a.s. foundry. New wax should substitute old not fully satisfactory pattern wax which caused problems in technological process resulting in increased number of rejects. New pattern wax should eliminate current problems and help foundry with producing large, thin-walled, high-quality castings. Numbers of pattern waxes supplied by world's leading wax manufacturers were subjected to laboratory tests and pilot study. This diploma thesis is part of project Alfa TA01010766: „Research and development of production technology large, thin and high quality castings of aluminium alloys “

## Key words

Investment casting, lost wax technology, Blayson Olefines Ltd, Fimes a.s., pattern wax, filler content, ash content, penetration, DSC, bend test, rheological properties, oscilation, viscosity, dimensional analysis, congealing point, drop melt point, volumetric expansion, fluidity.

## Bibliografická citace

TALANDA, I. Optimalizace technologie výroby odlitků ze slitin Al metodou vytavitelného modelu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 112 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc..

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma:

Optimalizace technologie výroby odlitků ze slitin Al metodou vytavitelného modelu

vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

30.5.2012

.....

Bc. Ivan Talanda

## **Poděkování**

Děkuji tímto prof. Ing. Milanu Horáčkovi, CSc za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Zahraniční stáž u firmy Blayson Olefines Ltd, kterou mi zajistil, byla neocenitelnou zkušeností jak z osobního, tak profesního hlediska.

Velký dík patří také panu Philu Hancockovi, který mi velkou měrou dopomohl k pochopení řešené problematiky.

Děkuji pracovníkům společnosti Fimes a.s. za pomoc s vypracováním experimentální části.

Děkuji rodině a přítelkyni za velkou podporu a trpělivost.

**Obsah**

Abstrakt .....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah .....	6
Úvod .....	8
1 Teoretická část.....	9
1.1 Technologie vytavitelného modelu .....	9
1.2 Druhy voskových směsí a jejich složení .....	11
1.3 Vlastnosti voskových směsí a jejich zkoušení.....	16
A. Bod skápnutí .....	17
B. Bod tuhnutí.....	17
C. Obsah plniva .....	18
D. Obsah popelu.....	18
E. Penetrace.....	19
F. Statická zkouška ohybem.....	19
G. Viskozita.....	21
H. Reologické vlastnosti – oscilace .....	22
I. Diferenční skenovací kalorimetrie.....	24
J. Rozměrová analýza – smrštění .....	25
K. Objemová roztažnost .....	26
L. Zkouška zabíhavosti.....	27
1.4 Rozměrová přesnost metody vytavitelného modelu.....	28
2 Experimentální část .....	32
2.1 Zkoušené vosky .....	32
2.2 Laboratorní zkoušení voskových směsí.....	33
2.2.1 Laboratorní zkoušky.....	33
A. Bod skápnutí .....	33
B. Bod tuhnutí .....	35
C. Obsah plniva .....	36
D. Obsah popelu.....	38
E. Penetrace .....	39
F. Statická zkouška ohybem.....	41
G. Viskozita .....	48
H. Reologické vlastnosti – oscilace.....	50

I. Diferenciální skenovací kalorimetrie .....	54
J. Rozměrová analýza – smrštění .....	57
K. Objemová roztažnost .....	59
L. Zkouška zabíhavosti .....	60
2.2.2 Vyhodnocení laboratorních zkoušek .....	61
2.3 Poloprovodní zkoušky – slévárna Fimes, a.s. ....	63
2.3.1 Poloprovodní zkoušky .....	63
A. Zkoušky na zkušebním tělese .....	63
B. Zkoušky na modelu odlitku .....	69
2.3.2 Vyhodnocení poloprovodních zkoušek .....	71
3 Závěr .....	72
Seznam použité literatury .....	74
Seznam obrázků .....	77
Seznam grafů .....	78
Seznam tabulek .....	79
Seznam použitých vzorců .....	79
Seznam příloh .....	79
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	80
Přílohy .....	80

## Úvod

Předložená diplomová práce se zabývá problematikou výroby odlitků ve firmě Fimes,a.s. se zaměřením na optimalizaci materiálů pro produkci voskových modelů.

Výroba vysoce jakostních, rozměrných, hliníkových odlitků pro letecký a kosmický průmysl, o kterou slévárna usiluje, s sebou přináší zvýšené nároky kladené na každý krok technologického procesu. Ve slévárně užívaná technologie vytavitelného modelu je ideálním nástrojem k produkci zmíněných vysoce jakostních odlitků.

Technologie se skládá z několika na sebe úzce navazujících kroků, bez jejichž dokonalého zvládnutí nelze očekávat kvalitní finální produkt.

Jedním z prvních kroků je výroba voskového modelu. Kvalitní vosková směs je tedy jedním ze základních stavebních kamenů celé technologie a její výběr nelze v žádném případě podcenit.

V současné době užívaná modelová směs byla dříve zvolena pro svou příznivou cenu a dobré technologické vlastnosti. Po několikaletém používání se však objevily komplikace s rozměrovou stálostí, variabilitou a s propadáním masivnějších částí voskových modelů.

Úkolem této diplomové práce je posoudit širokou škálu v současné době na trhu dostupných modelových vosků a navrhnout případného nástupce vosku stávajícího. Nová vosková směs by měla nést tyto znaky:

1. vyšší rozměrová stálost
2. menší rozměrová variabilita
3. menší propadání masivních částí modelů
4. nízký obsah popela
5. minimální praskání skořepin během vytavování

Zkoumané voskové směsi byly podrobeny důkladným laboratorním zkouškám. Na základě jejich výsledků byly následně vybrány nejvhodnější typy modelových směsí, které jsou v současnosti podrobovány testování v poloprovozních podmínkách slévárny. Na základě těchto testů pak nakonec bude vybrána optimální varianta kde kromě technologických vlastností bude do úvahy brána i otázka ekonomická.

V teoretické části je krátce popsána technologie vytavitelného modelu a také problematika dosahované rozměrové přesnosti konečných odlitků. Další část teoretického rozboru je zaměřena výhradně na voskové směsi, jejich složení, vlastnosti a také popis prováděných laboratorních zkoušek.

Experimentální část je rozdělena na laboratorní a poloprovozní zkoušky voskových směsí. Za každou kapitolou následuje shrnutí a analýza získaných výsledků.

Díličí výsledky diplomové práce již byly publikovány v rámci závěrečné zprávy vědecko-výzkumného projektu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje ALFA-TA01010766. Tato publikace je citována jako literární zdroj [27].

## 1 Teoretická část

### 1.1 Technologie vytavitelného modelu

#### Historie technologie vytavitelného modelu

Slévárství je bezesporu jednou z nejstarších technologií výroby kovových součástí pro nejrůznější účely. K nejstarším metodám patří i metoda vytavitelného modelu, která je, přes i svou velice dlouhou historii (zhruba 6000 let), jednou z nezastupitelných technologií výroby odlitků z železných i neželezných slitin. K nejspíše prvnímu užití této technologie došlo již ve starověké Mezopotámii. Metoda zůstala principiálně stejná až do dnešních dnů. Lití na vytavitelný model bylo v 19. století téměř zapomenuto. K „znovuobjevení“ došlo, jak už tomu často bývá, při vypuknutí válečného konfliktu (2. světové války). Od té doby byla technologie neustále zdokonalována v oblasti rozměrové přesnosti.

V posledních letech došlo ke zdokonalení modelových a obalových materiálů, keramických jader, popř. v oblasti usměrnění struktury odlitku. Mezi dnešní nejčastější zákazníky patří například letecký, zbrojní, elektrotechnický a lékařský průmysl [1,2].

#### Stručný popis technologie vytavitelného modelu

Cílem této technologie je zhotovit odlitek „téměř na hotovo“, což znamená minimum dalších operací prováděných na odlitku. Z minimálního počtu následujících operací vyplývá nutná vysoká jakost. Metoda se skládá z několika následujících kroků, bez jejichž perfektního zvládnutí nelze dosáhnout požadované vysoké jakosti.

1. Zhotovení matečné formy - matečné formy mohou být zhotoveny z různých materiálů. Obecně platí, že čím menší je sériovost výroby, tím mohou mít materiály nižší životnost a také cenu. Ve tvaru dutiny matečné formy musí být zachycen konečný tvar odlitku a částí vtokové soustavy. Pro malé série mohou být použity formy z gumy, silikonu, nízkotavitelných slitin nebo formy zhotovené metalizováním. Pro velké série jsou typické složité, několikadílné formy z Al-Cu slitin, zhotovené obráběním. Tyto formy jsou schopny vydržet 30 – 120 tisíc kusů zhotovených voskových modelů [1,3].
2. Zhotovení voskového modelu – voskový model může být zhotoven gravitačním litím vosku do matečné formy, plněním za zvýšeného tlaku (0,5–1 MPa) na plničkách (hovorově „pastovačkách“) nebo odstříknutím za vyššího tlaku (2,5–5 MPa) na tzv. „vstříkolisech“. Obecně platí, že čím nižší tlak plnění vosku do dutiny formy, tím vyšší je nutná teplota vosku. Před vpravením vosku do dutiny formy je nutné ošetřit její povrch dělicím přípravkem, aby bylo možné model snáze vyjmout. Po zatuhnutí voskového modelu je forma rozebrána a voskový model je ručně ohrotován od přetoků vosku do dělicích rovin formy. Hotový voskový model bývá většinou ponechán zhruba 24 hodin v klimatizované místnosti, kde dojde k jeho rozměrové stabilizaci [1,2].
3. Sestavení modelů do „stromečku“ – stabilizovaný, ohrotovaný voskový model je v tomto kroku připojen ke předem zhotovené vtokové soustavě. Připojení probíhá pomocí mírného natavení modelu v místě připojení vtokové soustavy a přitlačení ke vtokové soustavě. Vtoková soustava (nálevka, kůl a doplňovací soustava) bývá zhotovena stejně jako voskový model, jen je použit speciální vtokový vosk, případně alternativa v podobě použitého (regenerovaného) modelového vosku. Modely odlitku přilepené na



vtokovou soustavu spolu tvoří tzv. „stromeček“. Jeho tvar se odvíjí od ostatních částí technologie (obalování, vytavování, odlévání a apretace) [2,3].

4. Obalování modelů – sestavený a odmaštěný (od dělicího přípravku) stromeček je namočen do keramické břečky. Břečka je tvořena pojivem (hydrosoly, alkosoly) a plnivem (např. křemenná moučka). Následuje obalení v jemném posypovém písku sprchovým nebo fluidním způsobem, který zaručí dokonalou reprodukci povrchu modelu. Obalovým materiálem bývá nejčastěji křemenný písek nebo molochit. Na stromeček je postupně nanášeno několik vrstev obalového materiálu. Mezi každým obalem je skořepina sušena, čímž dojde ke zvýšení její pevnosti. Počet obalů se volí podle velikosti a složitosti odlitku. Běžné menší odlitky jsou obalovány 3×. Zrnitost posledních obalů (3. a následující) bývá větší z důvodu prodyšnosti skořepiny [2,3].
5. Vytavení vosku ze skořepiny – odstranění voskového modelu bývá prováděno v boilerklávu. Boilerkláv je tlaková nádoba, rozdělena na dvě části, přičemž v první se nachází vyvíječ páry a v druhé komora pro skořepiny. Po zavezení skořepin do komory je přepuštěna pára z vyvíječe do prostoru skořepin. Přepuštění musí ve skořepinách vyvolat tepelný šok. Dnešní špičkové boilerklávy jsou schopny vyvinout teplotu 165 °C a tlak 6 bar do 3 sekund. Teplota a tlak jsou poté dále zvyšovány na hodnoty 182 °C, 9,5 bar během 15 minut. Tepelný šok způsobí natavení malé vrstvy vosku a jeho proniknutí do primárního obalu, což je nutné k zamezení popraskání skořepiny v důsledku rozdílných roztažností voskového a keramického materiálu. Popraskání skořepiny způsobuje např. příliš velký počet obalů zamezující dostatečně rychlý přestup tepla do vosku nebo příliš málo porézní primární obal neumožňující „nasátí“ vosku skořepinou a uvolnění vzniklého napětí [4].
6. Žíhání skořepiny – před samotným odléváním musí být skořepina vyžíhána v žíhací peci. Důvodem žíhání je předejití popraskání skořepiny v důsledku tepelného šoku po odlití taveniny. Délka a teplotní průběh žíhání se odvíjí od použitých skořepinových materiálů a odlévaných slitin. Během žíhání dojde k přeměně amorfního křemičitého pojiva do stavu krystalického[2,3].
7. Odlévání – do vyžíhané skořepiny je nalita tavenina. Odlévání může probíhat jak na vzduchu, tak ve vakuu. Do skořepin na bázi křemíku je odléváno při teplotách 700–800 °C. Při odlévání může být skořepina tepelně izolována (Sibralem) nebo ochlazována (např. vzduchem) [2,3].
8. Ostatní operace – po zchladnutí a ztuhnutí odlitku je odstraněna keramická forma (vibračně, abrazivem, tlakovou vodou) a na kotoučové nebo pásové pile jsou odlitky odděleny od vtokové soustavy. Zbytky materiálu vtokové soustavy jsou z odlitky odstraněny na pásové brusce. Ke snadnému provedení řezání a broušení je nutný správný návrh vtokové soustavy. Po těchto operacích následuje tryskání kvůli optickému sjednocení povrchu a snazší kontrole jakosti odlitku [2,3].

## 1.2 Druhy voskových směsí a jejich složení

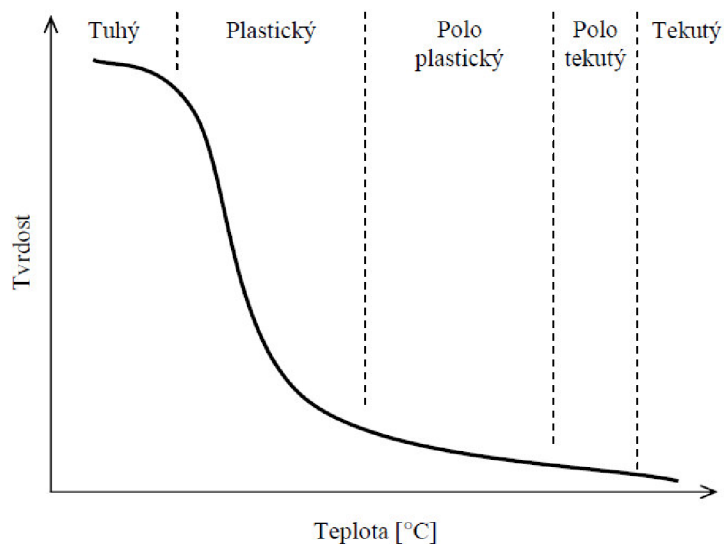
Dobrá znalost vlastností voskových směsí je základním předpokladem pro výrobu kvalitního odlitku metodou přesného lití. Nekvalitní voskový model znamená vždy vadný odlitek, a to i v případě, že zbytek technologického postupu byl bezchybný [1].

### Vliv mikrostruktury na vlastnosti směsi

Vosky pro užití ve slévárenství jsou ropnými produkty, které jsou charakterizovány délkou řetězců z uhlíkových atomů. Moderní voskové směsi se skládají z mnoha rozličných složek, jako jsou přírodní uhlovodíkové vosky, přírodní esterové vosky, syntetické vosky, přírodní a syntetické pryskyřice, organická plnidla a voda. Složitě složené voskových směsí vyplývá z potřeby splnit náročné požadavky na jejich vlastnosti. Jednotlivé složky upravují fyzikální a mechanické vlastnosti směsi, jako např. bod tání, tvrdost, viskozitu a objemové změny [1].

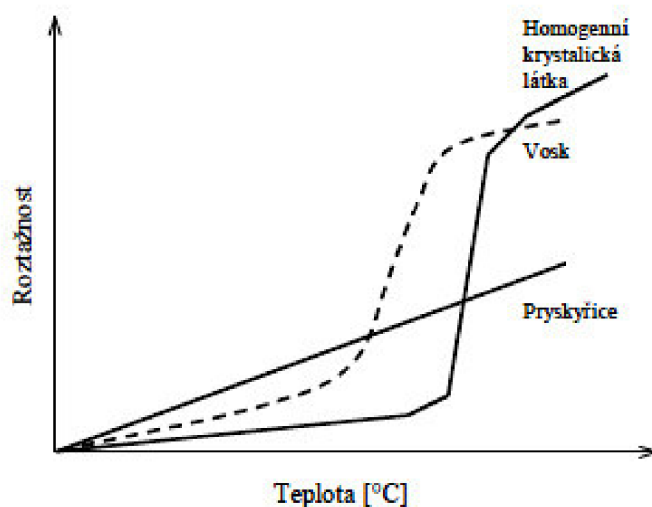
Vlastnosti jednotlivých složek vyplývají z jejich atomární struktury. Většina z užívaných vosků a pryskyřic má řetězovitou strukturu uhlíkových atomů, ale vyskytují se i struktury kruhové. Pro materiály s řetězovitou strukturou platí, že čím delší jsou atomární řetězce, tím je vyšší bod tání, bod tuhnutí a tvrdost. Délka řetězců taktéž ovlivňuje viskozitu a rozpustnost [1].

Když uvážíme kolik různých složek obsahuje běžně užívaná vosková směs, dojdeme k závěru, že chování těchto směsí je poměrně složitou záležitostí. Výsledná směs se chová jako heterogenní sloučenina, tedy nelze ji například charakterizovat jedinou hodnotou teploty tání. Příklad takového chování je následující graf 1.1 ukazující závislost mezi teplotou a tvrdostí. Se zvyšující se teplotou se mění struktura vosku z pevné fáze přes plastickou, poloplastickou, polotekutou na tekutou [1].



Graf 1.1 Závislost tvrdosti voskové směsi na teplotě [2]

Literární zdroj [1] uvádí, že vzhled mikrostruktury ovlivňuje i tepelnou roztažnost modelových směsí. Jejich roztažnost je, v porovnání s kovovými materiály větší, a v intervalu od 20 °C do bodu tání je závislost funkcí mikrostruktury. V následujícím grafu 1.2 jsou uvedeny průběhy roztažností jednotlivých materiálů, které bývají obsaženy v modelových směsích. Kombinací roztažností jednotlivých složek dostáváme výslednou roztažnost směsi.



Graf 1.2 Závislost roztažností složek směsi na teplotě [2]

Krystalická látka se vyznačuje relativně malým nárůstem objemu. Při dosažení bodu tavení náhle přechází do tekuté fáze, což doprovází prudký nárůst objemu. Nárůst objemu v tekuté fázi je opět poměrně malý [5].

Vosk s krátkými řetězci měkne již při nízkých teplotách a vyznačuje se postupným nárůstem objemu. V případě delších uhlíkových řetězců nabírá křivka strmější průběh a po dosažení tekuté fáze opět klesá [5].

Amorfní pryskyřice se chová odlišně. Při zahřívání se její objem zvětšuje poměrně málo. Zahřívání není doprovázeno žádným prudkým nárůstem objemu, proto se přidáním amorfních pryskyřic do voskové směsi může snížit její objemová roztažnost [5].

### Voskové směsi

Vosky pro přesné lití lze dělit podle různých hledisek. Nejčastěji je dělíme podle použití:

#### A. Vosky na modely

Jsou vosky určené primárně k výrobě voskových modelů. Vyznačují se dobrými vlastnostmi při vstřikování a lze je vstřikovat na všech typech vstřikolísů. Většina se dá rekonstituovat nebo regenerovat [6,7,8].

- **Neplněné (přímé) vosky**  
Díky svým vlastnostem jsou odjakživa používány právě pro výrobu modelů. Je možné je odstříkovat v širokém rozsahu teplot. Velkou předností je snadná regenerace a rekonstituce. Další výhodou je nízký obsah popela a vysoká kvalita povrchu modelu. Modely mohou trpět četným výskytem propadlin, kterým lze zabránit aplikací chlazení. Maximální vstřikovací teplota se pohybuje kolem 120 °C [6,9].
- **Emulzifikované vosky**  
Tyto vosky mají podobné vlastnosti jako neplněné vosky s rozdílem, že plnivem je voda nebo vzduch. Přítomnost těchto látek jako plniv snižuje výskyt propadlin a zároveň zvyšuje rozměrovou stabilitu vosků. Obsah plniv se pohybuje mezi 7–12 %. Voskové modely jsou zhotovovány na tzv. plničkách, vyznačují až sklovitě hladkým povrchem a snadným vyjímáním z matečné formy. Je zachován nízký obsah sazí. Maximální teploty plnění matečné formy se pohybují kolem 95 °C [10,6,7].

- **Plněné vosky**

Tento typ vosků patří mezi nejužívanější modelový vosk a ve slévárnách je, díky svým mechanickým vlastnostem, označován jako vosk tvrdý. Je vhodný zejména pro složité a tenkostěnné modely, které se zhotovují na tzv. vstříkolisech. Plnivem je organická látka v podobě prášku, nerozpustná v základním vosku. Dnešní plněné vosky obsahují 20–40 % plniva. Plnivo se projevuje zlepšením odolnosti vosku proti propadání povrchu a zvýšením rozměrové stability. Obsah sazí je udržen na nízké úrovni jako u předešlých vosků, a to díky skutečnosti, že po spálení organického plnidla nezůstane žádný popel. Literární zdroj [10] dále uvádí, že plnivo musí být velmi jemné, aby nešlo k zhrubnutí povrchu modelu. Aby nedocházelo v tekutém stavu směsi k oddělení plnidla od základního vosku, musí mít plnivo a základní vosk podobnou hustotu. Maximální vstříkovací teploty se pohybují kolem 120 °C [3,8,10].

#### B. Vosky na vtoky

Vosky na vtokovou soustavu mají téměř stejné složení jako neplněné vosky. Směs je upravena tak, aby měla vyšší pevnost a byla schopna unést váhu modelu. Na vtoky se používají i regenerované přímé modelové vosky [3,10].

#### C. Vodou rozpustné vosky

Jedná se o plněné vosky ze speciálních látek, které jsou rozpustné ve vodě nebo slabých kyselinách. Používají se převážně pro výrobu voskových vyplavitelných jader. Některé složky obsahují vlákna, která pomáhají předcházet praskání jader při odšťikování modelu. Poměrně dobře se odšťikují, mají dobrou rozměrovou stabilitu, malý sklon k propadání povrchu a lze je snadno vypláchnout z modelů. Teploty odšťikování se pohybují kolem 60 °C [10,11].

#### D. Speciální vosky

Jsou neplněné voskové směsi [12].

- **Namáčecí**

Jsou voskové směsi s nízkou viskozitou určené pro utěšňování škvír a spár, do kterých snadno zatečou [12].

- **Vosky na opravy**

Určeny k opravování poškozených modelů, zatěsnění vtokových soustav. Dále se dělí na měkké a tvrdé [12].

- **Vosky na lepení**

Užívají se převážně na slepování částí modelů a přilepování vtoků. Vyznačují se vysokou adhezí [12].

#### E. Regenerované a rekonstituované vosky

Jedná se o voskové směsi, které jsou pojmenovány podle procesu, kterým byly podrobeny. V průběhu technologie přesného lití dochází nutně k znehodnocení použité voskové směsi (směs ztrácí své potřebné technologické vlastnosti). Znehodnocená vosková směs může být použita znovu jen pokud projde procesem recyklace. Recyklací dochází k úplné nebo částečné obnově technologických vlastností, úspoře financí a zároveň k menšímu poškozování životního prostředí [13,14]. Recyklaci modelových voskových směsí dělíme na:

- **Regeneraci** – jednoduchý proces recyklace, kterým vzniká vosk vhodný na výrobu vtoků. Vosk je čištěn a základně filtrován. Pokud v regenerovaném vosku zůstane část plnidla, má regenerovaný modelový vosk lepší vlastnosti než vosk na vtoky [13,14].

- Rekonstituci - pokročilý proces recyklace, kterým vzniká vosk vhodný na výrobu modelů. Vosk je čištěn a důkladně filtrován. Následně jsou přidány nové složky, které zaručí původní požadované vlastnosti. U správně rekonstituovaného vosku jsou neměřitelné rozdíly v klíčových vlastnostech. Rozměrová přesnost modelů z rekonstituovaného a panenského vosku je téměř totožná [13,14].

### **Základní složky voskových směsí**

Parafín – patří mezi složky pro výrobu měkkých vosků a vyznačuje se křehkostí a nízkou pevností. Je vhodný pro výrobu modelů gravitačně nebo na plničkách. Teplota měknutí je zhruba 30 °C, k natavení dochází při teplotách do 64 °C. Obsah popela může být poměrně vysoký, až 0,1 %. Tvrdost se pohybuje v rozmezí 12–25 mm·0,1. Struktura je tvořena krátkými rovnými řetězci molekul uhlovodíku o délce 20–36 atomů uhlíku [2,15].

Mikrokrystalický vosk – má, na rozdíl od parafínu, větvené řetězce uhlovodíků o délce 31–50 atomů uhlíku. Struktura je tvořena mikrokrystalami, které jsou jemnější než u parafínu, což má za následek vyšší pevnost a ohebnost. Delší řetězce způsobují, že se taví až při teplotách 60–93 °C. Tvrdost se pohybuje v rozmezí 2–75 mm·0,1 [15,16].

Tvrde vosky – mohou být přírodní nebo modifikované uhlovodíkové směsi, vyznačující se nízkou viskozitou a bodem tuhnutí v rozmezí 65–120 °C. Jsou křehké a jejich tvrdost je nižší než 1 mm·0,1 [15].

Pryskyřice – jejich hlavní funkcí je ztekutit voskovou směs. Pryskyřice by měly být inertní, aby nedocházelo k jejich degradaci oxidací. Jsou tvořeny složitými přímými, rozvětvenými a kruhovými uhlíkovými řetězci. Rozeznáváme 3 druhy pryskyřic [2,15]:

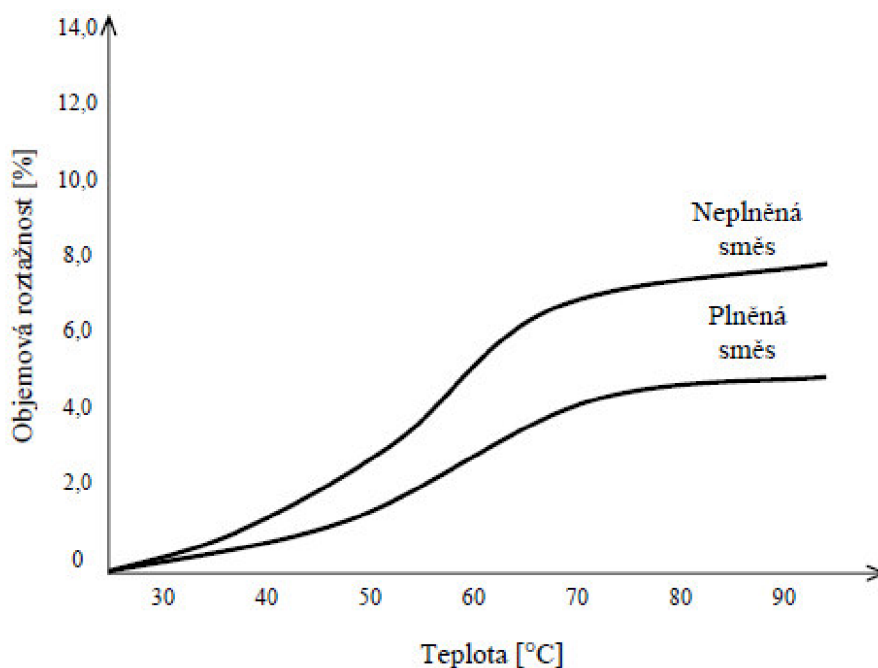
- uhlovodíkové pryskyřice:
  - bod měknutí se pohybuje od 18 do 176 °C
  - petrochemické produkty, jako např. hydrogenová, monomerová či aromatická pryskyřice
- syntetické pryskyřice:
  - bod měknutí se pohybuje od 25 do 190 °C
  - organické sloučeniny, jako např. polymerová nebo esterová pryskyřice
- přírodní pryskyřice:
  - bod měknutí se pohybuje od 80 do 180 °C
  - složité směsi organických složek, jako např. modifikované, hydrogenesterové či polyesterové pryskyřice

Polymery – zvyšují viskozitu, houževnatost a ovlivňují další fyzikální vlastnosti. Patří mezi inertní složky voskových směsí. Mezi nejčastěji používané patří etylén vinyl acetát (EVA). Bod tavení se pohybuje v rozmezí 50–200 °C, tvrdost mezi 5–50 mm·0,1. [2,15].

Plniva – primárním účelem plniv je snížit smrštění voskové směsi viz graf 1.3. Nižší smrštění znamená vznik menších nebo žádných staženin při tuhnutí vosku. Zároveň hrozí menší nebezpečí popraskání skořepiny při vytavování vosku v důsledku rozdílných roztažností obou materiálů. Plniva dnes slouží také ke zvýšení rozměrové stability, zvýšení mechanických vlastností a vylepšení chování při vstřikování. Nárůst obsahu plniva ve vosku vede ke zvýšení jeho viskozity (viz kapitola 1.3). Každé z plniv má své klady a

zápory a jejich volba závisí na požadavcích konkrétního procesu a způsobu regenerace. V současné době jsou veškerá používaná plniva inertní. Patří mezi ně [2,17,18]:

- Bisfenol A (BPA) je organická sloučenina, široce používaná ve spotřebním a potravinářském průmyslu. Jako plnivo do vosků je užíván řadu let. Vosk plněný BPA je velmi tekutý a může být vstřikován při nižších teplotách. Většinou je užíván ve voscích pro slévárny, které chtějí provádět regeneraci vlastními silami. Při zahřátí vosku nad 100 °C se BPA usazuje. Jeho hustota je  $1,20 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . V dnešní době se řeší otázka jeho zdravotní nezávadnosti [17].
- Zesíťovaný polystyren (XLPS) je tepelně stabilní organické plnivo, které se díky vynikajícím vlastnostem rozšířilo po celém světě. Díky nízké hustotě ( $1,07 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) se poměrně málo usazuje. Vosky s tímto plnivem vykazují velmi dobrou rozměrovou stálost a mohou být jednoduše regenerovány. Jeho nevýhodou je vysoká cena [17].
- Voda jako plnivo je velmi rozšířená. Její hlavní výhodou je snížení výskytu bublin ve voskových modelech a zvýšení kvality jeho povrchu. Vosk plněný vodou může být snadno regenerován a náklady na plnivo jsou velmi nízké. Za nevýhodu lze považovat nutnost kontroly teploty směsi. Příliš vysoká teplota by vedla k vypaření vody ze směsi a produkci neshodných modelů [17].
- Kyselá plniva, jako např. kyselina tereftalová a isoftalová, se vyznačují vysokou hustotou, do  $1,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Používají se často v kombinaci s výše zmíněným XLPS. Modely s tímto plnivem se vyznačují dobrým povrchem. Směsi mohou být regenerovány. Kyselá plniva mají silný sklon k usazování, proto musí být směs neustále dobře míchána. Jejich výhodou je nižší cena než u XLPS [17].



Graf 1.3 Vliv plniv na roztažnost voskových směsí [2]

### 1.3 Vlastnosti voskových směsí a jejich zkoušení

Účelem zjišťování vlastností voskových směsí je získání co největšího množství informací, na základě kterých je možné vybrat nejvhodnější modelovou směs. V [2] jsou uvedeny ideální vlastnosti voskových směsí následovně:

- Směs by měla mít minimální smrštění při chladnutí a minimální roztažnost při ohřevu.
- Během tuhnutí ve formě by měla získat dostatečnou pevnost a tvrdost z hlediska dalšího technologického zpracování - přitom by neměla být příliš křehká.
- Směs by měla co nejpřesněji reprodukovat stěny formy a neměla by se na ně lepit. Povrch by měl být čistý a hladký.
- Vosková směs by neměla chemicky reagovat s materiálem keramické břečky. Modelová hmota by měla odolávat oxidaci.
- Hotový model by měl mít vysokou smáčivost ve styku s keramickou břečkou.
- Směs by měla obsahovat minimum popela. Pokud ve skořepině zůstane, způsobuje vady odlitku – vměstky.
- Doba tuhnutí směsi v matečné formě by měla být minimální.
- Struktura směsi by měla být izomorfní.
- Směs by měla být co nejlehčí, aby se při dané pevnosti zabránilo deformacím vlivem vlastní hmotnosti.
- Směsi by měly být maximálně recyklovatelné a ve všech stavech zdravotně nezávadné [2].

V této kapitole jsou popsány jak základní, tak některé pokročilé druhy zkoušek. Zkoušení voskových směsí bylo dříve prováděno hlavně kvůli zaručení kvality voskových směsí. Mezi tyto zkoušky patří testy parametrů doporučených Britskou obchodní asociací pro přesné lití (BICTA) a zkoušky doporučené výrobcí [1,19]:

- bod skápnutí
- bod tuhnutí
- obsah popela
- obsah plniva
- penetrace
- viskozita

V dnešní době se výrobci snaží provádět i jiné testy, které by měly poskytnout informace o technologických vlastnostech. Mezi tyto testy patří například [1,20]:

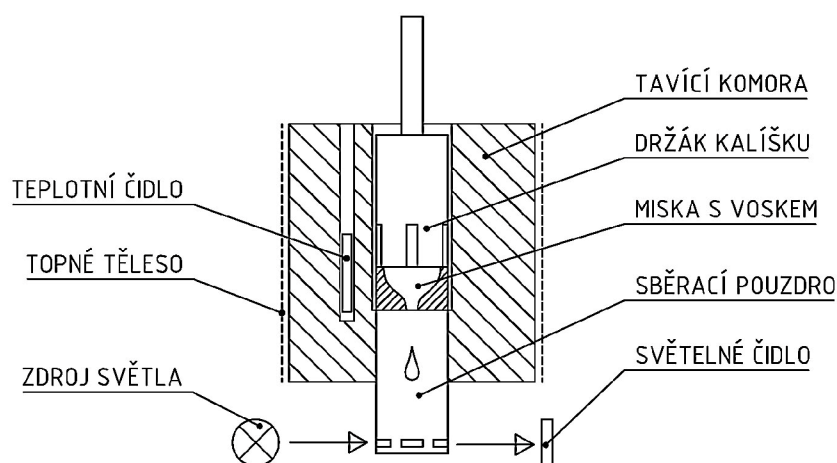
- mechanické vlastnosti – statická zkouška ohybem
- reologické vlastnosti – oscilace
- diferenční skenovací kalorimetrie (DSC)
- rozměrová analýza – smrštění
- objemová roztažnost
- zabíhavosti



### A. Bod skápnutí

Bod skápnutí je definován jako teplota, při které se skupenství vosku mění na kapalné. Zjištění bodu skápnutí je důležité zejména kvůli vytavování vosků ze skořepiny a kontrole kvality. Vosky s nižší teplotou skápnutí by se měly teoreticky začít tavit jako první. V praxi tomu tak vždy není, protože je třeba vzít v úvahu i celkové složení směsi a především obsah plniva [19,21].

Pro potřeby slévárenství se ujala především metoda určení podle Ubbelohde. Měřicí přístroje jsou v dnešní době plně automatické. Zkoušený voskový vzorek je roztaven a nalit do speciální misky. Po vychladnutí na okolní teplotu se založí mezi držák a sběrací pouzdro. Celá tato sestava se zasune do tavicí komory a obsluha spustí program, který řídí celý proces dále zcela automaticky. V komoře pozvolna narůstá teplota. Jakmile je dosažena teplota skápnutí, malým otvorem na dně misky začne kapat natavený vosk, který se soustředí na dně sběracího pouzdra a vytvoří optickou překážku pro paprsek světla, procházející štěrbinami u dna pouzdra. Přerušení paprsku je zaznamenáno světelným čidlem. Program vyhodnotí situaci a dá povel k odečtení teploty na teplotním čidle. Obsluha odečte údaj o teplotě skápnutí z přístroje [15,22]. Princip je dobře patrný z obrázku 1.1.



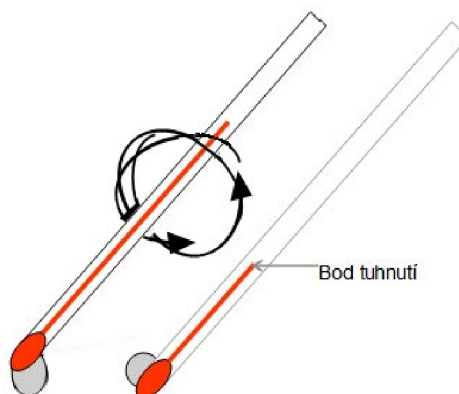
Obr. 1.1 Princip měření bodu skápnutí dle Ubbelohde [23]  
Poznámka: upraveno autorem práce.

### B. Bod tuhnutí

Bod tuhnutí je definován jako teplota, při které přestává natavený vosk téct pod vlivem gravitace. Jinak řečeno, je to teplota, při které se mění skupenství vosku na plastické. Tato teplota je důležitá pro nastavení vstřikování vosku do matečné formy. Pro tekuté skupenství se obvykle doporučuje nastavit teplotu vstřikování o 4 °C vyšší než je hodnota bodu tuhnutí. Pro dosažení skupenství podobného pastě se doporučuje teplotu snížit o 4 °C oproti bodu tuhnutí [21,24].

Bod tuhnutí lze měřit poměrně jednoduchým způsobem. Na špičku speciálního předeřhátého teploměru je nabrána kapka roztavené voskové směsi. Konec teploměru s kapkou vosku je vložen do předeřháté zkumavky, umístěné ve vodorovné poloze v laboratorním stojanu. Obsluha s teploměrem otáčí podél jeho osy rotace tak, aby kapka po špičce teploměru začala vlivem gravitace klouzat. Jakmile vosková kapka přilne k teploměru (přestane klouzat, ztuhne), je odečtena teplota tuhnutí. Předeřhátá zkumavka má zabránit rychlému poklesu teploty a zvýšit přesnost měření [15,22,24]. Průběh zkoušky je patrný z obrázku 1.2.





Obr. 1.2 Princip měření bodu tuhnutí[22]  
Poznámka: upraveno autorem práce.

### C. Obsah plniva

Určení obsahu plniva je důležité zejména kvůli jeho vlivu na vlastnosti voskové směsi. S rostoucím obsahem plniv obecně narůstá tvrdost, tuhost, viskozita, rozměrová stálost a klesá objemová roztažnost a mírně také kvalita povrchu. Obsah plniva z hlediska praxe prakticky nemá vliv na bod tuhnutí, bod tavení a obsah popela.

Pro určení obsahu pevného plniva ve směsi je třeba rozpustit veškeré voskové složky v rozpouštědle a plnivo odfiltrovat a zvážit. Z váhy zkoumaného množství vosku a váhy odfiltrovaného plniva je vypočítáno procentuelní zastoupení plniva ve voskové směsi. Jedná se tedy o metodu gravimetrickou.

Zcela jiným případem je plnivo – voda, jejíž obsah snižuje tvrdost, pevnost, maximální zatížení a drasticky pružnost. Pro určení obsahu vody je určen samostatný test, prováděný na analyzátoch vlhkosti. Test je založen na rozdílu váhy voskové směsi s obsaženou vodou a váhy s odstraněnou vodou (vypařenou) [18,25].

### D. Obsah popela

Je definován jako procentuelní zastoupení nespalitelných anorganických látek, obsažených ve voskové směsi. Maximální obsah popela pro účely přesného lití byl stanoven Britskou obchodní asociací pro přesné lití (BICTA) na 0,05 %, jiné zdroje [24] uvádí hodnotu 0,03 %. Popel v panenských voscích může pocházet z plniv či voskových složek, ale obecně je ho velmi málo. U rekonstituovaných vosků je obsah popela poměrně nízký díky důkladné filtraci. Regenerované vosky mívají obsah popela vyšší než rekonstituované[1].

Pokud je ve vosku příliš mnoho popela, může při vytavování ulpět na stěně skořepiny. Po odlití odlitku se popel projeví jako vměstek. Analýzou složení popela v použitém vosku [22] bylo zjištěno, že je popel složen prakticky výhradně z oxidů, nejčastěji křemíku. Jak je známo, oxidy patří mezi nejlepší nukleační zárodky pro tvorbu plynových bublin v hliníkových slitinách [26].

Obsah popela se určuje gravimetrickou analýzou. Výpočet vychází z váhy voskového vzorku před a po spálení ve speciální peci [24].

### E. Penetrace

Je definována jako vzdálenost, kterou pronikne jehla definovaných rozměrů vertikálním směrem pod povrch voskového vzorku při dané teplotě, velikosti zatížení a délce trvání zatížení. Penetrace je udávána v desetinách milimetru a má význam tvrdosti vosku. Čím je penetrace menší, tím je vosk tvrdší. Tvrdší vosky jsou zároveň tužší a rozměrově stabilnější. Měkčí vosky mohou být snadno zdeformovány [15,22,24]. V literárním zdroji [21] je uvedeno, že vosky s větší penetrací se obtížněji řezou (hrotují).

Měření probíhá na penetrometrech, robustních zařízeních, která jsou vybavena stolem, jehlou, stupnicí, závažím a mechanismem pro zatížení jehly. Voskový vzorek o dané teplotě je položen na stůl penetrometru. Jehla je přiblížena k voskovému vzorku tak, aby se právě dotýkala jeho povrchu. Obsluha na definovanou dobu zmáčkne tlačítko ovládající mechanismus, ten uvolní závaží, které začne přes dřík vtlačovat jehlu do vzorku. Současně mechanismus ovládá ručičku ukazatele. Po uvolnění tlačítka je ze stupnice odečtena hodnota penetrace [27]. Penetrometr je na obrázku 1.3.



Obr. 1.3 Penetrometr [27]

### F. Statická zkouška ohybem

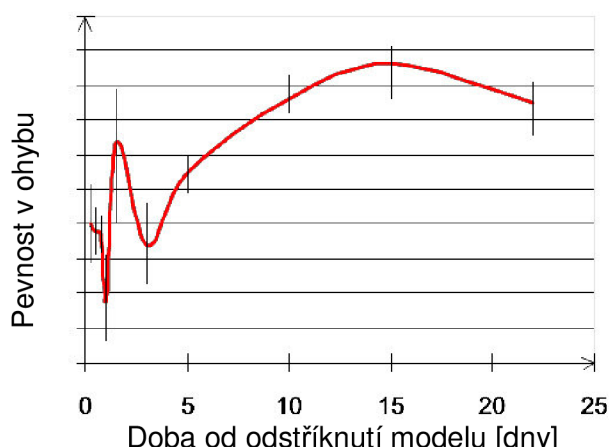
Měření mechanických vlastností je důležité pro určení chování voskového modelu během manipulace s ním (vyjímání z matečné formy, sestavování do stromečku, obalování), má tedy velký význam přímo pro technologický proces.

Voskový model by měl být dostatečně pevný, aby u něj nedocházelo k praskání a tuhý, aby nedocházelo k deformaci. Deformace vede ke vzniku rozměrových odchylek. Velmi tvrdé vosky mají sklon ke křehkému chování, což může způsobovat problémy při vyjímání modelu z matečné formy. U měkkých vosků praskání příliš nehrozí, nicméně může dojít k jejich deformaci, která se projeví na odlitku. Vosky na vtoky by měly být schopny snášet vyšší mechanické zatížení, zejména ve slévárnách, kde je uplatněna automatizační a manipulační technika (namáčecí linky, obalovací roboti).

Vosky při namáhání na trojbodový ohyb vykazují elastické chování, následované plastickou deformací a náhlým lomem. Obecně je lze považovat za křehké materiály.

Neplněné vosky jsou převážně flexibilní, s nižší pevností, přičemž různé typy základních vosků mají různé mechanické vlastnosti. S rostoucím obsahem tuhého plniva roste pevnost a rozměrová stabilita, klesá flexibilita [24,18,28].

Mechanické vlastnosti ovlivňují i parametry nastavení vstříkolisu. Pevnost poměrně výrazně roste se vstříkovací teplotou. Vysoká teplota formy má na pevnost negativní vliv. Mírné nárůsty pevnosti jsou doprovázeny u navýšení doby a průtoku vstříkování. Složitější je závislost pevnosti na stáří odstříknutého modelu viz graf 1.4 [22].



Graf. 1.4 Pevnost vosku v ohybu v závislosti na stáří modelu [22]  
Poznámka: upraveno autorem práce.

Mechanické vlastnosti voskových směsí se většinou určují při statické zkoušce na trojbodový ohyb, protože vosk patří mezi křehké materiály. Zkušební tyče bývají různých rozměrů, zhotovené jako ručně odlité (obrázek 1.5) nebo vstříkované. Zkušební tyčky jsou před testem temperovány po stanovenou dobu ve vodní lázni. Zkušební podpory jsou nastaveny do předepsané vzdálenosti. Po vložení vzorku na podpory je spuštěn program, podle kterého zařízení (obrázek 1.4) provede zatěžování vzorku. Program zastaví měření, jakmile zaregistruje zlomení vzorku nebo dosáhne předepsané maximální hodnoty průhybu. Z naměřených údajů o zatížení a deformaci, a údajů o rozměrech zkušební tyčky (obrázek 2.11) jsou přístrojem dopočítány ostatní veličiny, mezi které patří [21,28,29] :

- Maximální zatížení [N] – měřená veličina – maximální síla, které dokáže vosk odolat před porušením.
- Maximální průhyb [mm] – měřená veličina – maximální průhyb, kterému dokáže vosk odolat před porušením. Příliš malý průhyb značí sklon vosku k lámání. Příliš velký znamená snadnou deformaci vosku, a tedy náchylnost na deformaci při manipulaci.
- Modul pružnosti v tahu z deformace ohybem [MPa] – je konstantou úměrnosti mezi napětím a deformací, nebo-li je ukazatelem míry stoupání křivky závislosti napětí – deformace. Vosky s nízkou hodnotou modulu se snadno deformují. Větší modul znamená, že materiál dosáhne stejné deformace až při vyšším zatížení než, je tomu u materiálu s modulem nižším. V literárním zdroji [29] je pro výpočet modulu obdélníkového průřezu uveden vztah:

$$E_{ohyb} = \frac{F \cdot L^3}{4 \cdot a \cdot b^3 \cdot d} \quad (1.1)$$

Kde:  $E_{ohyb}$  ..... modul pružnosti v tahu z deformace ohybem [MPa]  
 $F$  ..... maximální zatížení [N]  
 $L$  ..... vzdálenost podpor [mm]  
 $a$  ..... šířka vzorku (rozměr kolmý k zatížení) [mm]  
 $b$  ..... výška vzorku (rozměr rovnoběžný se zatížením) [mm]  
 $d$  ..... průhyb vzorku [mm]

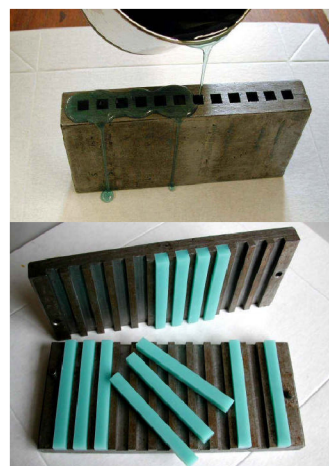
- Smluvní pevnost v ohybu [MPa] – ukazatel pevnosti vosku. Vyšší hodnota značí pevnější vosk. Vysoká hodnota ovšem může být způsobená deformací vosku. V literárních zdrojích [29,30] je pro výpočet smluvní pevnosti obdélníkového průřezu uveden vztah:

$$R_{mo} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot a \cdot b^2} \quad (1.2)$$

Kde:  $R_{mo}$ ..... smluvní mez pevnosti v ohybu [MPa]  
 F ..... maximální zatížení [N]  
 L..... vzdálenost podpor [mm]  
 a..... šířka vzorku (rozměr kolmý k zatížení) [mm]  
 b..... výška vzorku (rozměr rovnoběžný se zatížením) [mm]



Obr. 1.4 Zatěžovací stroj  
Lloyd Instruments LRX [30]



Obr. 1.5 Forma na  
zhotovení odlévaných  
zkušebních vzorků [30]

## G. Viskozita

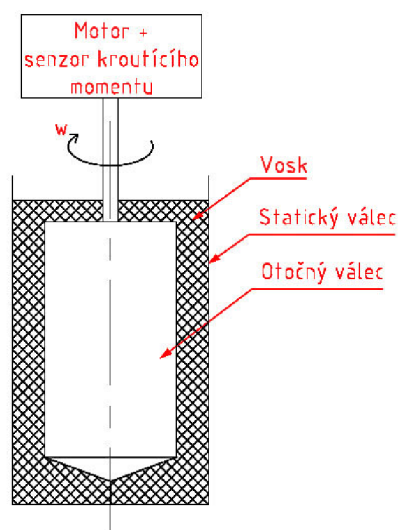
Viskozita charakterizuje tečení vosku, je mírou toho jak se kapalina brání tečení. Jinými slovy nám říká, jak je vosková směs „hustá“ nebo „řidká“. Jak bylo zmíněno, vosky se do matečné formy vstříkují v blízkosti bodu tuhnutí, proto se obvykle zjišťuje viskozita právě při této teplotě. Naměřená hodnota dává dobrou představu o tom, jak bude vosk při vstříkávání a vytavování „tekutý“. V [1] je uvedeno, že více viskózní vosky mohou způsobovat praskání skořepiny při vytavování. Praskání je způsobeno faktem, že více viskózní natavená směs nemá tak dobrou schopnost proniknutí do primárního obalu skořepiny, čímž nedojde k dostatečnému poklesu tlaku vosku na skořepinu a skořepina praskne. Zmíněný jev se nazývá „zaslepení“ (z anglického „bliding“).

Pro produkci tenkostěnných voskových modelů je podle [1,22] vhodnější méně viskózní vosková směs, protože je schopna lépe zatéct do úzkých částí matečné formy. Na druhou stranu jsou málo viskózní vosky náchylné k tvorbě vad, jako čar tečení a uzavírání vzduchu. Pro modely s většími průřezy stěn jsou vhodnější více viskózní směsi, protože u

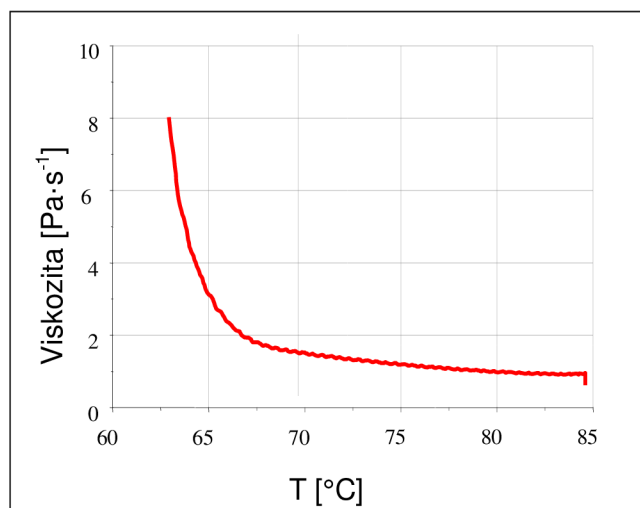


nich nedochází k víření při vstřikování. U viskózních směsí může dojít k nezaběhnutí vosku. Pro produkci kvalitních modelů je tedy nezbytné viskozitu kontrolovat.

Měření vosků (nemenovských kapalin) zpravidla probíhá na rotačních viskozimetrech, které vosk vystavují smykovému napětí, a tím ovlivňují jeho strukturu (např. napřímení polymerních řetězců). Rotační viskozimetry měří dynamickou viskozitu v závislosti na měnící se teplotě. Skládají se ze dvou definovaných ploch, mezi které je nalit natavený vosk o určité teplotě. Mezi typické plochy patří kužel-deska nebo válec-válec. Jedna z ploch je statická, na druhou je napojen elektrický pohon se snímačem kroučícího momentu. Vosk nalitý mezi plochami je v průběhu testu pomalu ochlazován. Ze známých údajů o geometrii ploch a kroučícího momentu motoru, vynaloženého na udržení konstantních otáček, lze vypočítat viskozitu voskové směsi. Schéma zařízení je patrné z obrázku 1.6, typický průběh viskozity voskové směsi v závislosti na teplotě viz graf 1.5. Charakteristickým jevem u vosků je náhlý zlom v průběhu viskozity při teplotě blízké bodu tuhnutí [1,15,24,31,32].



Obr. 1.6 Schéma rotačního viskozimetru [15]. Poznámka: upraveno autorem práce.



Graf 1.5 Závislost viskozity voskové směsi na teplotě [22]. Poznámka: upraveno autorem práce.

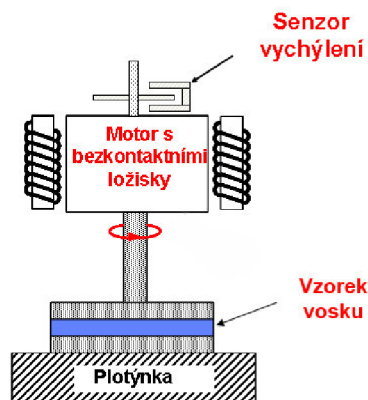
## H. Reologické vlastnosti – oscilace

Jedná se o disciplínu vědního oboru reologie, který se zabývá obecným tokem látek, vztahy mezi smykovým napětím, deformací a rychlostí deformace [33].

Tato zkouška, na první pohled podobná měření viskozity, je odlišná zejména v nižší teplotě zkoušených vosků a "neporušenosti" jejich struktury smykovým napětím. Zjišťování chování vosku ve stavu polotekutém až pevném podává informaci o průběhu tuhnutí voskové směsi. Měření bývá užíváno zejména pro porovnání průběhů tuhnutí voskových směsí mezi sebou (relativní posouzení), nikoliv pro určování absolutních hodnot [21,34].

Měření probíhá na tzv. reometrech, které dělíme na reometry s kontrolovaným smykovým napětím, nebo smykovou deformací. Schéma přístroje s kontrolovaným smykovým napětím je na obrázku 1.7. Roztavený voskový vzorek je v přístroji umístěn mezi vřetenem, aplikujícím deformaci a vyhřívanou plotýnkou, zajišťující správnou teplotu vosku. Po

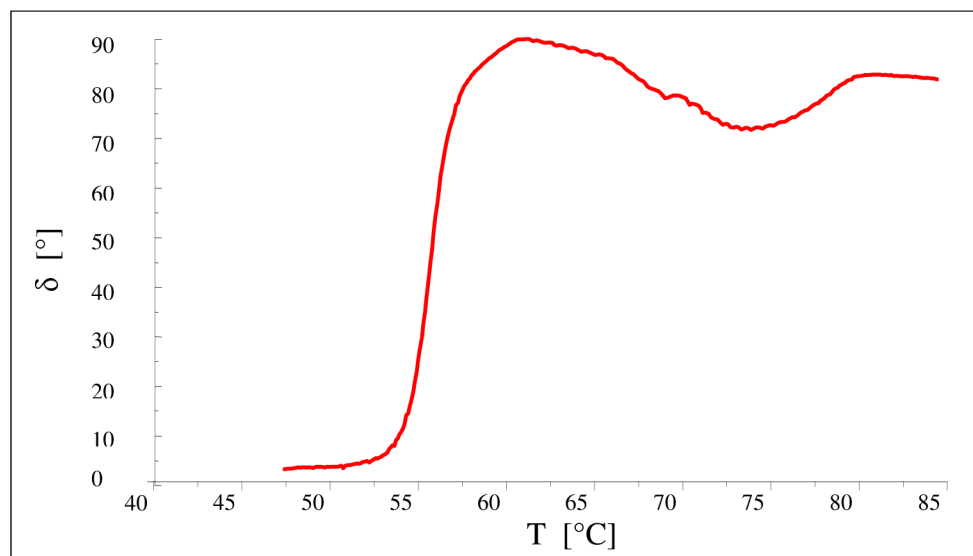
nastavení parametrů měřicí procedury je spuštěno měření. Voskový vzorek je vystavován deformaci sinusového průběhu (od kroutícího momentu motoru) a postupně je snižována jeho teplota. Senzor vychýlení měří výchylku a počítač dopočítává rychlost smykové deformace. Zařízení reguluje kroutící moment motoru tak, aby byla udržena požadovaná smyková rychlost. Na rozdíl od měření viskozity zůstává díky minimálním deformacím (výchylky řádově  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  radiánu) struktura vosku prakticky nedotčená. Z údajů o kroutícím momentu, geometrii vřetene a parametrů procedury jsou vypočteny ostatní údaje [34,35].



Obr. 1.7 Schéma reometru s kontrolovaným smykovým napětím [35]  
Poznámka: upraveno autorem práce.

U voskových směsí se zpravidla vyhodnocují tyto veličiny [21, 34]:

- Elastický (paměťový) modul  $G'$  [Pa] – veličina charakterizující elastické vlastnosti voskové směsi, tedy schopnost uchovávat dodanou energii viz graf 2.21 [34].
- Viskózní (ztrátový) modul  $G''$  [Pa] – veličina charakterizující viskózní chování voskové směsi, tedy schopnost ztrácet dodanou energii viz graf 2.21 [34].
- Fázový úhel  $\delta$  [°] – charakterizuje poměr mezi viskózním a elastickým chováním. Vosková směs vystavena deformaci sinusového průběhu, ve které vznikne napětí identického průběhu (tzn. ve fázi), se chová zcela elasticky a má fázový úhel roven nule. Jinak řečeno, energie dodaná materiálu se do něj při deformaci uloží a při odlehčení se spotřebuje na nabytí původního tvaru. Tímto chováním se vyznačuje ztuhlý vosk. Při zcela viskózním chování se energie spotřebovává v podobě tepelných ztrát (disipace) a vzorek po odlehčení nemění tvar. Fázový úhel pro zcela viskózní látku je  $90^\circ$ . Pro fázový úhel platí, že jeho tangenta je rovna poměru  $G''/G'$  [34,35,36]. Průběh ztrátového úhlu na teplotě je v zřetelný z grafu 1.6 a 2.21.
- Oscilační napětí [Pa] – je napětí, kterým působí vosk na testovací plochu při konstantní deformaci [21].



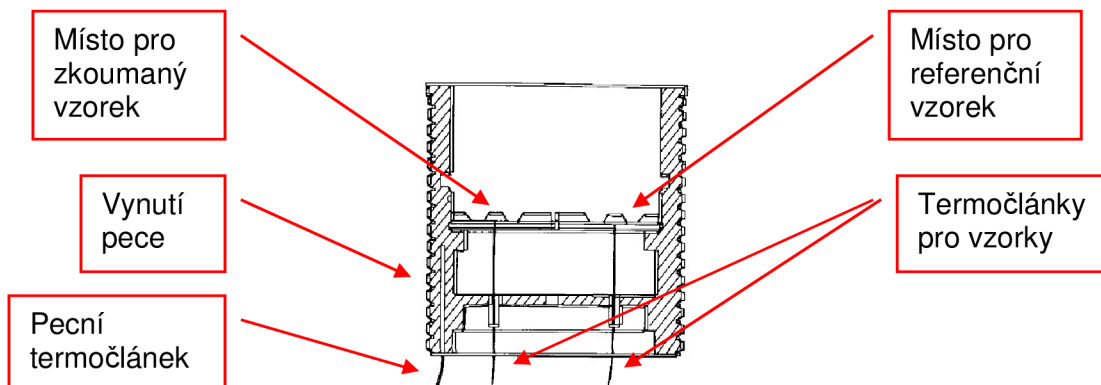
Graf 1.6 Typická závislost mezi ztrátovým úhlem a teplotou [11]  
Poznámka: upraveno autorem práce.

## I. Diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC)

Je analytická metoda, která umožňuje získat informace o tepelných charakteristikách voskových směsí. Měřením lze určit latentní teplo, potřebné na roztavení voskové směsi, údaj o bodu tavení nebo např. zjistit, při kterých teplotách se taví jednotlivé složky směsi. Teoreticky vzato se vosk s nižším latentním teplem nataví rychleji než vosk s latentním teplem vyšším [21].

Komerční DSC zařízení většinou pracují na principu měření rozdílu teplot zkoumaného a referenčního vzorku. Zkoumaný vzorek (vosková směs) je navážen do speciální hliníkové misky, jako referenční látka se většinou používá prázdná miska, identická s miskou pro vzorek. Obě misky jsou umístěny do společné komůrky kalorimetru na vyvýšená místa z konstantanu. Z druhé strany vyvýšených míst je umístěna měřící část termočlánku, takže teplota vzorků může být měřena bezprostředně. Kalorimetr ohřívá obě misky konstantní rychlostí. Jejich teplota je měřena chromel-aluménovými termočlánky. K ohřívání misky s voskovou směsí je zapotřebí větší množství přenesené energie, které odpovídá teplu, spotřebovanému na ohřev vosku a teplu latentnímu, potřebnému na změnu jeho fáze. Zároveň odpovídá i tepelnému toku přes misku. Z rozdílu teplot obou misek je počítačem určen tepelný tok a vytvořena grafická závislost teploty a tepelného toku [37,38].

Fázová přeměna (endotermický děj) se na křivce tepelného toku projeví tzv. píkem s kladnými hodnotami tepelného toku. Obsah plochy mezi křivkou tepelného toku miskou se vzorkem a miskou bez vzorku (tzn. plochy pod píkem) je roven latentnímu, teplu potřebnému na roztavení dané složky vosku. Teplota, které odpovídá vrchol píku představuje teplotu tání vosku. Obvykle kalorimetr pracuje ve třech režimech: izotermický, ohřívací a ochlazovací. Izotermický režim má za úkol prohřát celý objem vzorku na nastavenou teplotu. V ohřívacím režimu je vzorek řízeně ohříván z konečné teploty izotermického režimu na nejvyšší teplotu, které chceme vzorek vystavit, přičemž je měřen tepelný tok přes vzorek. Opakem ohřívacího režimu je režim ochlazovací. Na obrázku 1.8 je schéma DSC zařízení [13,21,24,38].



Obr. 1.8 Schéma komory diferenčního skenovacího kalorimetru s tepelným tokem [38] Poznámka: upraveno autorem práce.

## J. Rozměrová analýza – smrštění

Za ideální modelovou hmotu se považuje taková, která má minimální smrštění a podává stále stejné výsledky (co nejmenší variabilita výsledků). Velikost smrštění ovlivňují jak parametry vstřikování, tak vlastní složení voskové směsi či tvar a rozměr voskového modelu. Smrštění voskových směsí bývá v laboratorních podmínkách měřeno pouze jako volné, protože každý tvar, způsobující brzděné smrštění působí odlišně.

Pro produkci kvalitních rozměrově stabilních voskových modelů je potřebná kvalitní vosková směs s minimálním smrštěním, u které se smrštění mezi jednotlivými dávkami neliší a vstřikolis, který dokáže udržet neměnné parametry vstřikování. Vhodným doplňkem vstřikolisu je externí zařízení na monitorování vstřikovacích parametrů [2, 19, 20].

Z jednotlivých složek voskové směsi má na smrštění největší vliv obsah plniva. S rostoucím obsahem klesá smrštění jak u pevných plniv, tak u vody. V [18] bylo zjištěno, že při stejném nastavení vstřikolisu neplatí, že dvojnásobný obsah plniva znamená dvojnásobně menší smrštění. Vliv parametrů vstřikování je blíže rozebrán v kapitole 1.4.

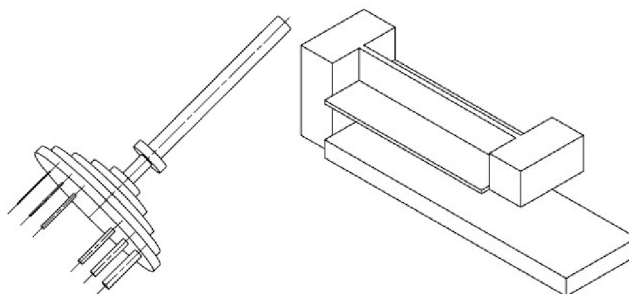
Měření volného smrštění spočívá v porovnání rozměru matečné formy s odpovídajícím rozměrem na voskovém modelu. Z těchto rozměrů je vypočteno procentuelní smrštění dle vzorce [25]:

$$l_z = \frac{l_0 - l}{l_0} \cdot 100 \quad (1.3)$$

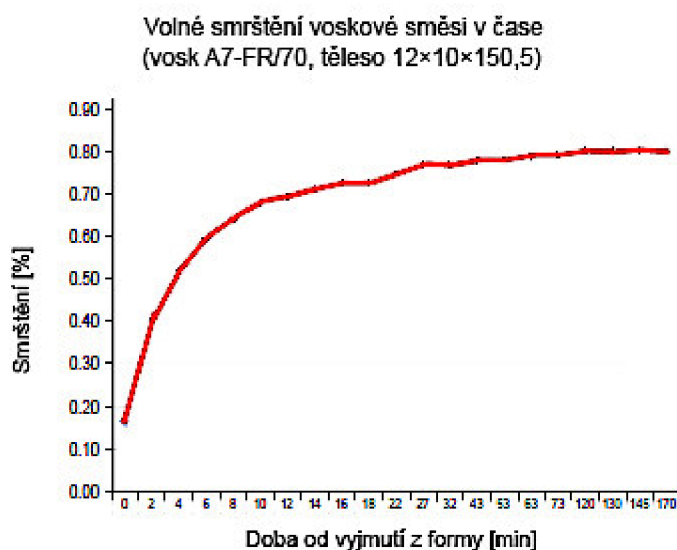
Kde:  $l_z$ ..... volné lineární smrštění [%]  
 $l_0$  ..... rozměr v matečné formě [mm]  
 $l$ ..... rozměr na voskovém modelu [mm]

K vyhodnocování brzděného smrštění vosku se ve slévárnách běžně užívají speciální tělesa nejrůznějších tvarů a rozměrů viz obrázek 1.9.





Obr. 1.9 Tělesa k vyhodnocování smrštění [27]. Vlevo: těleso „PBS“, vpravo: těleso „Fimes“.



Graf. 1.7 Smrštění voskové směsi v čase [22]  
Poznámka: Upraveno autorem práce.

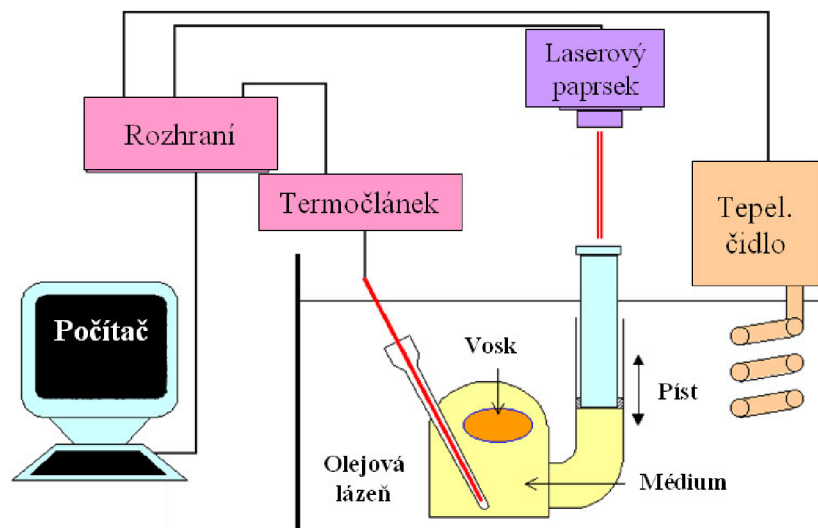
V literárním zdroji [22] je uvedeno, že se smrštění voskového modelu ustálí zhruba 2 hodiny od vyjmutí z matečné formy. Po tuto dobu je nutné držet složitější voskové modely ve stabilizačních přípravcích, jinak by mohlo dojít k jejich deformaci či větším změnám rozměrů. Měření dat pro vytvoření grafu 1.7 proběhlo na panenském modelovém vosku Blayson A7 – FR/70.

### K. Objemová roztažnost

Určení objemové roztažnosti v závislosti na teplotě je důležité pro posouzení možnosti praskání skořepin při procesu vytavování a vývoji nových voskových směsí. Praskání skořepiny je způsobené rozdílnou objemovou roztažností vosku a materiálu skořepiny. Podle [1] dochází k největšímu roztahování mezi 20 °C a bodem skápnutí.

Hlavní částí měřícího zařízení, vyvinutého společností Blayson Japan, je dilatometr z Pyrexu. Jedná se o uzavřenou nádobu, která převádí objemové změny vosku na lineární pohyb pístu. Do dilatometru je umístěn vzorek vosku o rozměrech 10×10×10 mm. Zbytek objemu dilatometru je naplněn glycerinem, který tlak, vzniklý změnou objemu přenesne na dno pístu. Změna polohy pístu je měřena laserovým snímačem, počítačem převedena na změnu objemu a vynesena do grafu. Ohřívání dilatometru i se vzorkem a glycerinem je provedeno pomocí olejové lázně, jejíž teplotu řídí taktéž počítač. Zařízení je schopno měřit

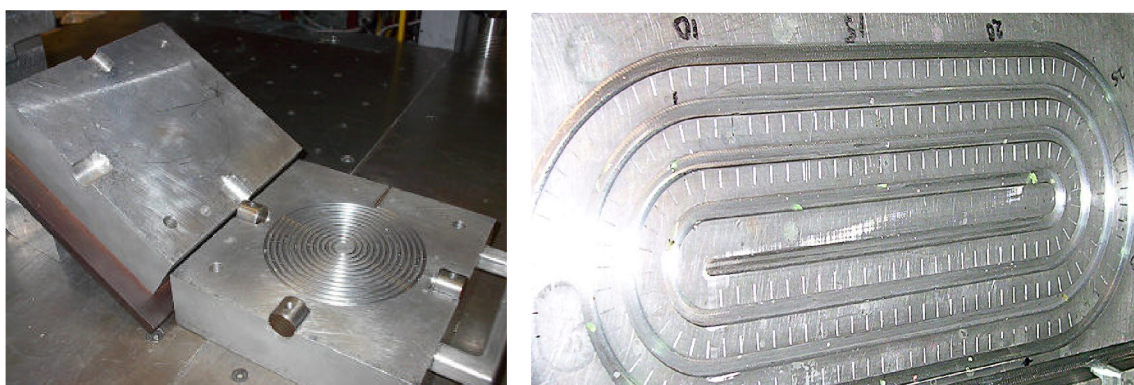
objemovou roztažnost do 200 °C, což je teplota vyšší než teplota vytavování (150–180 °C). Schéma měření objemové roztažnosti je uvedeno na obrázku 1.10 [1,39].



Obr. 1.10 Schéma zařízení na měření objemové roztažnosti vosku [39]  
Poznámka: Upraveno autorem práce.

#### L. Zkouška zabíhavosti

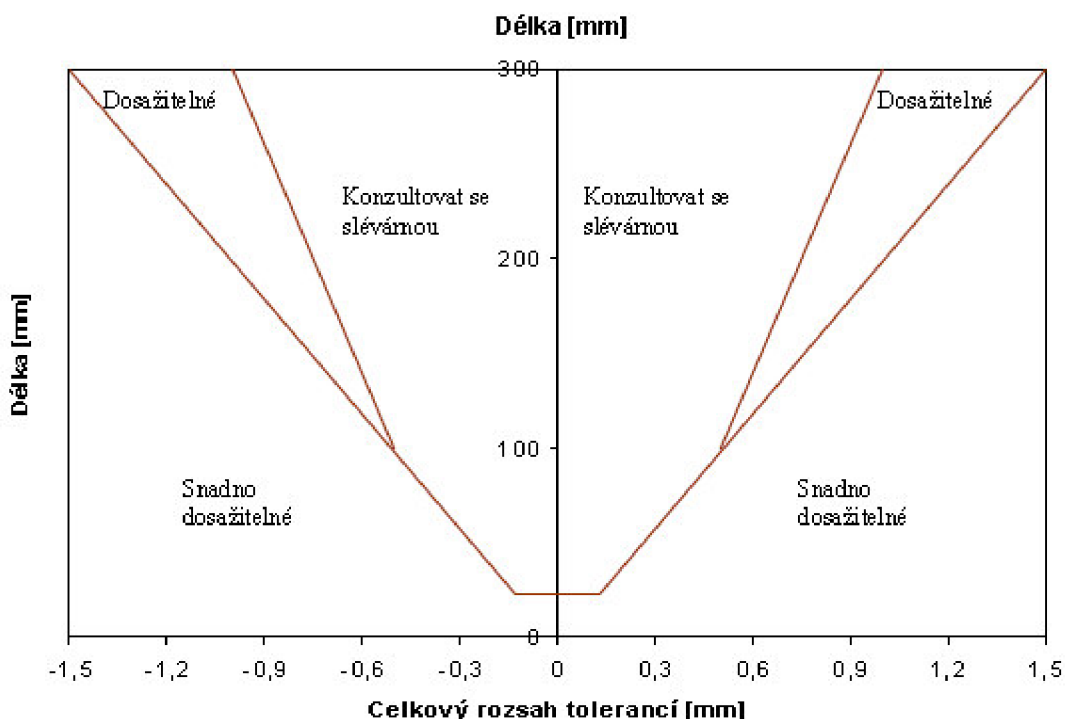
Tato kvantitativní zkouška podává informaci schopnosti vosku proudit formou. Zkouška probíhá na speciálních formách s dutinou tvaru spirály, u které jsou značky zaběhnuté vzdálenosti. Čím je větší hodnota zaběhnutí, tím je vyšší tekutost (lepší schopnost vyplnit formu). Výrobci voskových směsí mají většinou formy vlastní konstrukce. Zkoušená vosková směs je do formy vstříknuta při známých parametrech plnicího tlaku, teploty vosku a formy, rychlosti plnění a času. Parametry vstřikování si výrobci vosků stanovují sami [13,24]. Formy pro zkoušku zabíhavosti jsou na obrázku 1.11.



Obr. 1.11 Formy pro zkoušku zabíhavosti. Vlevo: zkušební forma Remet [24],  
vpravo: Blayson [13]

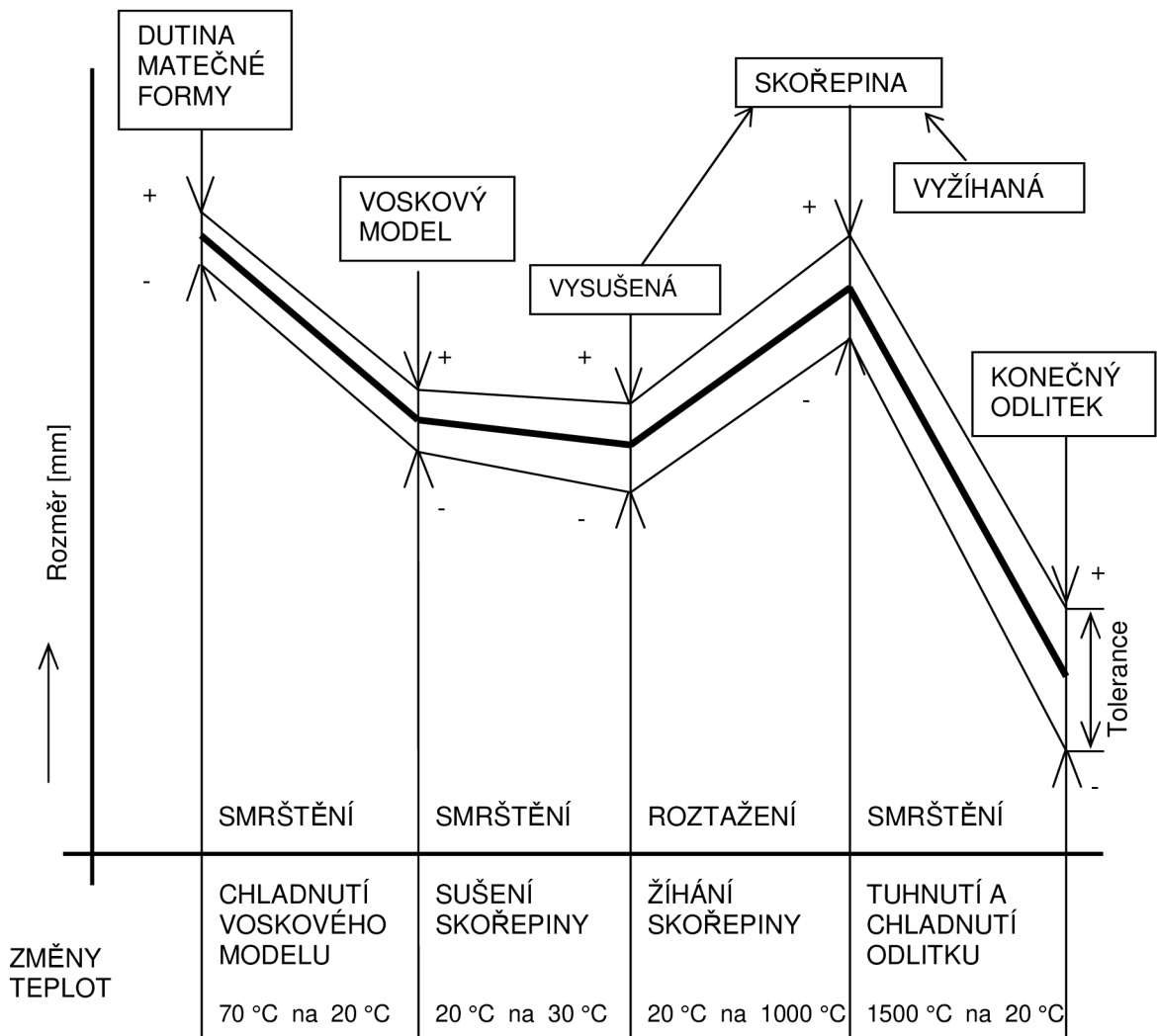
#### 1.4 Rozměrová přesnost metody vytavitelného modelu

Metoda vytavitelného modelu je v [1] obecně popsána jako proces, který je bez striktní kontroly jednotlivých fází procesu značně nepřesný. Na druhou stranu se v praxi ukazuje, že dobře zvládnutý proces produkuje odlitky špičkové přesnosti a tvarové složitosti. Těmito vlastnostmi je lití na vytavitelný model přímo předurčeno pro produkci odlitků „na hotovo“. Literární zdroj [2] dále uvádí grafickou závislost mezi rozměrem odlitku a dosažitelnou tolerancí viz graf 1.8.



Graf 1.8 Dosažitelné tolerance metody vytavitelného modelu [2]

V jednotlivých fázích procesu se vyskytuje mnoho příležitostí pro vznik nepřesností. Jedná se především o rozměrové změny, způsobené změnou teploty v jednotlivých fázích procesu, tedy následek objemového (a tedy i délkového) smrštění/roztahání. Tento jev postihuje každou fázi procesu a způsobuje rozměrové změny u: matečné formy, voskového modelu, keramické formy a odlité slitiny. Hodnota objemového smrštění se liší dle použitého materiálu (kov matečné formy, vosková směs, keramická směs, odlitá slitina) a dále nastavením parametrů procesu (např. parametry vstřikování vosku, tepelného zpracování skořepiny, sušení skořepiny, teplota lití atd.). Nezanedbatelnou měrou se na konečných rozměrech součástí podepisuje i tvar odlitku, způsobující různé hodnoty objemového smrštění v různých místech a výskyt tzv. brzděného smrštění [2]. Schématické shrnutí rozměrových změn v průběhu celého procesu je patrné z grafu 1.9.

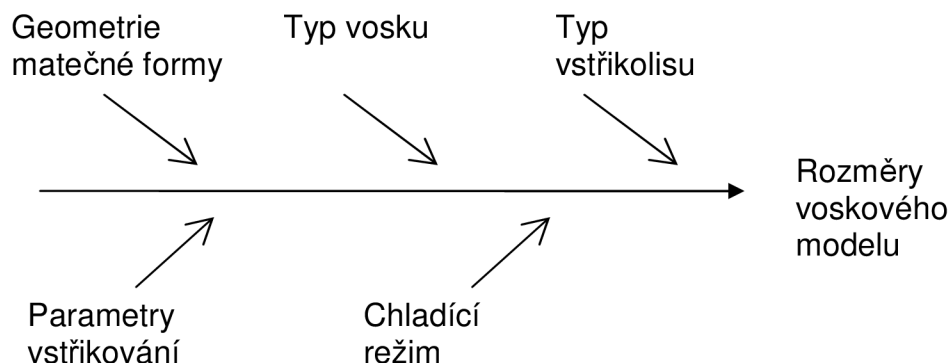


Graf 1.9 Rozměrové změny v průběhu celé technologie lití na vytavitelný model [2]

Analýzou faktorů, ovlivňujících dodržení tolerančních polí odlitku [2] v celém procesu bylo zjištěno, že prakticky jediným způsobem jak lze ovlivnit přesnost konečného odlitku je pomocí nastavení technologické fáze výroby voskového modelu viz níže. Ostatní fáze celého procesu by měly být nastaveny tak, aby jejich rozměrové změny byly co nejkonstantnější.

#### Faktory ovlivňující výsledný rozměr voskového modelu

Na první fázi výroby voskového modelu musí být kladena značná pozornost, protože případné nedostatky voskového modelu se zcela jistě projeví na odlitku. Výsledné rozměry voskového modelu ovlivňují především následující parametry viz obrázek 1.12 [2]:



Obr. 1.12 Faktory ovlivňující rozměry voskového modelu[2].

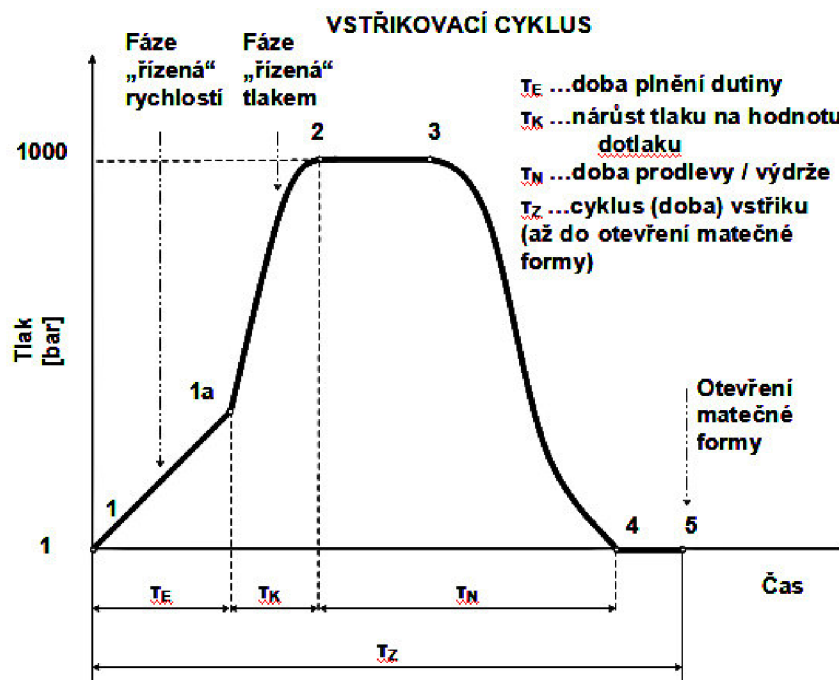
Podle [2] má největší vliv na finální rozměry především:

- Typ použité modelové hmoty:  
S vosky pro technologii vytavitelného modelu se pracuje v poměrně širokém rozmezí teplot. Vosk se do matečné formy vstřikuje při teplotě zhruba 70 °C a chladne na teplotu matečné formy. Následně, po vyjmutí z formy, chladne na okolní teplotu, zhruba 20 °C. Během této teplotní změny, dochází u vosku k rozměrovým změnám vlivem objemového smrštění [2,40].  
Vosk určený pro tuto technologii musí splňovat vysoké nároky na mechanické vlastnosti, tvrdost, bod tavení, objemové změny, viskozitu atp. Proto voskové směsi obsahují celou řadu látek, které mají různé chemické složení a strukturu. Tyto rozdíly ve složení způsobují komplikovaný (nelineární) průběh rozměrových změn, protože každá z obsažených látek mění svůj objem v závislosti na teplotě rozdílně viz graf 1.2.
- Tvary a rozměry součástí:  
Teplotní roztažnost/smrštění, zmíněná výše, je veličina, závislejší na konkrétním rozměru. Každý rozměr voskového modelu je charakterizován jiným přírůstkem/úbytkem rozměru. Proto je nutné uvažovat ve všech třech rozměrech (výška, šířka, délka) a nestačí se spokojit s jedinou hodnotou smrštění pro celý model [2].  
V článku [41] autoři uvádí, že tvar součásti má velký vliv na to, jak by měly být aplikovány rozměrové korekce. Zdůrazňují, že rozměrové změny, zjištěné na tvarově jednoduchých tělesech zcela neodpovídají rozměrovým změnám na tělesech složitějších. V jejich experimentu bylo zjištěno, že v důsledku nižší rychlosti ochlazování jedné strany voskového modelu (způsobeno tvarem modelu) vznikla deformace, která ovlivnila vyhodnocovaný rozměr (délku turbínové lopatky). Konečné rozměry voskového modelu jsou podle [2] ovlivněny charakterem teplotního pole či případným „brzděným“ smrštěním.
- Způsob výroby voskového modelu  
Je část technologické fáze výroby voskového modelu, kterou dokážeme poměrně efektivně ovlivňovat výsledné rozměry. Kromě způsobu plnění matečné formy voskovou směsí sem spadá i průběh obehmu, teploty a tlaku.  
Mezi parametry nastavení pracovního cyklu vstřikolisu, které mají významný vliv na rozměry voskového modelu patří dle [2]:

- vstřikovací teplota vosku a teplota matečné formy – podle [2, 22] vyšší vstřikovací teplota vede ke zvýšení smrštění při ochlazování modelu viz graf 1.2. Teplota matečné formy má podle [22] jen malý vliv na finální rozměr voskového modelu.
- vstřikovací tlak vosku – u voskových modelů dochází při zvýšení vstřikovacích tlaků k poklesu smrštění [2,22]
- rychlost vosku při vstřikování
- velikost dotlaku a doba jeho trvání – v [2] byl proveden experiment, jehož rozbohem bylo zjištěno, že prodloužení doby vstřikování vede ke snížení hodnoty smrštění. S tímto poznatkem přichází i autoři [41]. V obou zdrojích je uvedeno, že smrštění klesá s rostoucí dobou vstřikování významněji u vyšších vstřikovacích teplot. Tento jev v [41] autoři zdůvodňují rovnoměrnějším rozložením tlaků ve voskové směsi, umožněným nižší viskozitou, přičemž toto vysvětlení nepovažují za zcela uspokojivé. Při vyšší vstřikovací teplotě modely vykazují nižší smrštění v částech odlehlejších od vstřikovacího otvoru.
- doba od ukončení dotlaku do otevření formy

Pracovní cyklus vstřikolisu je uveden v grafu 1.10 a lze ho popsat následujícími body [2]:

- 1-1a – plnění dutiny matečné formy voskem – doprovázeno lineárním nárůstem tlaku
- 1a-2 – dotlak – dutina formy je již zaplněna voskem a tlak je nadále zvyšován
- 2-3 – výdrž na dotlaku – tlak je udržován na maximální hodnotě až do počátku tuhnutí vosku (bod 3)
- 3-4 – tuhnutí voskového modelu je doprovázeno poklesem tlaku
- 4-5 – voskový model je po ztuhnutí (bod 4) vyjmut z formy (bod 5).



Graf 1.10 Pracovní cyklus vstřikolisu [2]



## 2 Experimentální část

Experimentální část se dělí do několika částí. První kapitola se zabývá stručným popisem zkoušených voskových směsí. Druhá kapitola je věnována laboratorním zkouškám, třetí kapitola je zhodnocením výsledků získaných laboratorními testy. Ve čtvrté kapitole byla provedena rozměrová analýza voskových směsí na zkušebním tělese a konkrétním modelu odlitku. Pátá kapitola zhodnocuje výsledky rozměrové analýzy.

Technologický proces slévárny v oblasti voskových směsí trpěl následujícími problémy [47]:

- rozměrová nestálost voskové směsi v čase (při delším skladování)
- rozměrová variabilita v závislosti na vstřikovacích parametrech
- rozměrová variabilita jednotlivých dávek vosku od dodavatele
- propadání tvarů voskového modelu v místech s větší masou vosku
- časté praskání skořepinových forem při vytavování
- výskyt nečistot v dutině skořepinové formy po vytavení voskové směsi

### 2.1 Zkoušené vosky

Pro účely laboratorních testů bylo k dispozici celkem 12 voskových směsí od 3 různých výrobců. Jednalo se o 9 vosků modelových, 1 vtokový a 2 použité modelové vosky, které byly určeny pro výrobu vtoků. Parametry zkoušených vosků jsou v tabulce 2.1. Nepoužité vosky byly ke zkouškám dodány ve formě granulí, použité ve formě bloků vosku. Pro zaručení objektivit byly vosky pracovními označeny písmeny A-L.

Modelový vosk používaný slévárnou Fimes, a.s. byl testován pod označením D. Pro ověření rozměrové variability, popřípadě jiných odlišností, mezi jednotlivými dávkami od dodavatele, byly testovány různé dávky tohoto vosku (E,F, popř. B). Výrobce těchto vosků garantuje stejné vlastnosti vosku panenského a rekonstituovaného.

Parametry voskových směsí garantované výrobcem *							
Vosk	Typ vosku (zkoušený stav)	Bod tuhnutí [°C]	Bod skápnutí [°C]	Obsah popela [%]	Obsah plniva [%]	Penetrace [mm·0,1]	Viskozita [Pa·s]
A	Panenský modelový	64–70	70–78	0–0,02	22–28	3–9	0,450 při 90 °C
B	Panenský modelový	62–67	/	0–0,03	28–32	2–7	0,80–0,90 při 80 °C 0,50–0,60 při 90 °C 0,32–0,38 při 100 °C
C	Panenský modelový	68–74	78–84	0–0,03	/	2–8	0,45–0,55 při 90 °C 0,25–0,45 při 100 °C
D,E, F	Rekonstituovaný modelový	62–67	/	0–0,03	28–32	2–7	0,80–0,90 při 80 °C 0,50–0,60 při 90 °C 0,32–0,38 při 100 °C
G	Regenerovaný vtokový	Dokumentace vosku nebyla k dispozici.					
H,I	Použitý modelový	Původní parametry odpovídají vosku D. Vosk H byl po vytavení regenerován (převaření + základní hrubá filtrace přes síto) svépomocí ve slévárně a poté určen na výrobu vtoků. Vosk I nebyl regenerován.					
J	Panenský modelový	63–67	70–73	0–0,05	30–32	9–12	2,10–2,50 při 70 °C
K	Rekonstituovaný modelový	63–67	70–74	0–0,05	26–30	9–12	0,8–1,5 při 70 °C
L	Rekonstituovaný modelový	62–69	70–76	0–0,05	36–40	8–13	2,00–3,50 při 70 °C

\*Uvedená data jsou převzata z materiálů dodaných výrobcí společně s vosky viz příloha 1.

Tab. 2.1 Shrnutí vlastností voskových směsí pro experimentální část

## 2.2 Laboratorní zkoušení voskových směsí

Teorie ke zkoušení voskových směsí je zpracována v kapitole 1.3. Veškeré testy proběhly dle interních předpisů společnosti Blayson Olefines Ltd ve Velké Británii. Dodržené postupy zaručily vzájemnou porovnatelnost výsledků. Soulad naměřených výsledků s výsledky určenými dle norem výrobcí není zaručen. V případě souladu postupu měření s normou je příslušná norma u popisu zkoušky uvedena. Jediný výrobce, který k naměřeným hodnotám uvedl příslušnou normu byl výrobce vosku A a C.

Některé zkoušky proběhly při jednotném nastavení vstřikovacích parametrů, což není zcela ideální z hlediska objektivity. Pro každý vosk by měly být stanoveny ideální parametry vstřikování a při těchto by měl být vosk zkoušen. Hledání ideálních parametrů je velmi zdoluhavou záležitostí, kterou si během zkoušek nebylo možné dovolit z důvodů finančních a časových. Obdržené výsledky přesto dávají dobrou představu o chování vosků. Mezi tyto zkoušky patří: statická zkouška ohybem (těleso TT150), rozměrová analýza a zkouška zabíhavosti.

### 2.2.1 Laboratorní zkoušky

Následující podkapitoly již byly publikovány v literárním zdroji [27]

#### A. Bod skápnutí

Zkouška proběhla v souladu s normou ASTM D 3954.

#### Postup měření:

1. Na zhotovení vzorku je třeba roztavit zhruba 20 ml zkoušeného vosku.
2. Předehřátá (85 °C) zkušební miska obrázek 2.1 - B byla postavena menším otvorem na kovovou podložku. Dále byla naplněna voskem tak, aby nevznikly vzduchové bubliny. Miska byla plněna řádně promíchaným voskem o teplotě 85 °C.
3. Připravený vzorek ponechán 30 minut na vzduchu při okolní teplotě 21 °C. Přebytný vosk nad větším otvorem byl seříznut do roviny s okrajem misky.
4. Z povrchu misky musí být odstraněny voskové nečistoty, které by mohly ovlivnit měření.
5. Sestaveno zkušební těleso viz obrázek 2.1 (držák misky, miska, sběrací pouzdro) a vloženo do tavicí buňky FP38HT (obrázek 2.2), napojené na ovládací zařízení FP90 Central Processor (obrázek 2.3)
6. Na ovládacím zařízení nastaven příslušný program (parametry viz nastavení zařízení) a spuštěn test. Po automatickém ukončení testu je na displeji zobrazen výsledek.

#### Nastavení zařízení:

- počáteční teplota: 55 °C
- rychlost ohřívání: 2,0 °C·min<sup>-1</sup>
- maximální konečná teplota: 120 °C

#### Vybavení:

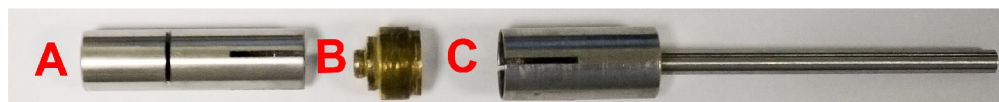
- laboratorní trouba, kádinka (40ml), skalpel
- tavicí buňka Mettler Toledo FP38HT (ASTM D 3954), ovládací zařízení Mettler Toledo FP90 Central Processor
- držák misky, miska (Ø2,8 mm; ASTM D 3954), sběrací pouzdro viz obrázek 2.1 – C



**Výstup měření a zhodnocení:**

Měření pro každý vosk bylo provedeno dvakrát, výsledkem je aritmetický průměr těchto dvou hodnot. Výsledky jsou uvedeny v grafu 2.1, naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce v příloze 2.

Naměřené hodnoty odpovídají výrobci určeným hodnotám. Hodnoty teplot skápnutí u vosků určených na výrobu vtoků patřily mezi nejnižší.



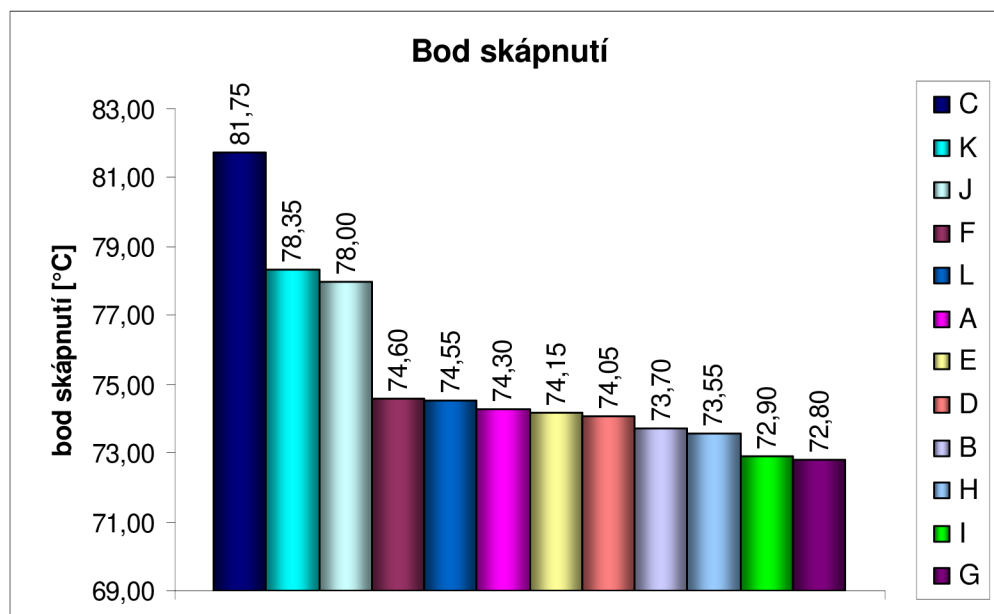
Obr. 2.1 Zkušební těleso (A – sběrací pouzdro, B – miska, C – držák misky)



Obr. 2.2 Tavní buňka FP38HT



Obr. 2.3 FP90 Central Processor



Graf 2.1 Bod skápnutí pro jednotlivé směsi

## B. Bod tuhnutí

### Postup měření:

1. Ve skleněné kádince byl rozpuštěn vzorek vosku (40 ml) a zahřát na 90 °C.
2. Do laboratorního stojanu umístěna do vodorovné polohy zkumavka přehřátá na zhruba 120 °C. Přehřátá zkumavka zabrání prudkému ochlazení teploměru v kroku 4.
3. Teploměr byl přehřát na 90 °C. Na špičku přehřátého teploměru pro měření bodu tuhnutí nabráno takové množství vosku, aby vytvořilo kapku. Důležité je vosk před měřením řádně promíchat.
4. Konec teploměru s kapkou vosku vložen do přehřáté zkumavky (viz krok 2.) tak, aby se zkumavka a teploměr vzájemně nedotýkali.
5. Teploměrem bylo neustále otáčeno kolem vodorovné osy. Obsluha pozoruje zda-li kapka vosku „klouže“ po rotujícím teploměru.
6. Ve chvíli, kdy se začne vosková kapka pohybovat společně s rotujícím teploměrem, je odečten bod tuhnutí. Měření je znázorněno na obrázku 2.4 .

### Vybavení:

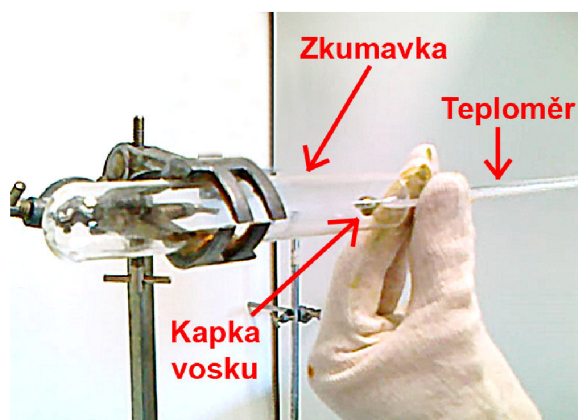
- skleněná kádinka (60ml), zkumavka Ø 20 mm, laboratorní stojan, vařič, trouba, skleněný teploměr ASTM 54C

### Výstup měření a zhodnocení:

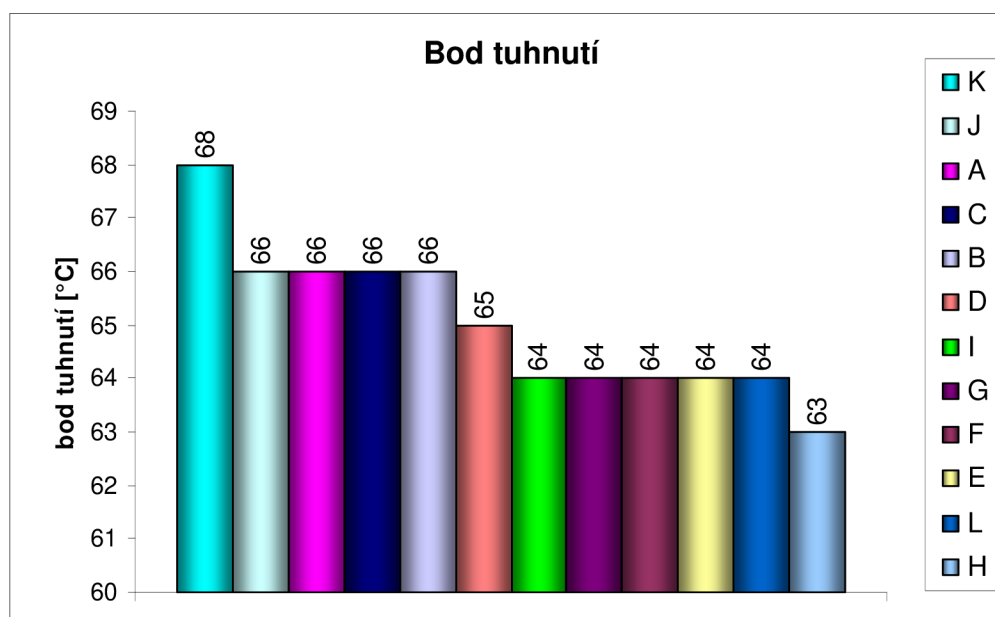
Výstupem měření jsou individuální hodnoty bodů tuhnutí. Teploměr má rozlišitelnost 0,2 °C. Hodnoty byly zaokrouhleny na celé stupně. Výsledky jsou uvedeny v grafu 2.2, naměřené hodnoty v tabulce v příloze 2.

Většina naměřených dat souhlasí s předepsanými parametry. Jedinou výjimkou je vosk C s odchylkou 2 °C. Odchylka může být způsobena nepřesností měření. Odečítání teploty z pohybujícího se sloupce rtuti v teploměru je poměrně obtížné a je náročné na zkušenost pracovníka.

Obdržené hodnoty jsou dobrým vodítkem pro nastavení vstřikovacích teplot viz kapitola 1.3-B.



Obr. 2.4 Měření bodu tuhnutí



Graf 2.2 Bod tuhnutí pro jednotlivé směsi

### C. Obsah plniva

#### Postup měření:

1. Na laboratorních vahách naváženo cca 1,3–1,5 g testovaného vosku ( $m_v$ ). Navážený vosk byl přesypán do kuželové baňky a k vosku bylo přilito cca 50 ml rozpouštědla Ultrasol 400.
2. Baňka byla položena na vařič o teplotě 90 °C na cca 50 minut. Po této době v baňce zůstalo pouze plnivo + rozpuštěný vosk. Plnivo je nerozpustné v uvedeném rozpouštědle.
3. Zvážen vysušený filtrační papír ( $m_p$ ). Před vážením sušen při 150 °C po 60 minut. S papírem bylo nutno manipulovat pouze pomocí pinzety nebo podložky až do bodu 10. Nesmí dojít k opotřebení, navlhčení nebo znečištění papíru.
4. Filtrační papír umístěn do předehřáté (120 °C) Büchnerovy nálevky (obrázek 2.5), napojené přes odsávací baňku na vývěvu.
5. Obsah baňky byl vylit doprostřed filtračního papíru za nepřetržitého odsávání vývěvou. Případné zbytky plniva v baňce vypláchnuty pomocí stříčky rozpouštědlem Ultrasol 400 na filtrační papír.
6. Filtrační papír se zachyceným plnivem (obrázek 2.6) vysušen v troubě při teplotě 120 °C po dobu 30 minut a zvážen ( $m_{pp}$ ).
7. Obsah plniva byl vypočítán dle vzorce [25]:

$$k_p = \frac{m_{pp} - m_p}{m_v} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Kde:  $k_p$  ..... obsah plniva [%]  
 $m_p$  ..... váha filtračního papíru [g]  
 $m_{pp}$  ..... váha filtračního papíru s plnivem [g]  
 $m_v$  ..... váha rozpuštěného vosku [g]

**Vybavení:**

- kuželová laboratorní baňka (75 ml), odsávací baňka, stříčka, pinzeta, vaříč, trouba, laboratorní váhy (min. 4 desetinná místa), rozpouštědlo Ultrasol 400, filtrační papír, vývěva, Büchnerova nálevka

**Výstup měření a zhodnocení:**

Výstupem měření jsou vypočtené hodnoty procentuálního zastoupení plniva ve voskové směsi. Pro každý vosk byly provedeny tři měření, výsledkem je jejich aritmetický průměr. Výsledky měření jsou uvedeny v grafu 2.3. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce v příloze 2.

U všech vosků byly dodrženy výrobcem předepsané parametry. Nejnižší obsah plniva byl naměřen u vosku G, který je určen na výrobu vtoků. Na tyto vosky jsou kladeny především požadavky na dobrou pevnost a malou křehkost, což by měl zajistit právě malý obsah plniva. U vosku L lze díky vysokému obsahu plniva očekávat velmi vysokou rozměrovou stálost, mírně hrubší povrch, dobrou pevnost a nižší flexibilitu. Podobné chování lze očekávat i u vosku C, u kterého výrobce neuvádí obsah plniva.

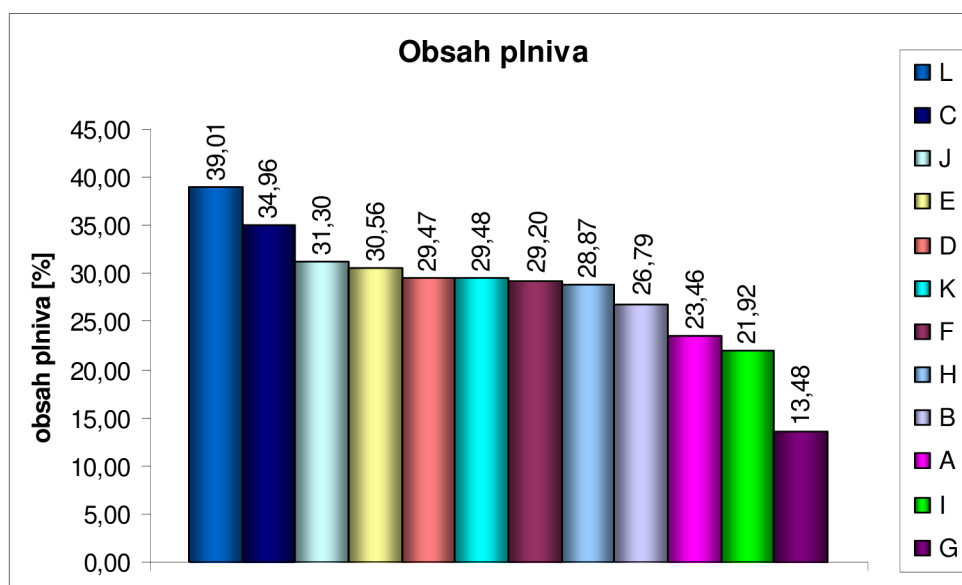
Rozdíl v obsahu plniv mezi voskem H a I, zhruba 15 %, je nejspíše způsoben způsobem odběru vzorků. Tyto vosky byly ke zkouškám dodány ve formě bloků. Při zhotovování bloku po vytavení z boilerklávu je vosk ve velkém objemu zahřát na vysokou teplotu a následně přelit do nádoby, ve které není míchán. Proto pravděpodobně došlo k sedimentaci plniva a při odběru menšího množství vosku byl odebrán vosk z různých vrstev, tedy s rozdílným obsahem plniva.



Obr. 2.5 Filtrační papír s plnivem



Obr. 2.6 Büchnerova nálevka



Graf 2.3 Obsah plniva v jednotlivých voscích

## D. Obsah popela

### Postup měření:

1. Zvážen prázdný vysušený keramický kelímek ( $m_K$ ) viz obrázek 2.7 . Kelímky musí být udržovány suché v exsikátoru (obrázek 2.8). S kelímkem bylo manipulováno pouze pomocí pinzety, aby nedošlo k jeho poškození, navlhčení nebo znečištění.
2. Do kelímku přidáno zhruba 10 g vosku. Kelímek s voskem zvážen ( $m_{KV}$ ).
3. Kelímek vložen do pece na spalování (obrázek 2.9) a na příslušný program je spálen obsažený vosk. Po spálení je kelímek s popelem vyjmut z pece a vložen na 10 minut do exsikátoru.
4. Vysušený, vychladlý kelímek zvážen ( $m_{KP}$ ) a procentuální zastoupení vosku je vypočteno dle vzorce [25]:

$$k_{PL} = \frac{m_{KP} - m_K}{m_{KV} - m_K} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Kde:  $k_{PL}$  ..... obsah popela [ %]  
 $m_K$  ..... váha keramického kelímku [g]  
 $m_{KP}$  ..... váha keramického kelímku s popelem [g]  
 $m_{KV}$  ..... váha keramického kelímku s voskem [g]

### Nastavení zařízení:

Spalovací pec je řízena programem ve třech fázích:

- I.fáze: ohřev z okolní teploty 21 °C na 400 °C během 25 minut
- II.fáze: ohřev z 400 °C na 650 °C během 25 minut
- III. fáze: výdrž na teplotě 650 °C po dobu 25 minut

### Vybavení:

- laboratorní pec CEM Phoenix , laboratorní váhy (minimálně 4 desetinná místa)
- pinzeta, zkušební keramický kelímek 50ml, exsikátor

### Výstup měření a zhodnocení:

Pro každý vosk byla provedena tři měření, výsledkem je jejich aritmetický průměr viz graf 2.4 . Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce v příloze 2.

Měření objevilo alarmující hodnoty obsahu popelovin u obou použitých modelových vosků určených na zhotovení vtoků. Následkem nedostatečné filtrace při jednoduché regeneraci vosku ve slévárně došlo k nahromadění popelovin, jejichž obsah ve vosku H dosáhl 9,7× vyšší hodnoty než je hodnota doporučená. U vosku I byly doporučené hodnoty překročeny 5×. Nečistoty po spálení 10 g vosku I jsou na obrázku 2.7. Tyto vosky byly identifikovány jako hlavní zdroj problematických nečistot, zmíněných v úvodu experimentální části.

Vtokový vosk G, regenerovaný u výrobce, překročil maximální doporučenou hodnotu obsahu popelovin 1,7×.

Všechny modelové vosky splňují nízký obsah popelu s rezervou. Nejnižším obsahem popelovin disponuje vosk L s obsahem popela zhruba 8× nižším než je maximální doporučená hodnota.



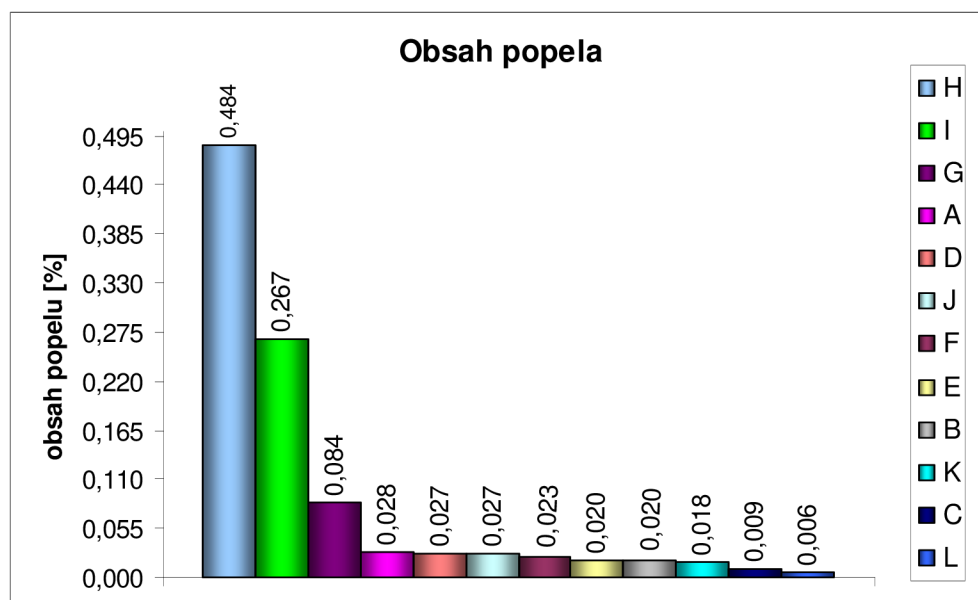
Obr. 2.7 Kelímek po spálení vosku H



Obr. 2.8 Exsikátor



Obr. 2.9 Pec na spalování vosku



Graf 2.4 Obsah popela v jednotlivých voscích

## E. Penetrace

### Postup měření:

1. Ke zhotovení vzorku je nutno natavit zhruba 80 ml zkoušeného vosku.
2. Natavený vosk byl zahřát na 85 °C a dobře promíchaný přelit do kovové zkušební nádoby.
3. Zatuhlý vzorek umístěn na 3 hodiny do vodní lázně o teplotě 25 °C.
4. Na penetrometru SETA nastaveno zatížení 250 g (obrázek 1.3 a 2.10). Vzorek byl umístěn na stůl penetrometru a penetrační jehla byla přiblížena k povrchu vzorku tak, že se právě dotýká.
5. Ukazatel penetrace byl vynulován a následným stisknutím tlačítka na dobu 5 sekund bylo uvolněno 250 g závaží, které zatížilo penetrační jehlu.
6. Odečten údaj o penetraci ze stupnice přístroje.

### Vybavení:

- penetrometr SETA, penetrační jehla, zkušební nádoby, laboratorní trouba



**Výstup měření a zhodnocení:**

Každý voskový vzorek byl měřen třikrát, výsledkem je hodnota aritmetického průměru. Rozlišitelnost na stupnici penetrometru je 0,1 mm.

Výsledky penetrace se liší od předepsaných hodnot u většiny směsí. Tento rozdíl byl způsoben rozdílnou metodikou zkoušení u výrobce (norma ASTM D1321) a v laboratoři, i když je zkouška dána normou. Výsledky jsou uvedeny v grafu 2.5, naměřené hodnoty jsou v tabulce v příloze 2.

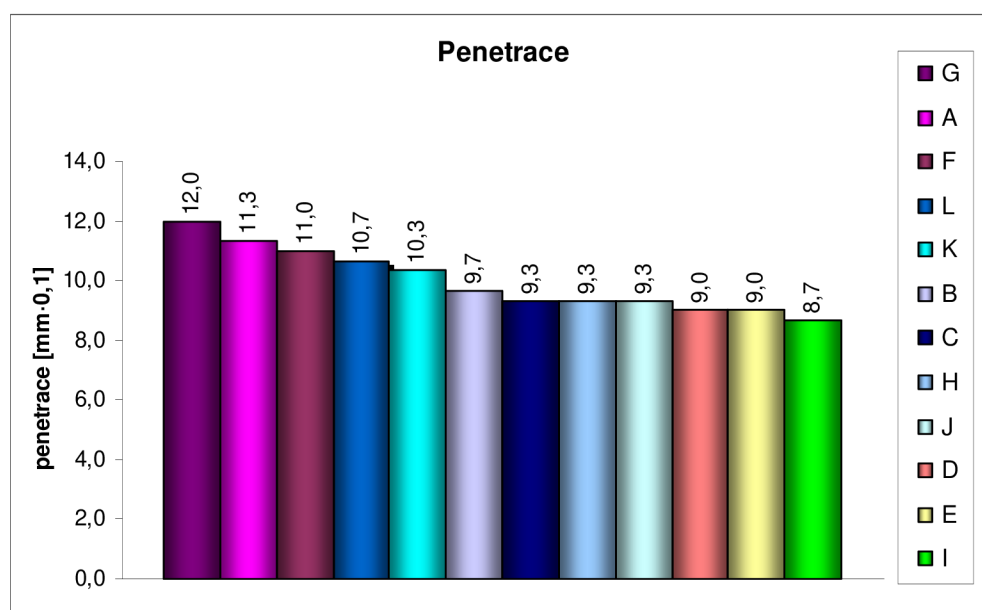
Největší penetrace byla zaznamenána u vtokového vosku G a modelového A. Tyto vosky mají taktéž nižší obsah plniva než vosky ostatní. U těchto vosků lze očekávat dobré elastické vlastnosti a menší rozměrovou stabilitu.

Výrazný rozdíl byl zjištěn u vosku F, který by měl být totožný s vosky D a E. Rozdíl pravděpodobně povede k různé rozměrové stálosti mezi jednotlivými výrobními dávkami výrobce. Tento rozdíl by se měl projevit při rozměrové analýze viz níže.

Penetrace taktéž značí odolnost proti poškrábání. Čím větší je penetrace, tím obtížnější je vosk povrchově poškodit. Zároveň s rostoucí penetrací roste i obtížnost krájení vosku. Vosk s nízkou penetrací se při krájení odštipuje a usnadňuje například hrotování modelů.



Obr. 2.10 Popis penetrometru SETA



Graf 2.5 Hodnoty penetrace pro jednotlivé směsi

## F. Statická zkouška ohybem

Pro hodnocení mechanických vlastností byla provedena 2 měření. První hodnotilo ručně odlité vzorky, pro jejichž zhotovení dostačovalo relativně malé množství vosku, a tudíž mohlo být provedeno u všech směsí. Toto měření má bohužel nižší vypovídající hodnotu, protože při zhotovování vzorků dochází k vnitřním i povrchovým vadám, které se projevují jako koncentrátoři napětí. Vosková směs je i méně zhutněná, proto nelze očekávat stejné výsledky, jakých by bylo dosaženo při testování vstřikovaných vzorků.

Druhé měření proběhlo na vzorcích zhotovených na vstřikolislu. Naměřené hodnoty u tohoto měření se velmi blíží hodnotám reálným (v praxi běžně dosažitelným). Bohužel je pro zhotovení vstřikovaných vzorků nutné velké množství vosku, proto nemohly být testovány voskové směsi H a I, které byly ke zkouškám dodány v menším množství.

### Postup měření:

- příprava ručně odlitých vzorků:
  1. Na zhotovení vzorků nataveno 200 ml vosku.
  2. Forma na odlévání zkušebních tyček byla ošetřena čistícím přípravkem Trisol 60 Plus, kvůli zamezení zalití nečistot do vzorku.
  3. Vosk odlit do formy při teplotě 85 °C. Celkem zhotoveno 16 zkušebních těles o rozměrech 9x9x80 mm, podobně jako na obrázku 1.5.
- příprava vstřikovaných vzorků:
  1. Zkušební tělesa byla zhotovena stejným způsobem jako tělesa pro určení smrštění 150TT viz níže. K měření bylo použito 12 zkušebních těles.
  2. Odstríknutá tělesa ponechána 24 hodin na vzduchu při teplotě 21 °C.
- postup měření pro ručně odlité i vstřikované vzorky:
  1. Vzorky v uzavíratelném sáčku vloženy do vodní lázně o teplotě 21 °C na dobu 4 hodin.
  2. Po temperaci proběhlo testování vzorků na trojbodový ohyb (obrázek 2.11 a 2.12) na zařízení Lloyd Instruments LRX (obrázek 1.4). Na připojeném počítači s programem NEXYGEN byly vyplněny údaje o zkoušeném vzorku a parametry testu viz níže.
  3. Výsledky měření pomocí programu NEXYGEN jsou ve formě tabulky mechanických vlastností.

### Nastavení zařízení:

Níže uvedené označení rozměrů a společných parametrů odpovídá obrázku 2.12

- pro ručně odlité vzorky:
  - rozměry zkušebního tělesa: délka  $c = 80$  mm, šířka  $a = 9$  mm, výška  $b = 9$  mm
  - rozpětí podpor:  $l = 40$  mm
- pro vstřikované vzorky:
  - rozměry zkušebního tělesa: délka  $c = 150$  mm, šířka  $a = 55$  mm, výška  $b = 10$  mm
  - rozpětí podpor:  $l = 100$  mm
- společné parametry:
  - rychlost zatěžování:  $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$
  - maximální zatížení:  $F = 5 \text{ kN}$
  - maximální průhyb:  $d = 10 \text{ mm}$
  - označení vzorku: pracovní označení vosku, např. A
  - popis vzorku: např. ručně plněná zkušební tělesa; 21 °C



- podpory: charakter hrany
- zatěžovací trn: charakter válečku

**Vybavení:**

- zatěžovací stroj Lloyd Instruments LRX, počítač s programem NEXYGEN
- forma na vzorky, vaříč, kádinka (200ml), teploměr, čistící přípravek Trisol 60 Plus

**Výstup měření a zhodnocení:**

Výsledky měření (maximální průhyb, maximální zatížení, modul pružnosti a smluvní pevnost v ohybu) byly uloženy do formátu XLS. Údaje o modulu pružnosti a smluvní pevnosti byly automaticky vypočteny programem NEXYGEN. V programu Minitab 16 byl u každého typu vosku proveden Anderson-Darlingův test normality dat pro hodnoty maximálního zatížení. Dále byl u těchto hodnot proveden test na odhalení hrubých chyb (odlehklých hodnot) na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Pro normální rozdělení byl použit test Grubbsův, pro nenormálně rozdělená data test Dean-Dixonův. Pokud byla odhalena hrubá chyba, bylo vyloučeno celé měření včetně hodnot maximálního průhybu, modulu pružnosti a smluvní pevnosti v ohybu. Naměřená data, včetně P-hodnoty testu normality dat jsou uvedena v tabulkách v přílohách 3 a 4. Výsledky měření jsou uvedeny grafu 2.6 – 2.13.

Výsledky podané programem NEXYGEN byly srovnány s výsledky, vypočtenými podle matematických definic 1.1 a 1.2. Při porovnání byly zjištěny rozdílné výsledky. Tato problematika byla konzultována s technickým centrem společnosti Blayson. Výsledkem konzultace bylo zjištění, že program NEXYGEN koriguje výsledky chybovým koeficientem, kvůli použitému voskovému materiálu.

**Zhodnocení mechanických vlastností:**

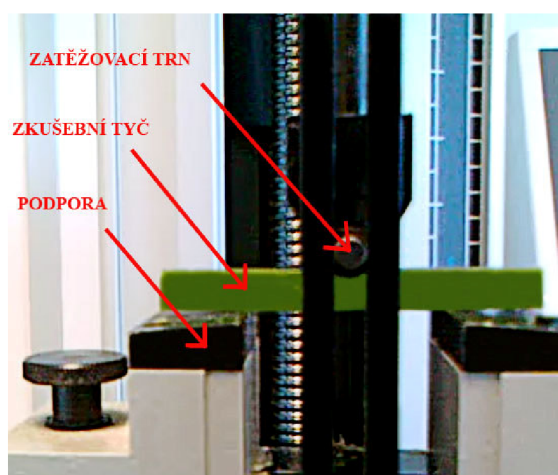
Poznámka: vosk D při měření vstřikovaných vzorků vykazoval větší deformaci než nastavený limit. Výsledná hodnota tedy neodpovídá skutečnosti (je nižší). Hodnota je v grafu 2.7, 2.9, 2.11 a 2.13 vyznačena červeně. Stejným způsobem ovlivněno maximální zatížení, modul pružnosti a smluvní mez pevnosti v ohybu.

- maximální zatížení – výsledky ukazují, jakému zatížením můžeme vosk vystavit, aniž by došlo k jeho porušení lomem. Nejpevnějším zkoušeným voskem je vosk C, naopak nejnižší zatížení snáší vosk B. Velmi dobré výsledky podává i vosk E, K, F a A. Výsledek max. zatížení je však nutné porovnat s výsledky maximálního průhybu, protože vysoká hodnota max. zatížení může být způsobena jednoduše tím, že se vosk deformuje. Toto porovnání je provedeno pomocí modulu pružnosti viz níže.
- maximální průhyb – za ideální hodnotu lze podle dlouhodobých zkušeností společnosti Blayson považovat maximální průhyb 2-3 mm u vstřikovaných vzorků. Do tohoto rozsahu spadají vosky B, G, L, popř. J. Nadměrná deformace je nevhodná z hlediska udržení tvaru modelu při manipulaci a s tím spojenou změnu rozměru. Obecně lze říci, že čím větší model odlitku, tím menší deformaci by měl vykazovat voskový materiál. Příliš malá deformace naopak značí sklon ke křehkému chování.
- modul pružnosti – dává do souvislosti průhyb, maximální zatížení a rozměry vzorku. Z definice uvedené v teoretické části vyplývá, že hledáme vosk s vyšším modulem pružnosti, tzn. vosk, který se při vyšším zatížení příliš nedeformuje. Za takový vosk lze považovat vosk G, J, K a L. U vosků C, D, E a F je patrné, že u nich dosažené vysoké maximální zatížení bylo způsobeno velkou deformací.

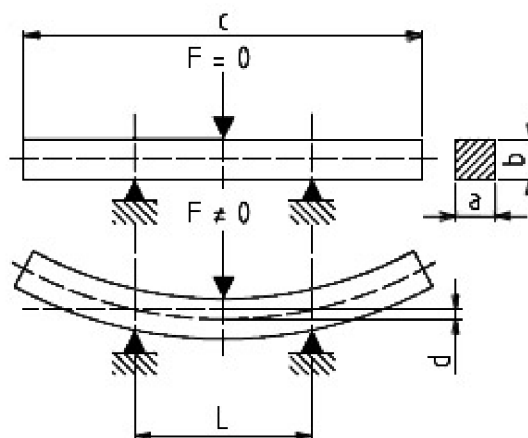
- smluvní mez pevnosti v ohybu – na tomto měření lze dobře porovnat výsledky získané u ručně odlitých a vstřikovaných vzorků, jelikož se jedná o maximální zatížení vzorku, vztážené na jeho průřez. Z grafu 2.12 a 2.13 je zřejmé, že naměřené vlastnosti u obou typů vzorků dobře korespondují. Nejvyšších pevností dosahují vosky C, K, E, F a A. Jak již bylo zmíněno výše, tyto výsledky je nutné porovnat s průhybem.

Zhodnocení z hlediska směrodatných odchylek:

- Variabilitu dat má smysl posuzovat pouze u charakteristik měřených (zatížení, průhyb). Vstřikované vzorky vykazují nižší variabilitu dat. Důvodem je způsob zhotovení. Vstřikované vzorky jsou pro všechny vosky zhotovené při identickém nastavení vstřikolisu. U vzorků zhotovených ručně mohlo dojít ke vzniku vnitřních nehomogenit, které se projeví právě vyšší variabilitou. Pokud vezmeme v úvahu více spolehlivé vzorky, zhotovené na vstřikolisu, pak mezi vosky s nejvyšší směrodatnou odchylkou patří E, C, A pro maximální zatížení a C, G, D, F pro hodnoty max. průhybu. Směrodatná odchylka modulu pružnosti vosku D dosáhla u ručně zhotovených vzorků 78 % průměrné hodnoty modulu, což je velmi vysoká hodnota. Mezi vosky s nejstabilnějšími výsledky lze řadit vosk A, J, K, L. Variabilita výsledků vosk H je s velkou pravděpodobností způsobena velkým obsahem nečistot.

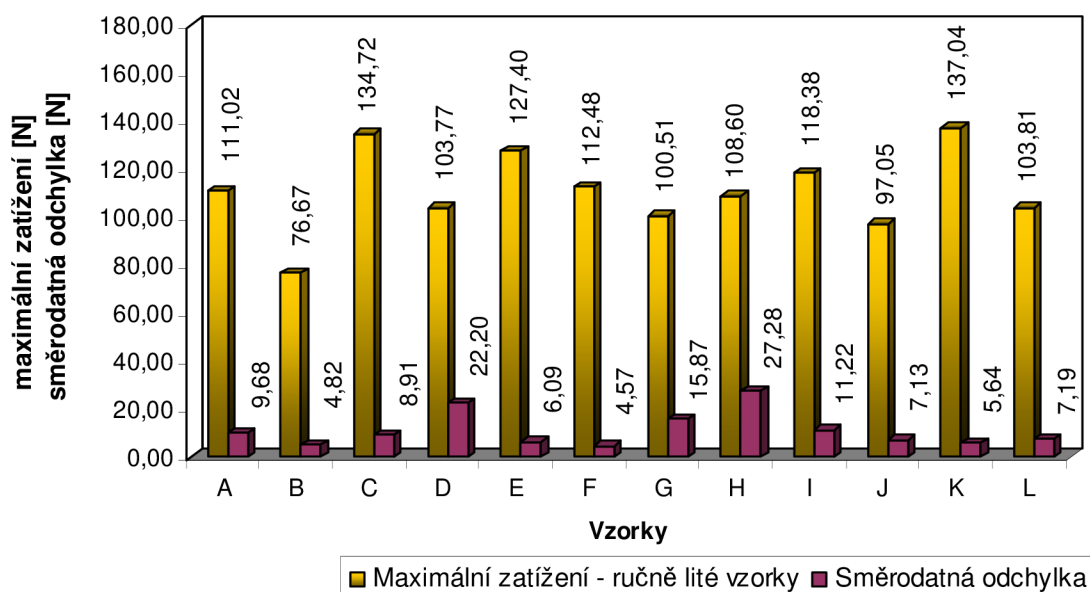


Obr. 2.11 Detail zatěžovacího na statickou zkoušku ohybem



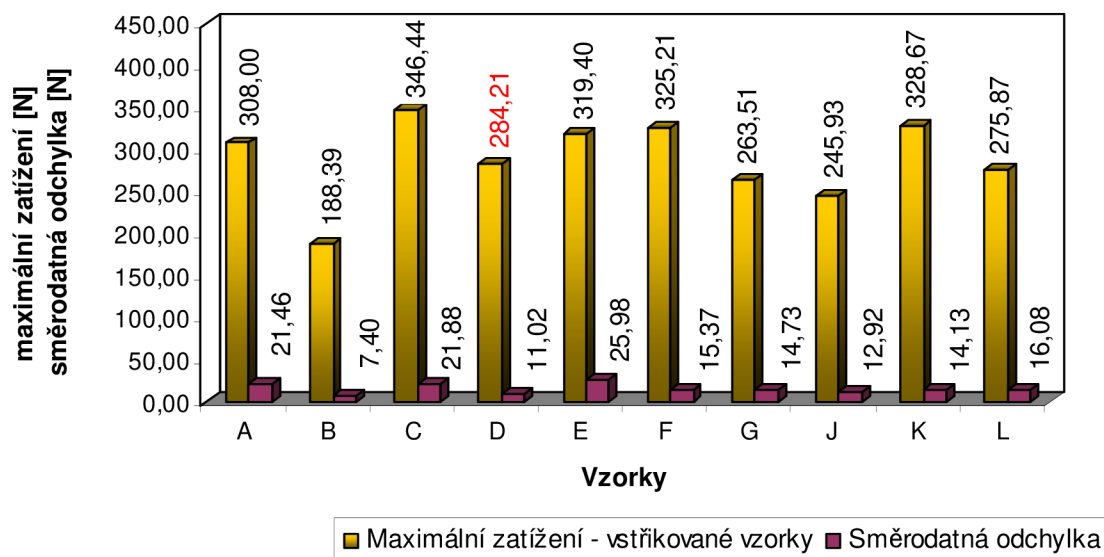
Obr. 2.12 Schéma statické zkoušky ohybem ( $a$  – šířka,  $b$  – výška,  $c$  – délka vzorku,  $L$  – vzdálenost podpor,  $W$  – zatížení)

### Maximální zatížení - ručně lité vzorky

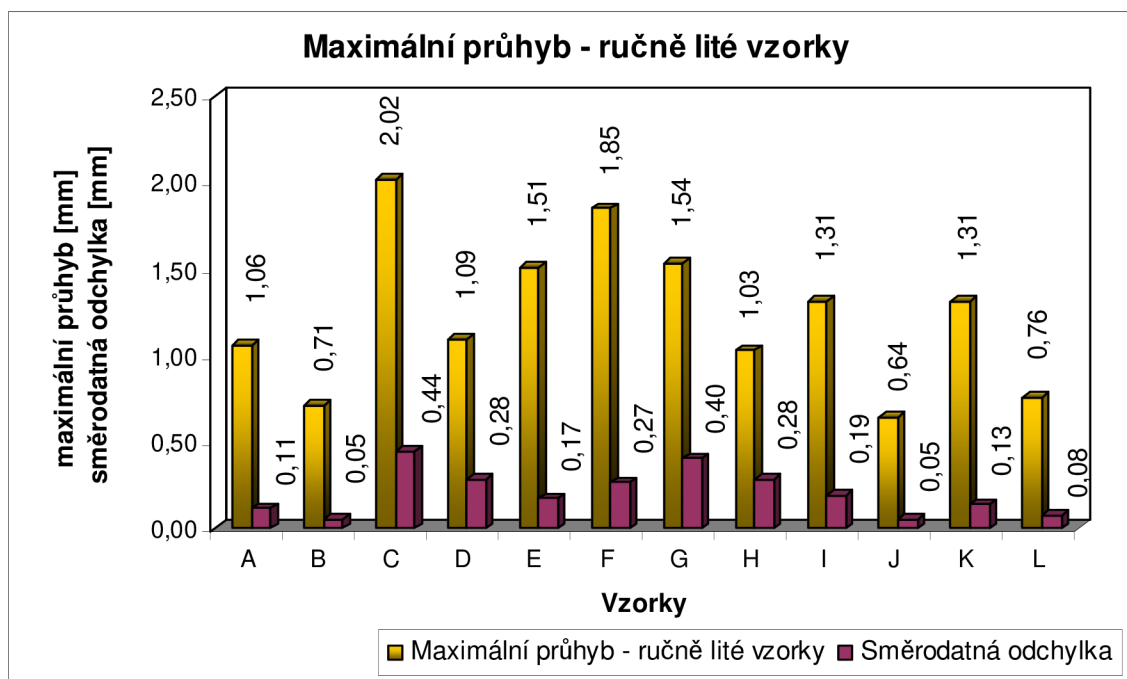


Graf 2.6 Maximální zatížení ručně odlitých vzorků.

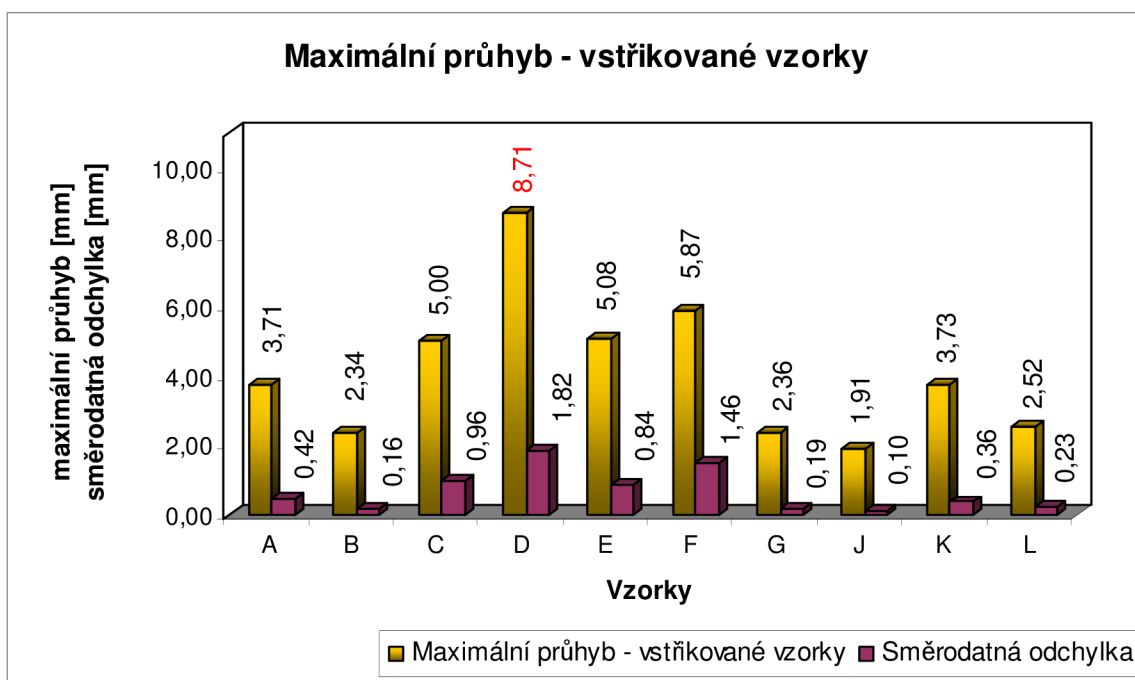
### Maximální zatížení - vstříkované vzorky



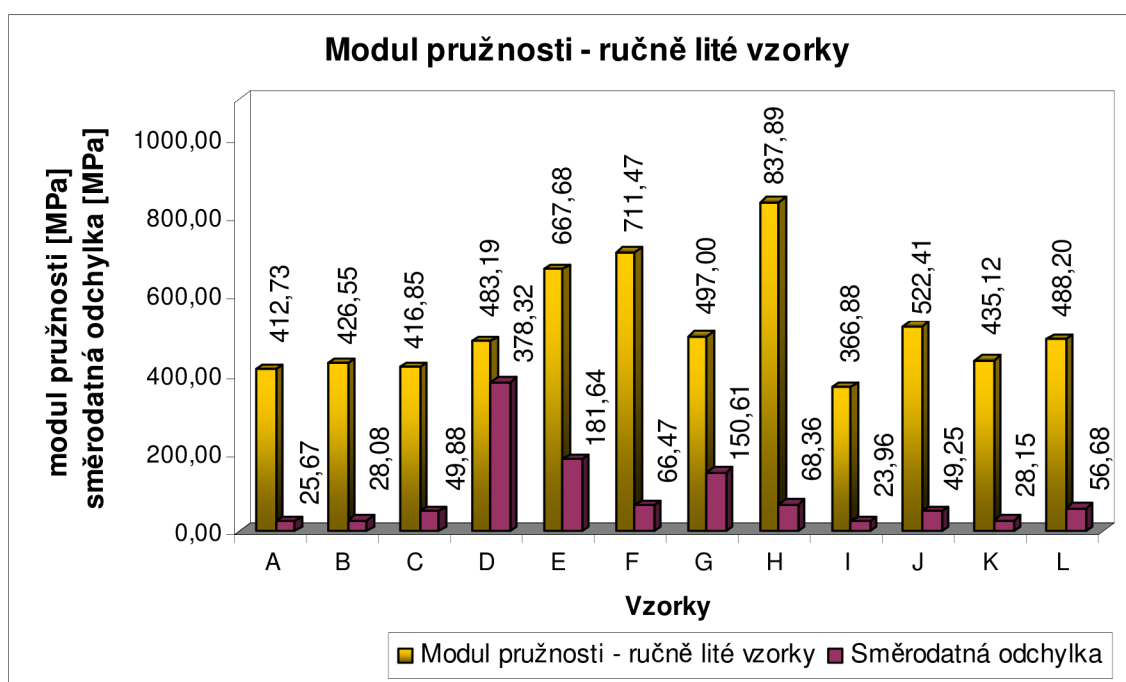
Graf 2.7 Maximální zatížení vstříkovaných vzorků



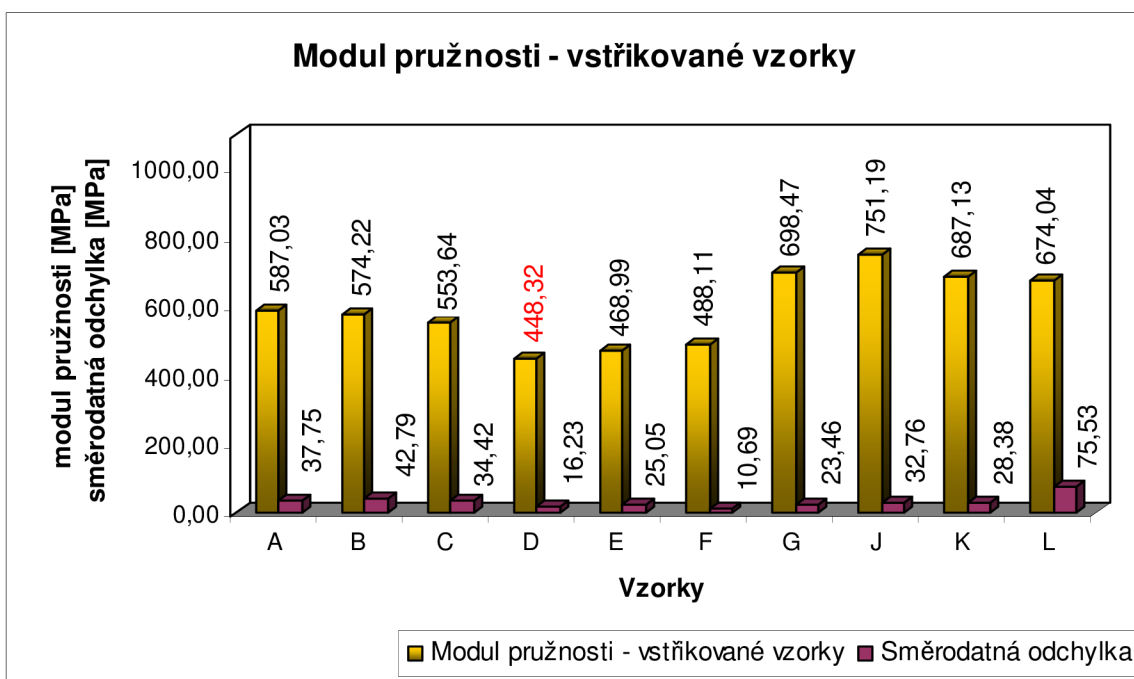
Graf 2.8 Maximální průhyb ručně litých vzorků



Graf 2.9 Maximální průhyb vstřikovaných vzorků

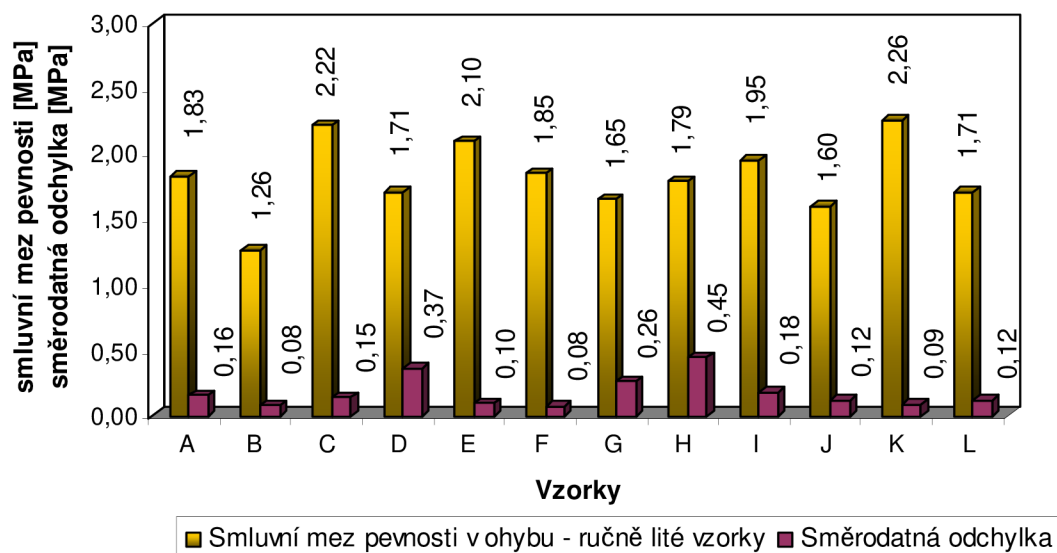


Graf 2.10 Modul pružnosti ručně litých vzorků



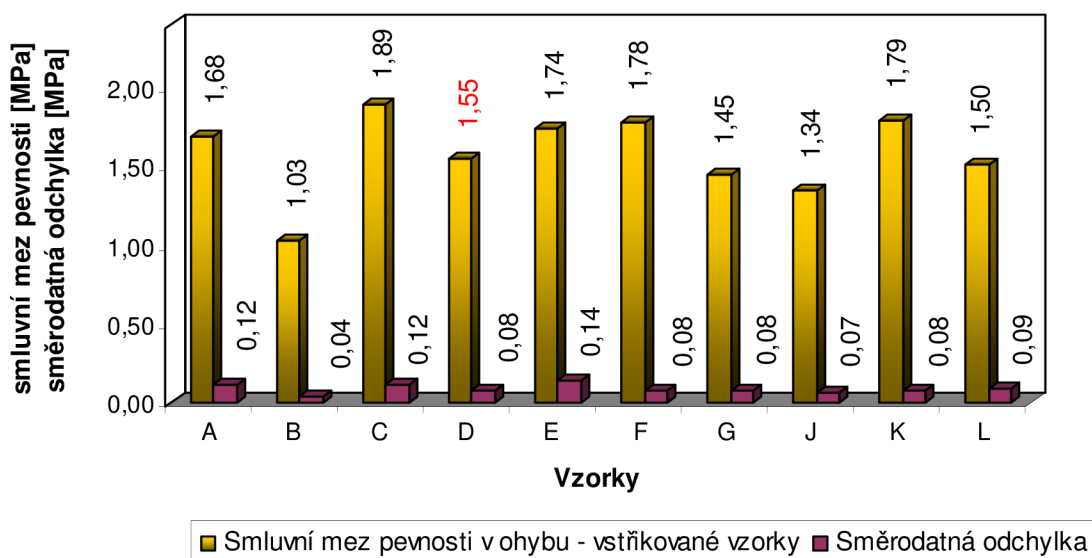
Graf 2.11 Modul pružnosti vstříkovaných vzorků

### Smluvní mez pevnosti v ohybu - ručně lité vzorky



Graf 2.12 Smluvní pevnost v ohybu ručně litých vzorků

### Smluvní mez pevnosti v ohybu - vstříkované vzorky



Graf 2.13 Smluvní pevnost v ohybu vstříkovaných vzorků

## G. Viskozita

### Postup měření:

1. Roztaveno 60 ml testovaného vosku a zahřáto na 85 °C.
2. Spuštěna externí pumpa na ohřívací kapalinu (destilovaná voda).
3. V počítači napojeném na viskozimetr Haake RotoVisco1 spuštěn program RheoWin, po jehož spuštění je obsluha dále vedena pokyny počítače.
4. Před plněním testovacího válce (obrázek 1.6) viskozimetru je nutno vosk dokonale promíchat a zahřát na teplotu 85 °C.
5. Testovací válec byl naplněn voskem až po kontrolní rysku.
6. Po ukončení testu došlo k automatickému uložení naměřených dat a zobrazení průběhu dynamické viskozity [Pa·s] na teplotě [°C].

### Nastavení viskozimetru:

- teplotní rozmezí: počáteční teplota  $T_s = 85$  °C, konečná  $T_f = 60$  °C
- rychlost ochlazování vzorku:  $5$  °C·min<sup>-1</sup>

### Vybavení:

- viskozimetr Haake RotoVisco1, pumpa na ohřívací kapalinu Thermo Haake C30P Heating Refrigerated Water Bath Circulator, počítač s programem RheoWin, rotor Z34 DIN
- skleněná kádinka (60ml), skleněný laboratorní teploměr, elektrický vaříč

### Výstup měření a zhodnocení:

Výstupem testu byly číselné údaje: čas [s], teplota [°C], dynamická viskozita [Pa·s]. Z naměřených dat byla odečtena dynamická viskozita pro bod tuhnutí a pro 70 °C.

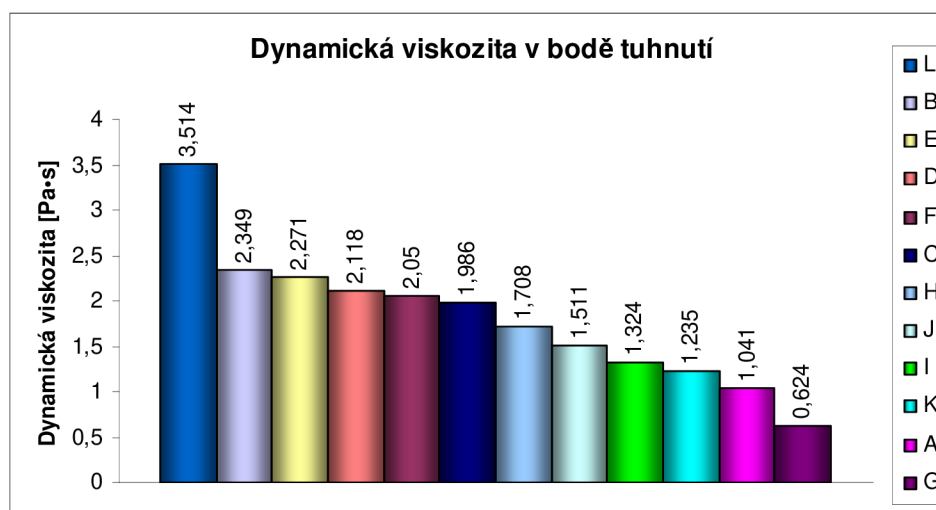
Měření proběhlo v rozmezí teplot 60–85 °C, protože tento rozsah zahrnuje jak teploty tuhnutí, popř. vstříkování, tak teploty skápnutí. Odečtené údaje pro grafy 2.14 a 2.15 jsou v tabulce v příloze 5.

Dynamická viskozita v bodě tuhnutí (graf 2.14) ukazuje jak je vosk „řidký“ nebo „hustý“ při teplotě velmi blízké vstříkovací. Při vysokých viskozitách, jako má např. vosk L, nehrozí zavalování vzduchu do vosku, popř. vad povrchu, ale může dojít k nezaběhnutí. Vysoká viskozita je pravděpodobně způsobena velkým obsahem plniva.

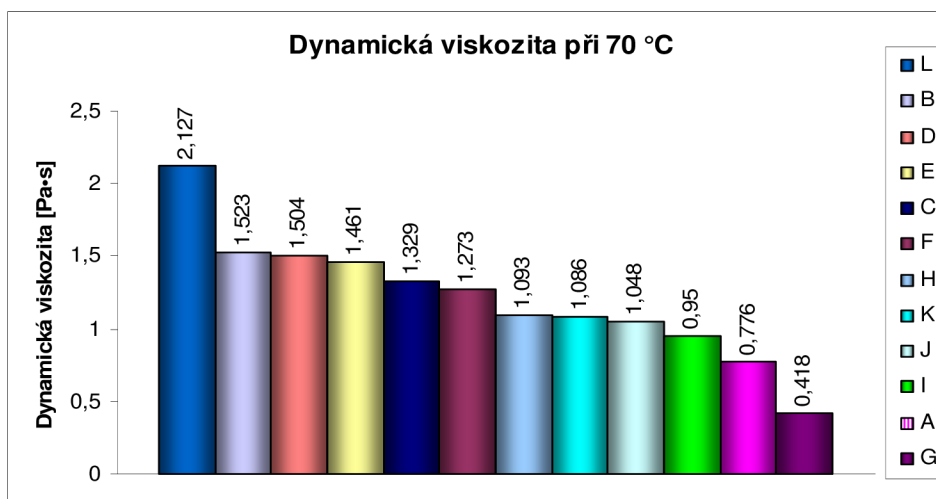
Měření při 70 °C (graf 2.15) výrazně nezměnilo pořadí naměřených viskozit. Z grafu 2.16 je patrné, že průběhy viskozit u vosků prakticky totožných (D, E, F) jsou podobné. Vtokový vosk G má nejnižší naměřenou viskozitu, což je nejspíše způsobeno nízkým obsahem plniva. U modelových vosků A a K se mohou při nízkých vstříkovacích teplotách vyskytovat povrchové vady typu „čáry tečení“, případně vzduchové bubliny, vzniklé zavířením vosku v matečné formě.

Průběhy dynamických viskozit ostatních vosků jsou uvedeny v grafu 2.17. Uvedené vykreslené průběhy jsou velmi dobrým pomocníkem při nastavování teploty vstříkování.

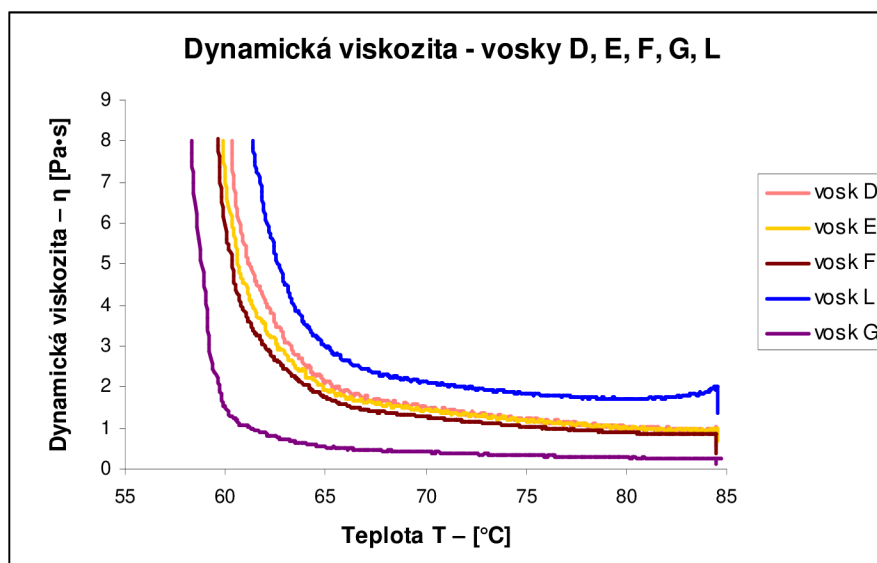




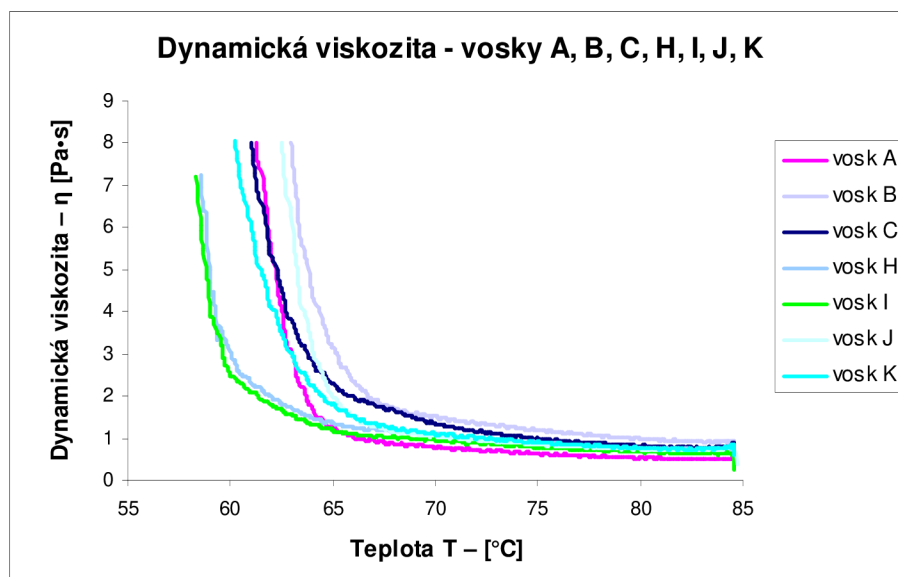
Graf 2.14 Hodnoty dynamické viskozity v bodě tuhnutí



Graf 2.15 Hodnoty dynamické viskozity při 70 °C



Graf 2.16 Průběhy dynamických viskozit vybraných vosků



Graf 2.17 Průběhy dynamických viskozit vybraných vosků

## H. Reologické vlastnosti – oscilace

### Postup měření:

1. Na elektrickém vařiči rozpuštěno zhruba 20 ml zkoumaného voskového vzorku.
2. Na Peltierovu plotýnku reometru (obrázek 1.7) TA Instruments AR G2 byl nalit dobře promíchaný voskový vzorek o teplotě 90 °C a na počítači připojeném k reometru spuštěn program Reology Advantage.
3. V programu byla zvolena vhodná měřící procedura a nastavena mezera mezi Peltierovou plotýnkou a vřetenem na hodnotu 1000  $\mu\text{m}$ . Teplota plotýnky byla nastavena na 90 °C a vynulována normálová síla na vřeteně. Dále obsluha pokračovala dle pokynů přístroje.
4. Po ukončení měření došlo automaticky k uložení naměřených dat.

### Nastavení zařízení:

- frekvence deformace: 1 Hz
- amplituda deformace: konstantní
- teplotní rozmezí: počáteční teplota  $T_s = 90\text{ °C}$ , konečná  $T_f = 40\text{ °C}$
- přesnost měření teploty:  $\pm 0,1\text{ °C}$ , měřeno platinovým odporovým teploměrem
- rychlost ochlazování vzorku:  $5\text{ °C}\cdot\text{min}^{-1}$
- kontrolovaná proměnná výchylka:  $5\cdot 10^{-5}\text{ rad}$
- mezera mezi rotorem a Peltierovým článkem: počáteční hodnota byla 1000  $\mu\text{m}$ , v průběhu měření je automaticky měněna v závislosti na velikosti normálové síly (od smrštění vosku).

### Vybavení:

- reometr TA Instruments AR G2 napojený na počítač s programem Reology Advantage,
- rotor s rovnou testovací plochou  $\varnothing 20\text{ mm}$ , kádinka 40 ml, laboratorní teploměr, vařič.

**Výstup měření a zhodnocení:**

Naměřené hodnoty (obrázek 2.21) elastického modulu  $G'$  [Pa], viskózního modulu  $G''$  [Pa], ztrátového úhlu  $\delta$  [°] a teploty  $T$  [°C] byly uloženy do formátu XLS. Pro hodnocení vosků byly ze všech naměřených údajů vybrány průběhy ztrátového úhlu, protože zahrnují jak údaj o  $G'$ , tak o  $G''$  (viz kapitola 1.3 – H) a velmi dobře charakterizují průběh přeměny z tekutého stavu na pevný v závislosti na teplotě.

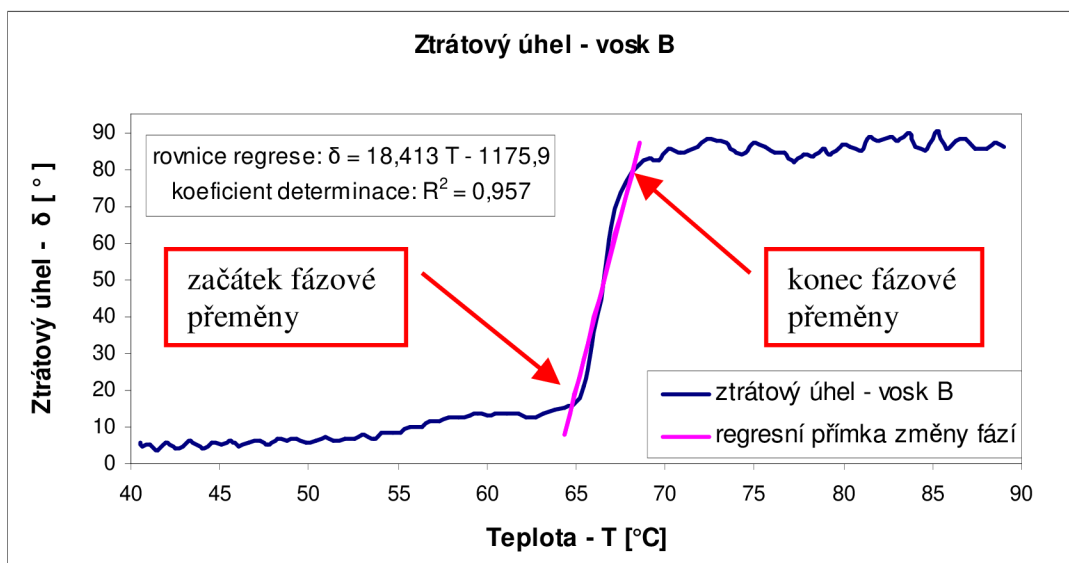
Cílem tohoto testu bylo porovnat průběh přeměny z tekuté na tuhou fázi. Porovnání může být provedeno jednoduše z vykreslených závislostí, nicméně toto porovnání je při dvanácti zkoušených voscích poměrně nepřehledné. Proto autor práce volil jinou metodu.

Z vykreslených závislostí je u každého vosku dobře znatelný začátek a konec fázové přeměny. U každého vosku byla tato část závislosti separována. Separovanými daty byla proložena regresní přímka taková, aby byl koeficient determinace  $\geq 95\%$ . Postup je patrný z grafu 2.18. Takto bylo zaručeno, že daná oblast grafu je s úspěšností větší než 95% popsána regresní přímkou. Z rovnic regresních přímek všech vosků byly vybrány směrnice a ty byly vzájemně porovnány viz graf 2.22. Větší hodnota směrnice přímky znamená rychlejší (strmější) fázovou přeměnu. Hodnoty směrnice přímky jsou vhodné pouze pro porovnání vosků mezi sebou. Závislosti ztrátových úhlů na teplotě pro jednotlivé vosky s lineární regresí oblasti změny fáze jsou uvedeny v podobě grafů v příloze 6.

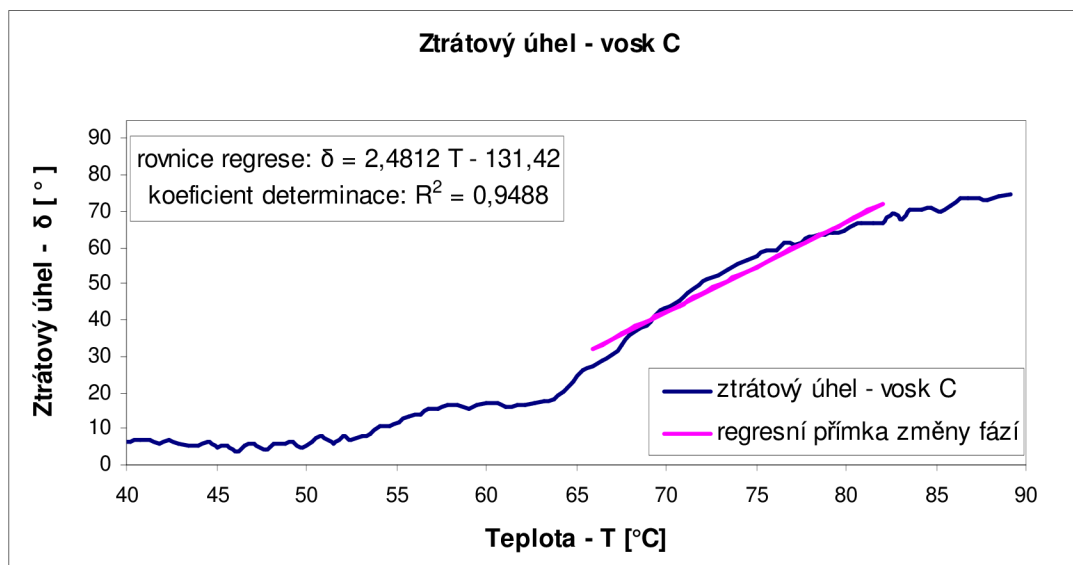
Měření ukázalo poměrně vyrovnané výsledky u většiny zkoušených vosků. Nejpomalejší fázovou přeměnou se vyznačoval vosk C viz graf 2.19. Díky pastovitému chování u takového vosku nehrozí zavalení vzduchových bublin při vstřikování a výslednou vnitřní homogenitu materiálu lze očekávat vyšší než u ostatních vosků. Na druhou stranu jsou u tohoto vosku hodnoty ztrátového úhlu při obvyklých vstřikovacích teplotách poměrně malé, což může vést k vadám, jakou je například nezaběhnutí. U vosku C lze očekávat nižší produktivitu. Druhým extrémem je vosk A, který se vyznačuje velmi razantní změnou fáze viz graf 2.20. Vlastnost je vhodná především pro vysokou produktivitu voskových modelů. Díky velmi rychlé změně fází lze očekávat vysokou tekutost vosku při nižších teplotách než je tomu u vosku C.

Naměřené údaje korespondují s údaji o bodu tuhnutí a skápnutí. Vosk A i C se vyznačuje stejnou hodnotou bodu tuhnutí (66 °C) a zcela odlišnou hodnotou bodu skápnutí:

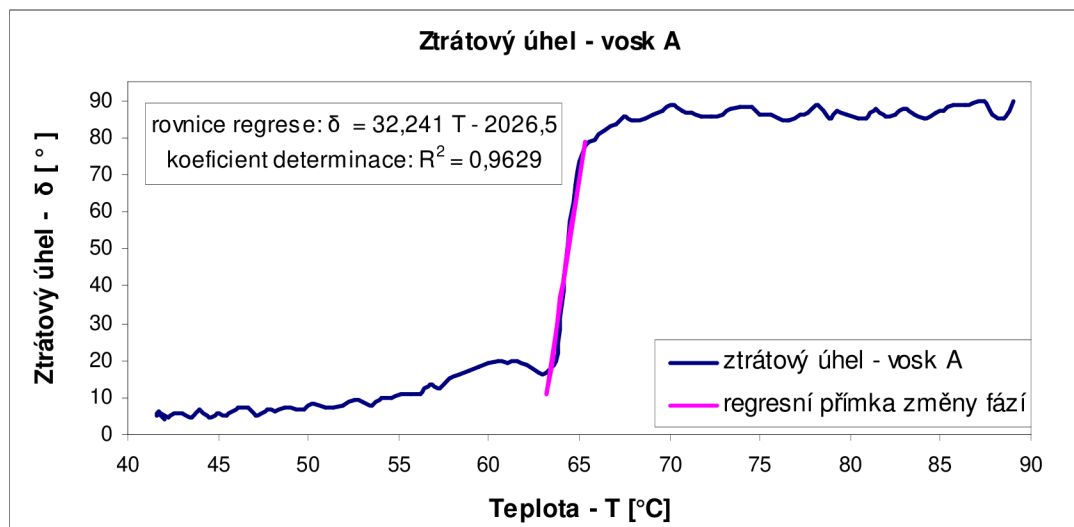
vosk A – 74,3 °C, vosk C – 81,8 °C. Zmíněné nevýhody obou vosků lze do jisté míry kompenzovat nastavením vstřikolisu. Jako ideální se jeví kombinace předchozích dvou příkladů, například vosk D, F, I, K, L. Poměrně rychlou fázovou přeměnu lze očekávat i u vtokového vosku G.



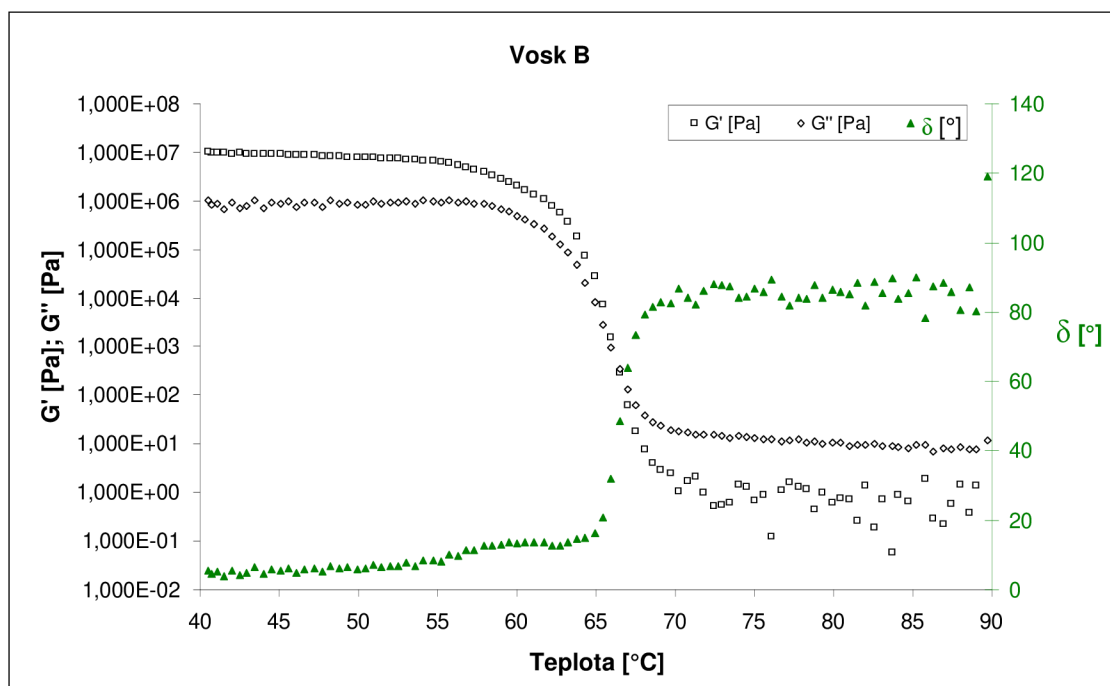
Graf 2.18 Příklad proložení regresní přímky oblastí změny fází u vosku B



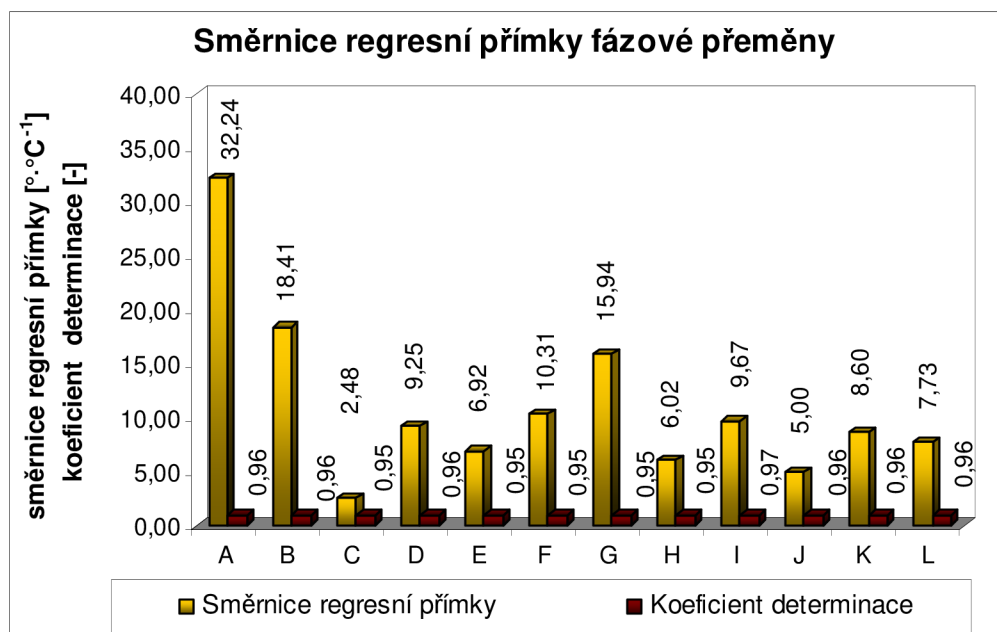
Graf 2.19 Průběh ztrátového úhlu u vosku s nejpomalejší naměřenou fázovou přeměnou



*Graf 2.20 Průběh ztrátového úhlu u vosku s nejrychlejší naměřenou fázovou přeměnou*



*Graf 2.21 Příklad naměřených dat elastické a viskózního modulu a z nich určeného ztrátového úhlu*



*Graf 2.22 Vyhodnocení rychlosti fázové přeměny*

## I. Diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC)

### Postup měření:

1. Zvážena ( $m_M$ ) prázdná zkušební miska viz obrázek 2.13.
2. Do prázdné zkušební misky přidán zkoušený vosk o váze zhruba 15,0 mg. Miska s voskem opět zvážena ( $m_{MV}$ ).
3. Vypočtena váha vosku ( $m_V$ ) podle vzorce:

$$m_V = m_{MV} - m_M \quad (2.3)$$

Kde:  $m_M$ ..... váha zkušební misky [mg]  
 $m_{MV}$  ..... váha zkušební misky se zkoušeným vzorkem [mg]  
 $m_V$  ..... váha vosku [mg]

4. Miska se zkoušeným vzorkem vložena do komory zařízení Mettler Toledo DSC 12 E (obrázek 2.14) na zkušební plotýnku vedle referenční misky (prázdná).
5. Na počítači připojeném k zařízení Mettler Toledo DSC 12 E spuštěn program Mettler Toledo.
6. V programu zvolena příslušná procedura měření a vyplněny parametry zkoušeného vzorku (váha, název, materiál) a spuštěna zkouška.
7. Po dokončení zkoušky došlo k automatickému uložení naměřených dat.

### Nastavení procedury:

- fáze izotermická: teplota: 25 °C, doba trvání: 300 s
- fáze ohřívací: počáteční teplota: 25 °C, konečná teplota: 120 °C, rychlost: 5 °C·min<sup>-1</sup>
- fáze ochlazovací: počáteční teplota: 120 °C, konečná teplota: 25 °C, rychlost: 5 °C·min<sup>-1</sup>

**Vybavení:**

- vodní pumpa na chlazení měřícího zařízení, hliníkové zkušební misky, Mettler ME-51119872, kalorimetr Mettler Toledo DSC 12 E, laboratorní váhy s nejméně 4 desetinnými místy

**Výstup měření a zhodnocení:**

Výstupem je grafická závislost (graf 2.22) tepelného toku na teplotě (tzv. termogram) v podobě izotermické, ohřívací a ochlazovací křivky. Z grafické závislosti tepelného toku v režimu zahřívání bylo pomocí programu Mettler Toledo určeno latentní teplo potřebné k natavení vosku. Údaj o latentním teple lze použít pro posouzení chování voskových směsí při vytavování ze skořepinové formy. Vosk s nižším latentním teplem se teoreticky nataví rychleji a uvolní tak napětí, vzniklé nárůstem objemu vosku uzavřeného ve skořepině. Uvolnění napětí je zajištěno proniknutím nataveného vosku do primárního obalu skořepiny, popř. je vytlačeno do vtokové soustavy. Dalším určeným údajem je teplota tavení (tzv. T-peak).

Grafické výstupy byly převedeny do formátu XLS a zjednodušeny do podoby osamocených křivek ohřívání (graf 2.23). V grafech je průběh tepelného toku znázorněn modrou čarou. Oblast pro určení latentního tepla je vymezena čarou zelenou. Průběh izotermické křivky nepodává žádné důležité informace a ochlazovací křivka byla laboratorními pracovníky společnosti Blayson označena za nespolehlivou. Latentní tepla a teploty tání jsou uvedeny v grafu 2.24. Průběhy tepelných toků pro jednotlivé vosky jsou uvedeny v podobě grafů v příloze 7.

Rozdíl mezi teplotou skápnutí a teplotou tavení byl konzultován s pracovníky firmy Blayson, kteří tento rozdíl považují za normální. Rozdíl je způsoben zcela odlišným způsobem měření. U metody měření teploty skápnutí musí nejprve dojít k nahromadění dostatečného množství vosku a až po jeho ukápnutí dojde k zaznamenání teploty. Rozdílné jsou taktéž rychlosti ohřívání vzorku a počáteční teplota.

Nejnižším latentním teplem se vyznačuje vosk L, což je dobrý předpoklad k bezproblémovému vytavení vosku. Vosky H a I mají velmi podobné teploty tání, ale odlišná latentní tepla. Rozdíl mohl být opět způsoben způsobem odebírání vzorků. Vosky D, E a F mají dle očekávání velmi podobné teploty tání. Latentní teplo u vosku F je mírně nižší. Nejvyšší hodnotu latentního tepla mají vtokové vosky G a H.



Obr. 2.13 Zkušební  
hliníková miska

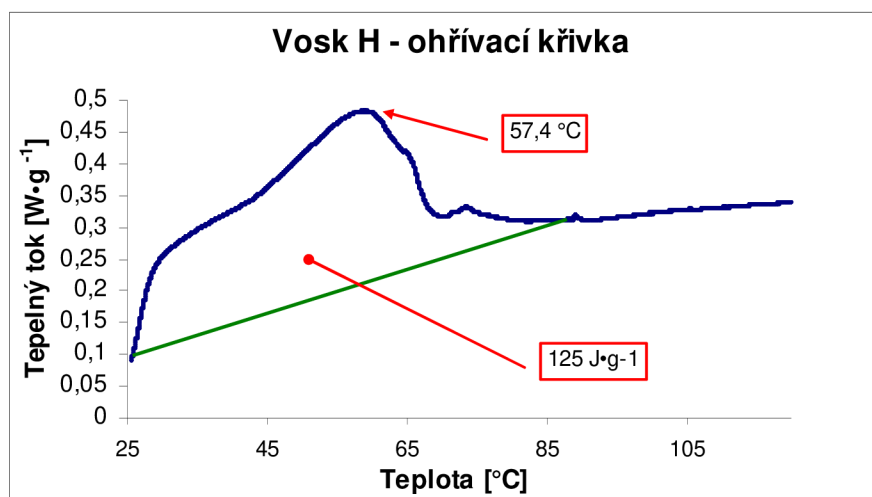


Obr. 2.14 Kalorimetr Mettler  
Toledo DSC 12 E

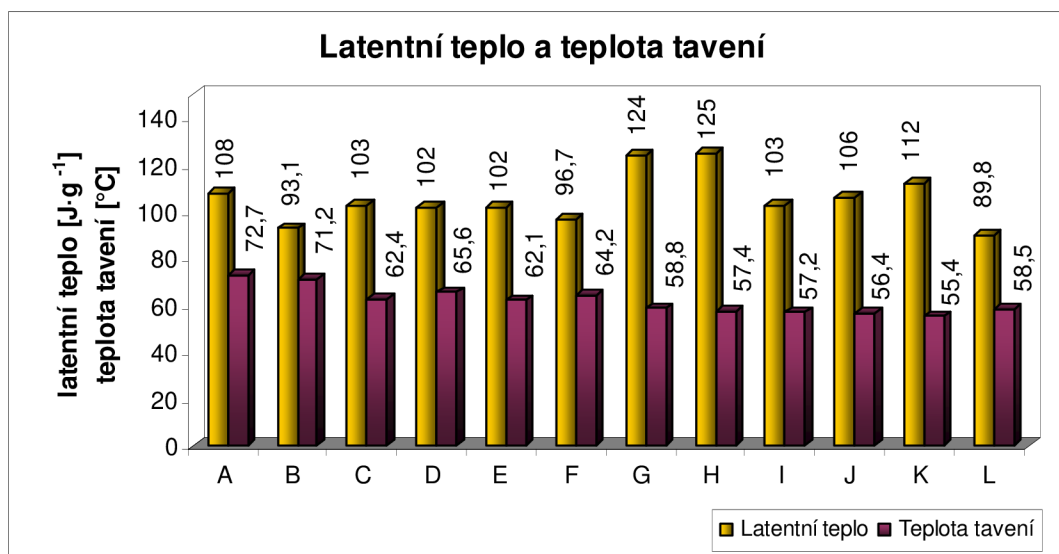




Graf 2.22 Výstup programu Mettler Toledo – termogram



Graf 2.23 Výstup programu Mettler Toledo



*Graf 2.24 Výstup programu Mettler Toledo*

#### J. Rozměrová analýza – smrštění

Měření volného smrštění proběhlo na tělesech, které byly pracovně označeny jako TT150 (testovací těleso délky 150). Vzorky byly zhotoveny a zkoušeny následovně:

##### Rozměr tělesa:

- těleso TT150: 150,05×55×10 mm.

##### Nastavení vstřikolisu:

- teplota vstřikovaného vosku: 68 °C; teplota formy: 30,0 ±0,5 °C
- tlak: 300 psi ~ 2068,43·10<sup>-3</sup>Pa
- zvolena maximální rychlost toku vosku
- doba vstřikování: 180 sekund pro těleso TT150
- výdrž na tlaku: 0,1 sekund

##### Postup měření:

1. Na vstřikolisu bylo zhotoveno 21 zkušebních těles TT150. Vstřikování provedeno při zadaných podmínkách viz výše. V případě potřeby byla forma očištěna prostředkem Trisol 60 Plus.
2. Odstráknutá tělesa ponechána po dobu 24 hodin na vzduchu v laboratoři při teplotě 21 °C.
3. Měřena byla délka tělesa (rozměr 150 mm ve formě pro těleso TT150). Měření bylo provedeno digitálním posuvným měřítkem Mytutoyo s rozlišitelností 0,01 mm.
4. Vyhodnocení proběhlo v programu Minitab16.

##### Vybavení:

- vstřikolisu MPI 55 Series C-frame, příslušná matečná forma, čisticí prostředek Trisol 60 Plus, posuvné měřítko Mytutoyo Digimatic 500-205 s rozlišitelností 0,01 mm, počítač s programem Minitab16

**Výstup měření a zhodnocení:**

Výstupem měření je 21 individuálních hodnot měřeného rozměru. Ze získaných hodnot byl v programu Minitab 16 vypočten aritmetický průměr, směrodatná odchylka a vykreslen histogram (graf 2.25). Test hrubých chyb nebyl proveden, rozdělení se předpokládá normální. Naměřená data jsou uvedena v tabulce v příloze 5.

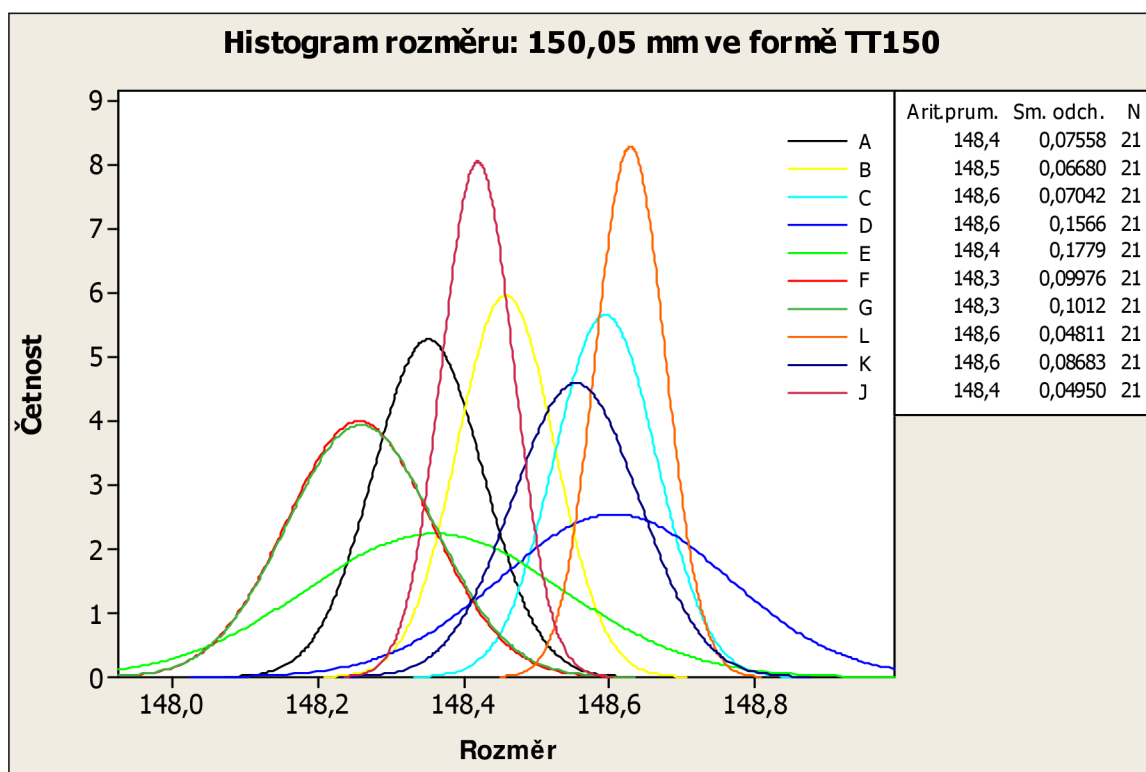
Základním předpokladem pro udržení nízké zmetkovitosti, způsobené neshodnými rozměry je co možná nejnižší variabilita rozměrů voskových modelů.

Z hlediska smrštění a vysoké opakovatelnosti výsledků se jeví jako ideální vosk L. Dalším velmi dobrým voskem je vosk J, který má sice vyšší smrštění než vosk L, nicméně směrodatnou odchylku má také velmi malou. Poměrně dobré výsledky podává i vosk B a C.

Vosky D, E a F, které by měly vykazovat stejné vlastnosti, jsou po stránce rozměrové naprosto odlišné. Pokud se takový rozdíl objeví mezi jednotlivými dávkami vosku od výrobce, je vysoce pravděpodobné, že se slévárně rapidně zvedne zmetkovitost.

Vosky G a F mají tak podobné výsledky, že se jejich histogramy prakticky překrývají.

Vyloženě špatné výsledky podává vosk E, jehož směrodatná odchylka je 3,7× vyšší než u vosku J.



Graf 2.25 Histogram rozměru testovacího tělesa pro jednotlivé vosky

### K. Objemová roztažnost

Měření proběhlo ve spolupráci se společností Blayson Japan. Autor práce se měření přímo neúčastnil. Princip měření je uveden v teoretické části (kapitola 1.3 - K).

Během zkoušek došlo k poruše zařízení při testování vzorku I a K a k nenávratné ztrátě naměřených dat.

#### Nastavení procedury[47]:

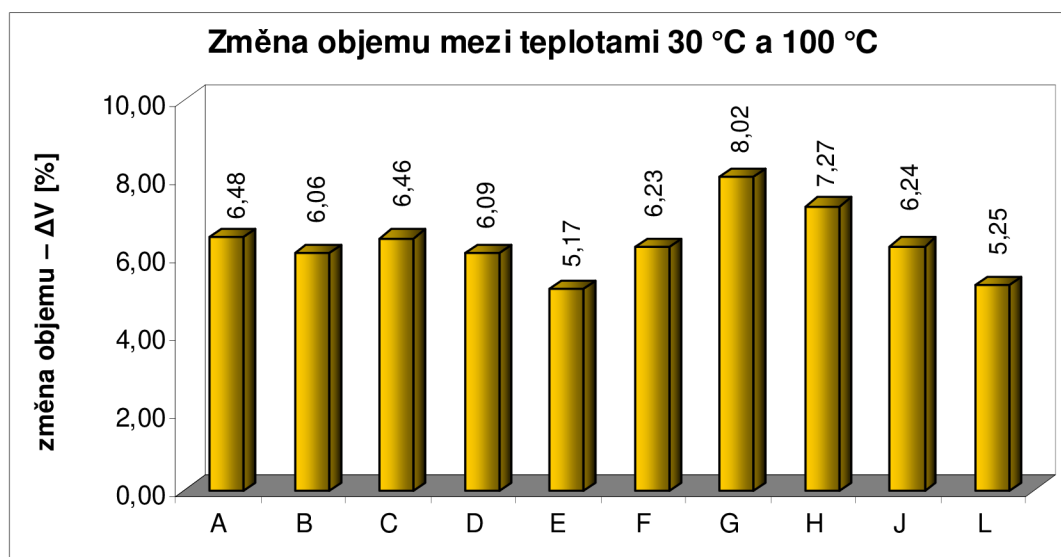
- fáze izotermická: teplota 30 °C, doba trvání 30 minut
- fáze ohřívací: počáteční teplota: 30 °C, konečná teplota: 112 °C, rychlost ohřevu: 0,2 °C·min<sup>-1</sup>

#### Výstup měření a zhodnocení:

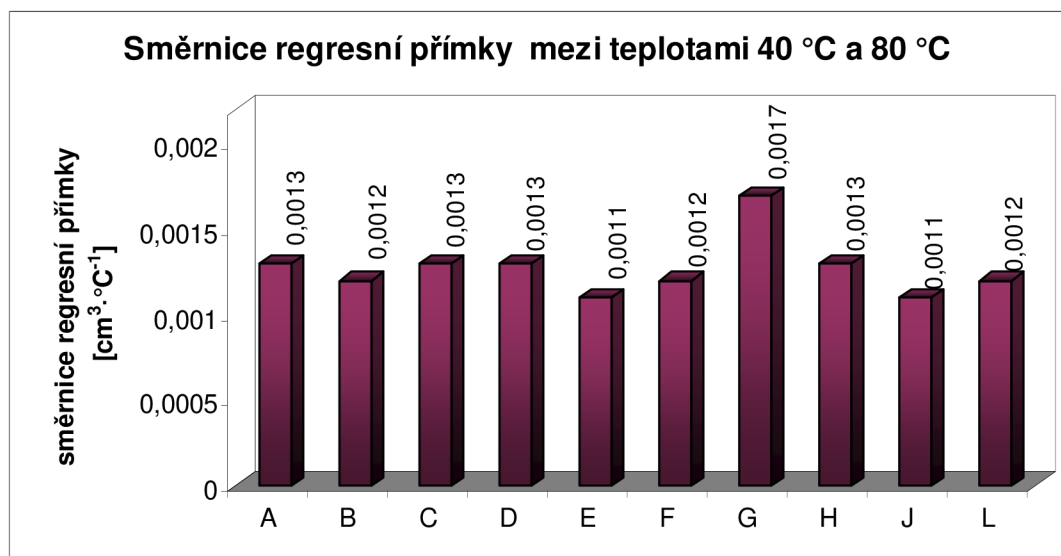
Obdržené výsledky obsahovaly data ve formátu XLS, která byla zpracována dle pokynů pracovníků laboratoře společnosti Blayson. Prvním vyhodnocovaným údajem je směrnice regresní přímky průběhu změny objemu mezi teplotami 40 a 80 °C. Mezi těmito teplotami probíhá fázová přeměna – tavení. Velikost směrnice popisuje, jak strmá je změna objemu na teplotě. Strmější změna znamená rychlejší změnu objemu, tedy i rychlejší fázovou přeměnu [47]. Druhý údaj je změna objemu  $\Delta V$  mezi teplotami 30 °C a 100 °C. Závislosti změny objemu na teplotě jsou uvedeny v příloze 8. Velikosti směrnice regresních přímek a změn objemů jsou uvedeny v grafech 2.26 a 2.27.

Praskání skořepin je díky malé objemové změně nejméně pravděpodobné u vosku L a E. Mezi vosky E a F, které by měly mít prakticky stejné vlastnosti, byl zaznamenán rozdíl 1,14 %. Výsledky potvrzují pozitivní vliv plniva na objemovou roztažnost. U vosku G s obsahem plniva 13,5 % došlo ke změně objemu o zhruba 3 % vyšší než u vosku L, který obsahuje 39,1 % plniva.

Největší směrnici vykazuje vosk G. Ostatní vosky při hodnocení tohoto měření podávají poměrně vyrovnaný výkon. Rozdíly mezi určením rychlosti fázové přeměny pomocí reologie a změny objemu vedou autora práce k názoru, že použitá metodika není dostatečně přesná. Průběhy zhruba korespondují, ale u vosků A a C nebyly zaznamenány takové rozdíly jako na v grafu 2.22.



Graf 2.26 Velikost změny objemu jednotlivých vosků mezi teplotami 30 °C a 100 °C



*Graf 2.27 Velikost směrníc regresních přímek změny objemu mezi teplotami 40 a 80 °C*

## L. Zkouška zabíhavosti

### Postup měření:

Na vstříkolisu provedeno 15 zkušebních odstříknutí pro každý typ vosku. Vstříkování proběhlo při zadaných podmínkách viz níže. Forma nesmí být ošetřena žádným separačním prostředkem.

Hodnoty zaběhnutí vosku odečteny okamžitě po odstříknutí a otevření formy.

Vyhodnocení proběhlo v programu Minitab16.

### Nastavení vstříkolisu:

- teplota vstříkovaného vosku: 68 °C; teplota formy: 30,0 ±0,1 °C
- tlak: 300 psi ~ 2068,43 kPa
- maximální rychlost toku vosku
- doba vstříkování: 30 sekund
- výdrž na tlaku: 0,1 sekund

### Vybavení:

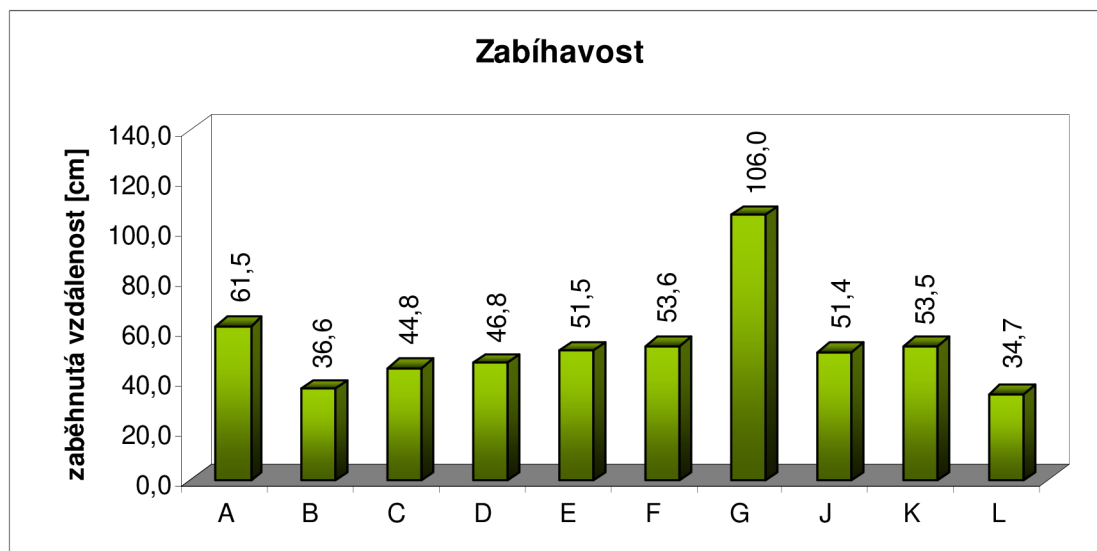
- vstříkolis MPI 55 Series C-frame, příslušná matečná forma (viz obrázek 1.11 – forma Blason), počítač s programem Minitab16

### Výstup měření a zhodnocení:

Ze získaných hodnot byl vypočítán aritmetický průměr v programu Microsoft Excel a vytvořen graf 2.28. Rozlišitelnost stupnice na spirále byla 5 mm.

Nejvyšší zabíhavost byla naměřena u vtokového vosku G, který má nejmenší obsah plniva ze zkoušených vosků. Druhá největší zabíhavost byla zjištěna u modelového vosku A. Nejnižší zabíhavost má modelový vosk L s nejvyšším obsahem plniva. U vosku L lze při tomto nastavení vstříkovacích parametrů očekávat problémy s nezaběhnutím. Druhý nejméně zabíhavý vosk je modelový vosk B.

Obdržené výsledky by se zcela jistě zvýšily při navýšení vstříkovacího tlaku a teploty.



*Graf 2.28 Průměrné zaběhnuté délky ve formě*

### 2.2.2 Vyhodnocení laboratorních zkoušek

Laboratorní zkoušky mohou jen těžko suplovat zkoušky poloprovozní a provozní. Jisté však je, že na základě laboratorních zkoušek lze získat poměrně dobrou představu o chování vosků v prostředí slévárny.

- teplota skápnutí – nebyly odhaleny odchylky od předepsaných hodnot. Hodnoty bodu skápnutí samy o sobě nepodávají žádnou zásadní informaci. Hodnoty obdržené měření lze použít při výběru vtokového vosku.
- bod tuhnutí – hodnoty lze použít při nastavení vstřikovacích teplot. U vosku C byla zjištěna odchylka od hodnoty předepsané výrobcem.
- obsah plniva – u všech vosků byl splněn výrobcem předepsaný obsah plniva. U vosku L lze díky nejvyššímu obsahu plniva očekávat vynikající rozměrovou stálost, malou objemovou roztažnost a vysokou viskozitu. U vosku G lze očekávat největší objemovou roztažnost a viskozitu velmi nízkou.
- obsah popela – měření bylo odhaleno zdroje nečistot ve skořepinách zmíněný v úvodu experimentální části. Regenerace ve slévárně není schopna dostatečně účinně zbavit vosk nečistot. Vosky H a I by neměly být dále užívány bez lepšího přefiltrování. Vtokový vosk G obsahuje vyšší obsah popelovin než je doporučené maximum. Pro vysoce jakostní odlitky tento vosk nelze doporučit. Nejnižší obsah popela má vosk L, který splňuje předepsané hodnoty se značnou rezervou.
- penetrace – hodnoty penetrace se od předepsaných hodnot liší kvůli odlišné metodice zkoušení. Na základě rozdílných výsledků mezi vosky E, D a F, lze konstatovat, že se jednotlivé výrobní dávky od tohoto výrobce liší. Rozdíl se projeví zejména při rozměrové analýze.

- mechanické vlastnosti – z hlediska variability výsledků a modulu pružnosti mají nejlepší výsledky vosky L, J, K a G. Vosk B má nízkou směrodatnou odchylku u všech výsledků, ale poměrně malou pevnost. Údajně stejné vlastnosti vosků D, E a F nebyly prokázány.
- viskozita – při měření viskozity se potvrdil fakt, že obsah plniva zvyšuje její hodnota. Nejlepší zabíhavostí a pravděpodobně největším sklonem ke vzniku vad budou charakteristické vosky A, K a G, které mají viskozitu nejnižší. U vosku L lze očekávat problémy se zabíhavostí, které však lze upravit zvýšením vstřikovacího tlaku. U vosku L se s velkou pravděpodobností objeví jen malé procento vnitřních a povrchových vad. Průběhy viskozit u vosků D, E a F jsou téměř totožné.
- reologické vlastnosti – nejrychlejší změnu mezi tekutou a pevnou fází můžeme očekávat u vosku A, který se proto hodí pro vysokou produktivitu modelů. Opakem vosku A je vosk C s velmi pozvolnou změnou. Vosk G splňuje požadavky na vtokový vosk, tedy rychlou změnu mezi pevným a tekutým stavem.
- diferenciální skenovací kalorimetrie – nejnižší hodnotu latentního tepla má vosk L. Lze tedy očekávat rychlé natavení tenké vrstvy vosku při vytavování ze skořepiny. Podobně je na tom i vosk B. Nízká hodnota latentního tepla u vosku L je nejspíš způsobena vysokým obsahem plniva. Nejvyšší hodnotu mají vosky G a H.
- rozměrová analýza – výsledky potvrdily obavy, týkající se rozdílné rozměrové stálosti mezi vosky D, E a F. Mezi jednotlivými dávkami jsou znatelné rozdíly ve smrštění. Nejstabilnější výsledky podávají vosky L, J a B.
- objemová roztažnost – nejmenší, a tedy nejlepší objemovou roztažnost má vosk E a L. Vosky D, E a F se opět liší. Rozdíl v objemové roztažnosti mezi jednotlivými výrobními dávkami může vést k neočekávanému praskání skořepin. Vosk G má díky nízkému obsahu plniva nejvyšší objemovou roztažnost. Opět se potvrdila závislost na obsahu plniva.
- zkouška zabíhavosti – nejnižší zabíhavost byla zjištěna u vosku L, což potvrzuje měření viskozity. Stejně tak vosk s nejnižší viskozitou má zabíhavost nejlepší. Nutno podotknout, že výsledky značně závisí na nastavení vstřikovacích parametrů.

#### **Doporučení voskové směsi na základě laboratorních zkoušek**

Na základě výše zmíněných výsledků lze jako ideální vosk pro potřeby slévárny Fimes, a.s. označit vosk L. Tento vosk má velmi nízký obsah popela, velmi dobré a vyvážené mechanické vlastnosti.

Rozměrovou analýzou byla zjištěna minimální směrodatná odchylka výsledků. Další nespornou výhodou, kterou lze u tohoto vosku očekávat je malý sklon k praskání skořepin. Tento závěr je podložen výsledky z měření latentního tepla a objemové roztažnosti.

Jediným a snadno řešitelným problémem je malá zabíhavost. Řešením je zvýšení vstřikovacího tlaku, popř. teploty.

Jako „horší“ alternativu tomuto vosku lze volit vosky J, B a A.



## 2.3 Poloprovozní zkoušky – slévárna Fimes, a.s.

Cílem poloprovozních zkoušek je podrobit zkoumané směsi rozměrové analýze v podmínkách slévárny a určit nejvhodnější modelový vosk. Vybraný vosk by měl nahradit stávající problémovou modelovou směs.

Mezi hlavní požadavky patří vysoká rozměrová stabilita, malá variabilita výsledků při jednotném nastavení vstřikovacích parametrů, malá objemová roztažnost a dobré mechanické vlastnosti. Dalšími požadavky jsou: minimální rozdíly mezi jednotlivými dávkami od výrobce, tvarová stálost.

### Zkoušené voskové směsi

Rozměrové analýze na zkušebním tělese Fimes byly podrobeny vybrané modelové směsi, shodné se směsmi z laboratorních zkoušek (kapitola 2.2). Do výběru směsí patřila většina modelových vosků: A, B, D, J a L. Vosky E a F byly v době poloprovozních zkoušek dostupné v malém množství, proto byl zkoušen pouze jejich ekvivalent D. Důvodem testování vosku D bylo také porovnání stávajícího (problematického) vosku s vosky ostatními. Poloprovozní zkoušení vtokového vosku G postrádalo smysl, protože slévárna potřebovala primárně změnit vosk modelový. Použité vosky na vtoky H a I byly ze zkoušek vyloučeny kvůli enormnímu obsahu popelovin. Modelová směs C byla vyloučena kvůli velmi rychlé sedimentaci plniva, pomalému tuhnutí směsi a stížnosti pracovníků slévárny na obtížnost vyjímání modelů z matečných forem bez jejich porušení.

K výše zmíněným směsím byly pro účely rozměrových zkoušek přidány další 2 směsi, které představovaly alternativu od výrobců vosků B, D a J, L. Tyto směsi byly označeny jako D+ a L+. Směsi lze charakterizovat následovně:

- směs D+ odpovídá smíchání 40 % vosku B a 60 % vosku D – poměr byl určen slévárnou na základě dlouholetých zkušeností s těmito vosky
- směs L+ odpovídá smíchání 20 % vosku J a 80 % vosku L – poměr byl stanoven po konzultaci výrobce vosků a slévárny. V případě, že by slévárna přešla na voskové směsi od výrobce vosku J a L, bylo by nutné kompenzovat 20% ztrátu vosku při důkladné rekonstituci. Ztracený vosk by byl doplněn voskem panenským o parametrech vosku J.

Míchání panenského a rekonstituovaného vosku by mělo zaručit lepší rozměrovou stabilitu, menší rozměrovou variabilitu a nižší obsah popela při udržení příznivé ceny.

### 2.3.1 Poloprovozní zkoušky

Poloprovozní zkoušky byly rozděleny do dvou částí. Jako první proběhla rozměrová analýza na zkušebním tělese „Fimes“ (obrázek 1.7). Na základě této analýzy byly vybrány modelové vosky, které měly být podrobeny rozměrové analýze na konkrétním modelu rozměrného odlitku „AOA“

#### A. Zkoušky na zkušebním tělese

K rozměrové analýze se tělesa užívají proto, že je pracováno s malým objemem vosku a poměrně jednoduchou matečnou formou. Výroba je tedy velmi rychlá.

Měření na zkušebních tělesech je pohodlnější a snáz proveditelné než na modelu odlitku, který bývá často velmi komplikovaný. Při měření zkušebního tělesa si pracovník vystačí s posuvným měřidlem.

Na zkušebních tělesech lze pozorovat i sklon vosku k deformování (změn geometrie v důsledku smršťování).

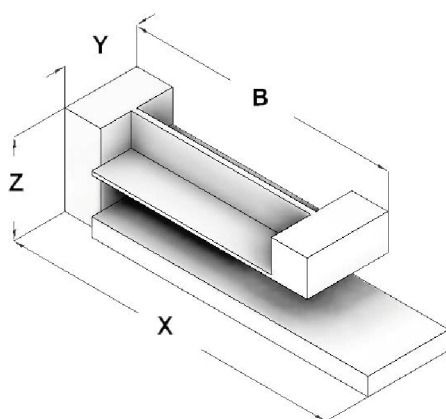
Zkušební těleso „Fimes“ bylo zvoleno z důvodu dostupnosti matečné formy a již zaběhnuté praxe s tímto tělesem.

### Zkušební těleso, výroba zkušebního tělesa a měření

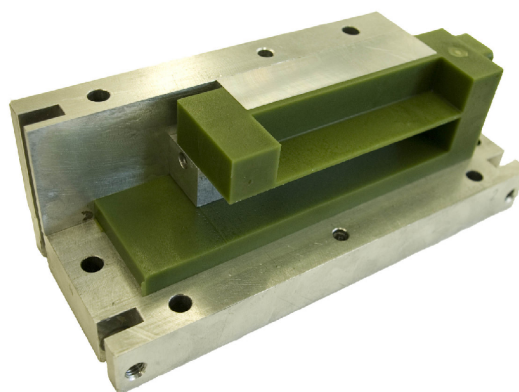
Rozměry hodnocené na zkušebním tělese (obrázek 2.15) mají v matečné formě hodnoty uvedené v tabulce 2.2:

Rozměry v matečné formě zkušebního tělesa			
rozměr X [mm]	rozměr Y [mm]	rozměr Z [mm]	rozměr B [mm]
176,90	40,60	50,92	141,79

Tab. 2.2 Rozměry v matečné formě zkušebního tělesa [27]



Obr. 2.15 Náčrt zkušebního tělesa „Fimes“ s vyznačenými rozměry



Obr. 2.16 Zkušební těleso v částečně rozložené formě

Zkušební tělesa byla zhotovena opakovaným vstřikováním na vstřikolisu Shell-O-Matic 35T (uzavírací síla 34 tun). Vstřikování probíhalo bez přestávky, aby byl co nejméně simulován režim běžné formy ve výrobě [27].

Parametry vstřikování byly pro všechny voskové směsi totožné. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.3. Forma byla podle potřeby ošetřena dělicím přípravkem na nesilikonové bázi Fast2Shell od firmy Remet. Ošetření proběhlo zhruba po každém pátém odstříknutém tělese.

Parametry vstřikování pro zkušební tělesa			
tlak [bar]	průtok [dlíků]*	doba vstřiku a dotlaku [s]	teplota [°C]
20,0	250,0	40,0	64,0

\*V manuálu vstřikolisu nejsou uvedeny jednotky.

Tab. 2.3 Parametry vstřikování pro zkušební tělesa [27]

Na tělesech byly přeměřeny rozměry zakótované v obrázku 2.15. Měření proběhlo vždy 96 hodin po odstříknutí. Tato doba přibližně odpovídá době, po které jsou modely běžně používány pro obalování. U vosku D+ a L+ proběhlo měření i po 24 hodinách. Druhé

měření mělo za cíl zjistit změnu rozměru modelu po dalších 48 hodinách. Po tuto dobu byla zkušební tělesa umístěna v klimatizované místnosti s teplotou vzduchu 23 °C. Měření bylo provedeno posuvným měřítkem Mitutoyo CDN-P30C.

Při sevření měřeného rozměru posuvným měřidlem docházelo k jisté deformaci voskového tělesa. Pro větší objektivitu by bylo vhodné měření provádět na dotykovém 3D měřicím zařízení, popř. na zařízení bezdotykovém (optickém).

Počet měření bohužel nebyl pro každý vosk totožný. Zhotovení zkušebních těles bylo prováděno za plného provozu slévárny, tudíž se počet měření pohybuje mezi 10 a 30 měřeními. Veškeré naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách v příloze 9.

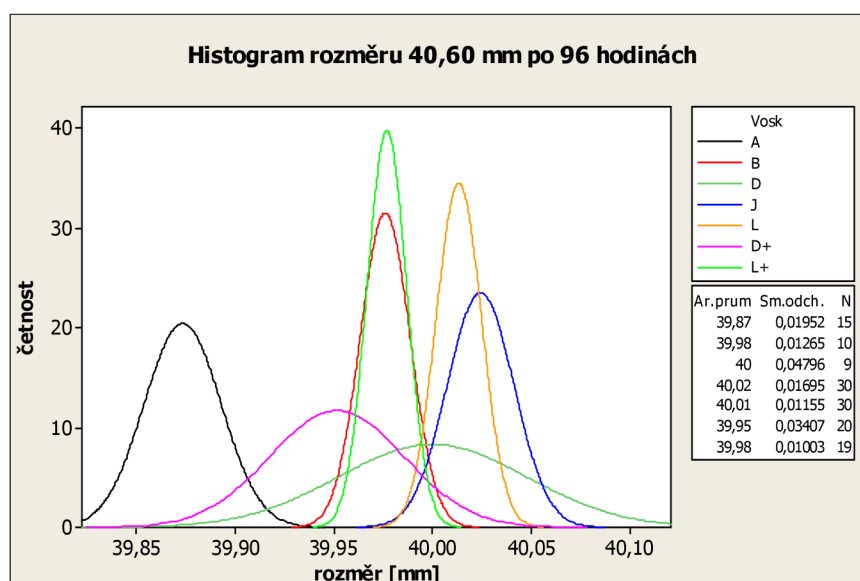
### **Technologické vlastnosti a rozměrová analýza**

Chování vosku při vyjímání z matečné forem a další manipulaci lze hodnotit následovně [27]:

- Vosk A – práce s voskem byla bezproblémová. Voskový model se nelepil k formě. Jednoduše se hrotoval a pleny se nevyštípaly do tvaru modelu. Manipulační pevnost a pružnost byla dobrá.
- Vosk B – práce s voskem byla bezproblémová. Voskový model se nelepil k formě. Jednoduše se hrotoval a pleny se nevyštípaly do tvaru modelu. Problémem byla enormní pružnost vosku i několik minut po vytažení z formy. Tato vlastnost je problémem při výrobě přesných voskových modelů.
- Vosk D – práce s voskem byla bezproblémová. Voskový model se nelepil k formě. Jednoduše se hrotoval a pleny se nevyštípaly do tvaru modelu. Manipulační pevnost a pružnost byla dobrá.
- Vosk J – práce s voskem byla bezproblémová. Voskový model se nelepil k formě. Hrotování bylo obtížnější, protože se hrotované pleny zalamovaly do tvaru voskového modelu. Manipulační pevnost a pružnost byla dobrá.
- Vosk L – práce s voskem byla bezproblémová. Voskový model se nelepil k formě. Jednoduše se hrotoval a pleny se nevyštípaly do tvaru modelu. Manipulační pevnost a pružnost byla velmi dobrá.
- Vosk D+ – shodné hodnocení s voskem D. Vosk D+ má vyšší pružnost.
- Vosk L+ – hodnocení viz vosk L.

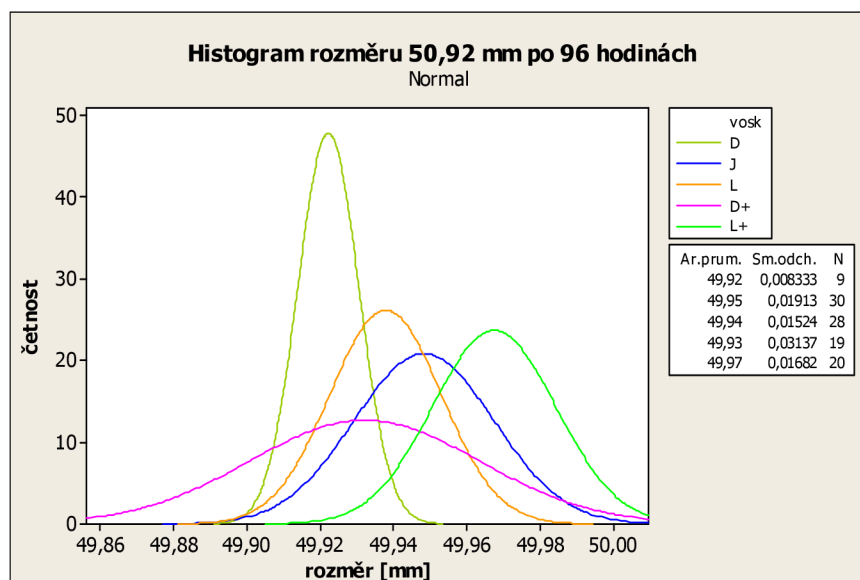
Naměřené rozměry pro rozměrovou analýzu byly zpracovány v programu Minitab 16 do podoby histogramů. V histogramech (graf 2.28-2.34) je také uvedena průměrná hodnota měřeného rozměru pro daný vosk a její směrodatná odchylka.

Na datech byl proveden Grubbsův test hrubých chyb ( $\alpha=0,05$ ). Odhalení hrubých chyb (odlehklých hodnot) proběhlo bez určení typu rozdělení, předpokládalo se normální. Problematika byla konzultována s výzkumnými pracovníky společnosti Blayson, kteří metodiku považují za správnou a mezi výrobci vosku za standardní.



Graf 2.28 Histogram rozměru Y na zkušebním tělese

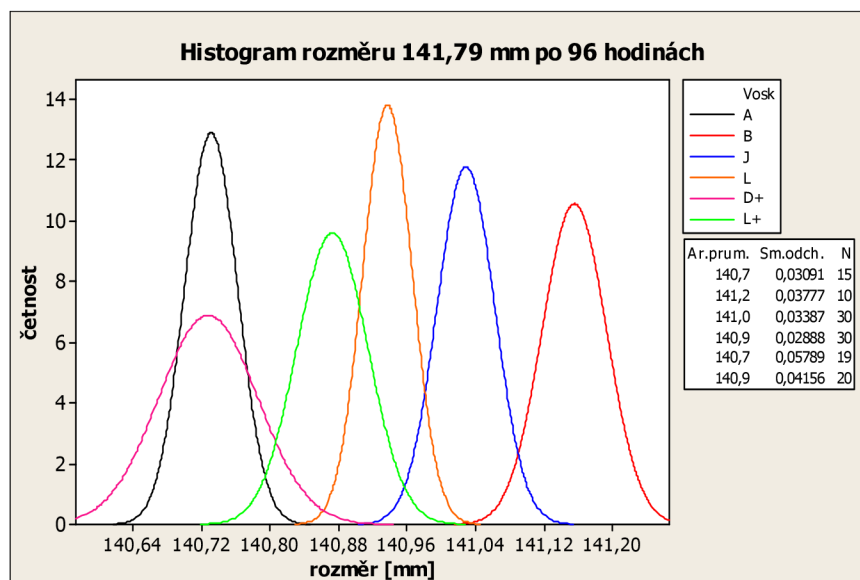
Na histogramu (graf 2.28) nejmenšího měřeného rozměru se potvrdil výsledek z laboratorního měření, ve kterém podává vosk A největší smrštění. Nejplošší křivku má vosk D, což je společně s největší směrodatnou odchylkou znakem nejvíce rozptýlených hodnot. Tento výsledek je ve shodě s tvrzením slévárny, že vosk nepodává konstantní výsledky. Nejmenší smrštění bylo zjištěno u vosku L, který zároveň podává dobrý výsledek z hlediska variability výsledků. Mezi vosky s nejmenší variabilitou (nejužší křivkou) patří vosk L+ následovaný vosky L a B. Tento výsledek je logický, když uvažíme výše zmíněné složení vosku L+. Stejný jev můžeme pozorovat i u vosku D+. Smrštění rozměru Y má charakter nebrzděného smrštění.



Graf 2.29 Histogram rozměru Z na zkušebním tělese

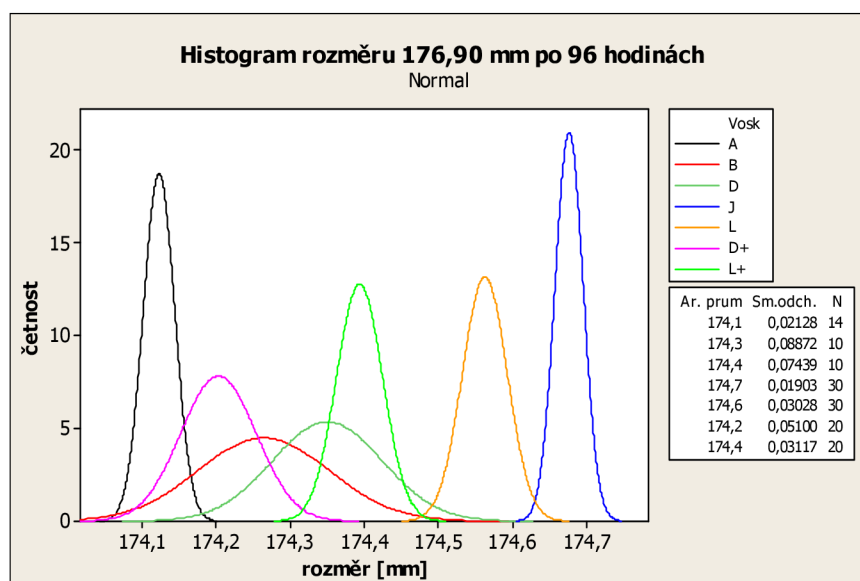
U druhého nejmenšího vyhodnocovaného rozměru (graf 2.29) došlo k razantnímu zlepšení chování vosku D, pokud jde o variabilitu výsledků. Smrštění vosku D je z daného výběru vosků největší. Obecně dobrý výsledek podávají vosky L+, L a J. Nejhorší výsledek podává vosk D+, jehož variabilita výsledků je zde největší. Rozměr Z u vosků A a B nebyl

z časových důvodů naměřen, ale lze očekávat podobné pořadí výsledků jako je tomu v grafu 2.28.



Graf 2.30 Histogram rozměru B na zkušební tělese

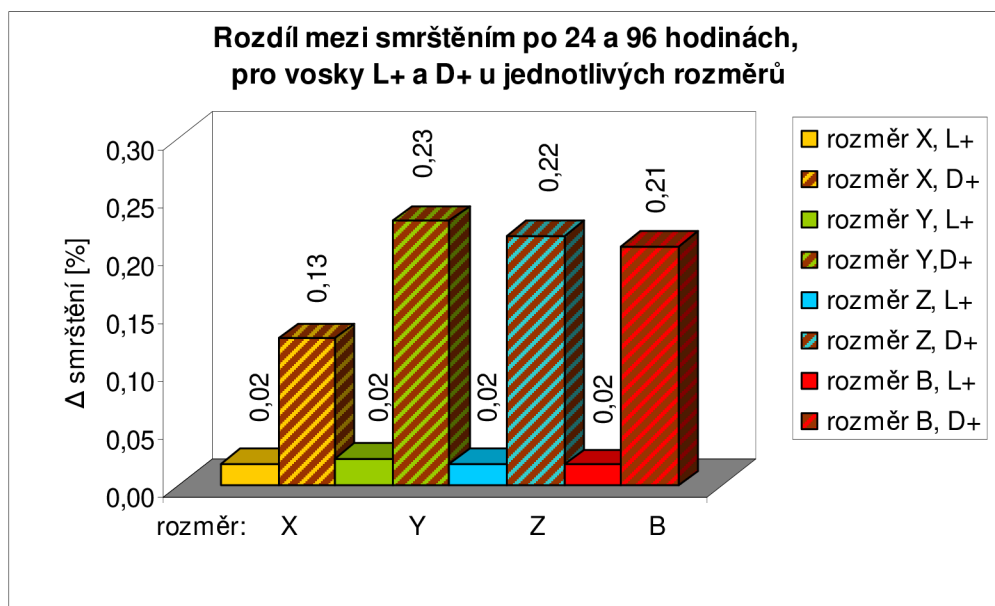
Histogram 2.30 ukazuje rozložení naměřených hodnot pro brzděné smrštění. Z grafu jsou patrné poměrně malé rozdíly ve směrodatných odchylkách a středních hodnotách. Tento jev je pravděpodobně následkem brzděného smrštění. Vosk A má společně s voskem D největší hodnotu smrštění. Nejmenší smrštění vykazuje vosk B. Nejmenší variabilitu výsledků má opět vosk L následovaný voskem A a J. Vosk D měření nebyl podroben. Největší rozptyl výsledků byl zjištěn u vosku D+.



Graf 2.31 Histogram rozměru X na zkušební tělese

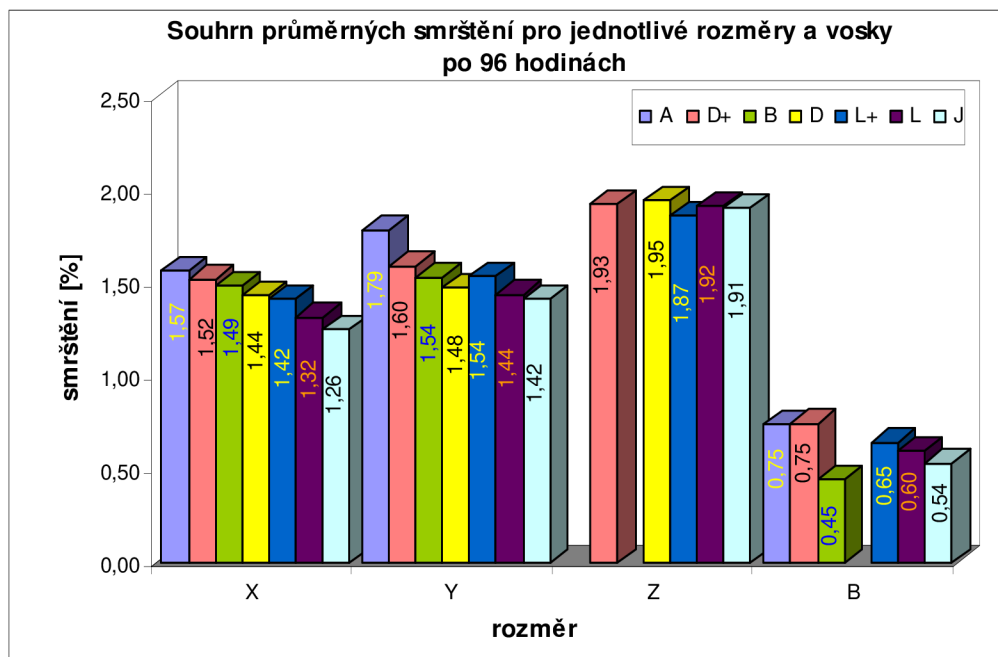
Nejmenší smrštění a zároveň směrodatná odchylka pro největší nebrzděný rozměr X (graf 2.31) byla naměřena u vosku J. Druhá nejmenší směrodatná odchylka byla naměřena u

vosku A, který se však smršťoval nejvíce ze všech hodnocených vosků. Dobré výsledky podávaly i vosky J a L+.

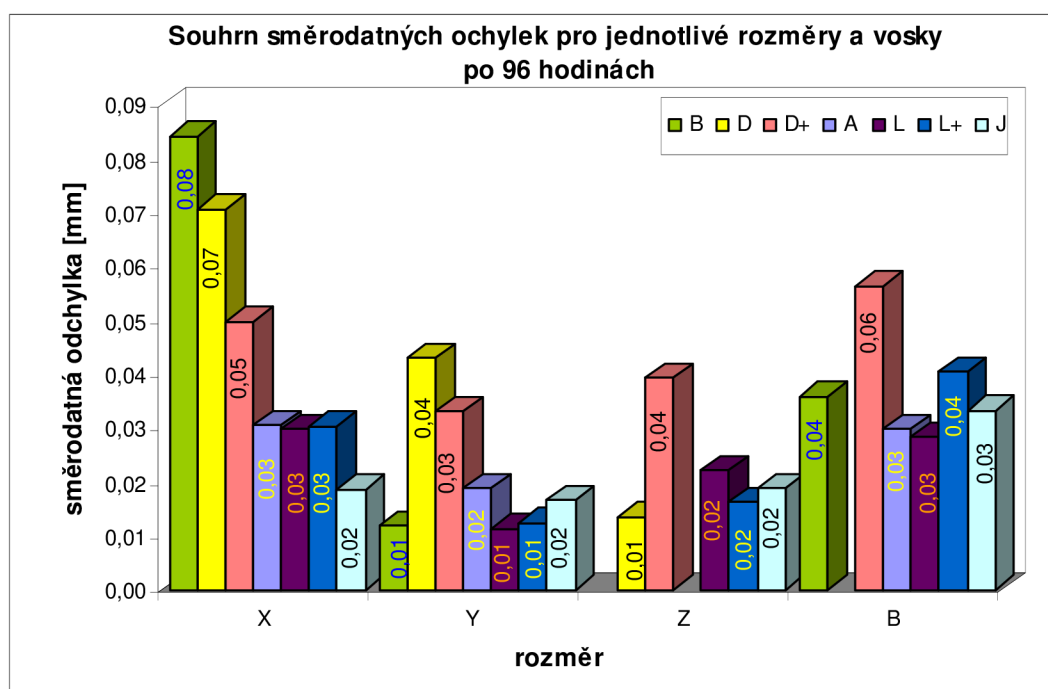


*Graf 2.32 Rozdíl ve smršťení mezi 24 a 96 hodinami pro vosky L+ a D+ u jednotlivých rozměrů*

V grafu 2.32 je uveden rozdíl mezi smršťením po 24 a 96 hodinách u vosku L+ a D+. Na základě zjištěných dat lze prohlásit, že vosk L+ je již po 24 hodinách stabilizovaný. Vosk D+ po 24 hodinách dále rozměrově „pracuje“. Zmíněný rozdíl není nijak veliký, nicméně, není jasné zda-li vosk D+ nepracuje i po 96 hodinách.



*Graf 2.33 Souhrn smršťení pro všechny vosky a rozměry*



Graf 2.34 Souhrn směrodatných odchylek pro všechny vosky a rozměry

Porovnáním smrštění v grafu 2.33 byl ověřen výsledek rozměrové analýzy z experimentální části. Nejnižší smrštění mají vosky J a L. Nejmenší variabilitou rozměrů se vyznačují taktéž vosky J a L, viz graf 2.34.

## B. Zkoušky na modelu odlitku

Zkoušky na modelu odlitku nebyly z důvodu poruchy 3D měřicího zařízení provedeny. Účelem měření mělo být ověření doposud dosažených výsledků a získání nových poznatků o chování vosků přímo z provozu slévárny.

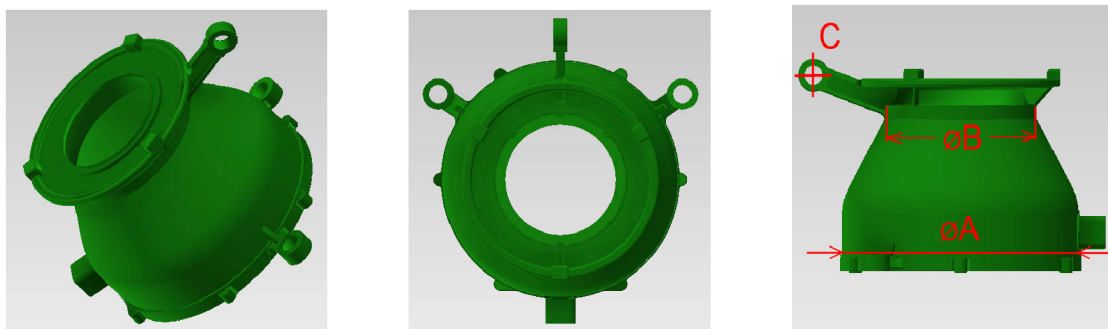
### Zkoušené voskové směsi

Mezi zkoušené vosky byl zařazen pouze vosk D+ a L+. Důvodem zařazení vosku D+ jsou dobré technologické vlastnosti, mírné zlepšení v rozměrové variabilitě ve srovnání s voskem D a příznivá cena. Vosk L+ je, jak již bylo zmíněno, prakticky jedinou logickou možností, pokud by slévárna chtěla užívat vosk L nebo J.

### Zkušební kus, výroba zkušebního kusu a měření

Pro hodnocení rozměrové analýzy byl vybrán odlitek pracovně označený jako „AOA“.





Obr. 2.17 Model odlitku „AOA“ pro poloprovozní zkoušky

Modely odlitku byly zhotoveny opakovaným vstřikováním na vstřikolisu Shell-O-Matic 35T (uzavírací síla 34 tun). Vstřikování probíhalo bez přestávky, aby byl co nejvěrohodněji simulován režim běžné formy ve výrobě [27].

Parametry vstřikování jsou pro oba vosky uvedeny v tabulce 2.3 a 2.4. Forma byla podle potřeby ošetřena dělicím přípravkem na nesilikonové bázi Fast2Shell od firmy Remet.

Parametry vstřikování pro model odlitku „AOA“ z vosku D+			
tlak [bar]	průtok [dílků]*	doba vstřiku a dotlaku [s]	teplota [°C]
27,6	50,0	50,0	64,0

\*V manuálu vstřikolisu nejsou uvedeny jednotky.

Tab. 2.4 Parametry vstřikování pro model z vosku D+

Parametry vstřikování pro model odlitku „AOA“ z vosku L+			
tlak [bar]	průtok [dílků]*	doba vstřiku a dotlaku [s]	teplota [°C]
27,6	50,0	50,0	68,0

\*V manuálu vstřikolisu nejsou uvedeny jednotky.

Tab. 2.5 Parametry vstřikování pro model z vosku L+

Vstřikovací teplota byla u vosku L+ zvýšena z původních 64 °C na 68 °C, kvůli nízké zabíhavosti, která byla odhalena laboratorními testy a ověřena v praxi při zhotovení prvních modelů. Lepším řešením by bylo zvýšení tlaku, protože zvýšení teploty se projeví v nárůstu smrštění.

### Rozměrová analýza – návrh postupu

Analýza by byla provedena podobně jako na zkušebním tělese. Měření by mělo proběhnout v určitých časových intervalech, například po 24h, 48h a 96h. Ze získaných dat by byly vytvořeny histogramy pro daný měřený rozměr změřený u obou vosku po uplynutí stejné doby (24, 48, 96 hodin). Na základě vykreslených dat by bylo možné posoudit smrštění daného rozměru a míru variability výsledků u každého vosku.

Dále by bylo vhodné vzájemně porovnat změnu smrštění v čase a určit, který vosk je rozměrově stabilnější. Pro výpočet smrštění je nutné změřit skutečné rozměry v matečné formě.

Mezi měřené rozměry by autor práce zařadil rozměry zakreslené v obrázku 2.17 vlevo, případně další.

U místa označeného jako „C“ by bylo vhodné hodnotit vzdálenost středu díry a roviny stolu 3D měřicího přístroje, na kterou by byl model položen ve stejné poloze jako je na obrázku

vlevo. Analýzou tohoto rozměru by bylo možné zjistit, který z vosků je náchylnější na deformaci způsobenou smrštěním.

### **2.3.2 Vyhodnocení poloprovozních zkoušek**

#### **Vyhodnocení zkoušek na zkušebním tělese**

Z hodnocení technologických vlastností, určených při zhotovování modelu zkušebního tělesa lze mezi nejlepší vosky zařadit vosk A, D+, L a L+.

Z rozměrové analýzy tělesa vyplývá:

- nejmenší smrštění má vosk J a L
- největší smrštění má vosk A a D+
- nejmenší variabilitu výsledků padávají vosky J, L, L+ a A

Z porovnání smrštění 24 a 96 hodin po zhotovení těles vyplývá, že směs z vosků J a L je rozměrově stabilnější než směs složená z vosků B a D.

Na základě výsledků obdržných z rozměrové analýzy, provedené na zkušebním tělese, lze jako nejlepší směsi označit vosky J a L, popř. jejich kombinaci L+.

#### **Vyhodnocení zkoušek na modelu odlitku**

Zkoušky z výše zmíněných důvodů neproběhly.

### 3 Závěr

V první fázi experimentů bylo provedeno celkem 12 různých laboratorních zkoušek pro 12 typů voskových směsí. Druhá část experimentů byla věnována poloprovozním zkouškám na pěti voscích z částí laboratorní a dvou voscích, vytvořených smícháním rekonstituovaného a panenského modelového vosku.

#### Závěr laboratorních zkoušek

Zkoušky proběhly v laboratoři technického centra předního světového výrobce voskových směsí, společnosti Blayson Olefines Ltd, v anglickém Cambridge. Výsledky těchto zkoušek poskytly velké množství informací o zkoušených směsích na teoretické i praktické úrovni. Na základě výsledků laboratorních zkoušek byl jako nejvhodnější modelový materiál vybrán vosk s pracovním označením L. Důvody pro tento závěr jsou následující:

1. Rozměrová analýza u toho vosku prokázala nejmenší rozměrovou variabilitu. Směrodatná odchylka pro rozměr 150,05 mm činila pouhých 0,048 mm. Smrštění vosku L bylo také velmi malé: 0,613 %. Vosk D, používaný ve firmě v současné době, má prakticky stejnou hodnotu smrštění, ale 3,3× vyšší směrodatnou odchylku hodnoceného rozměru. Druhý nejlepší výsledek z hlediska rozměrové variability vykazoval vosk J.
2. Ve zkoušce objemové roztažnosti měl vosk L jeden z nejlepších výsledků s hodnotou nárůstu objemu 5,25 %. V porovnání s vtokovým voskem G je to hodnota o 2,8 % nižší. U vosku D byla naměřena hodnota 6,09 %. Malá objemová roztažnost povede k menšímu propadání masivnějších částí voskového modelu a k menšímu namáhání skořepiny při procesu vytavování.
3. Vosk L vykazoval velmi nízkou hodnotu obsahu popela: 0,006 %. V současnosti používaný modelový vosk D obsahuje 4,5× více popelovin. Nutno podotknout, že veškeré zkoušené modelové vosky splňovaly maximální doporučené množství popelovin (0,05 %) s rezervou. Nízký obsah popela je důležitým předpokladem pro produkci vysoce jakostních odlitků z Al slitin.
4. Modul pružnosti vosku L má průměrnou hodnotu 674 MPa u vzorků zhotovených na vstříkolisu. Vysoká hodnota je způsobena poměrně malým průhybem (2,5 mm) a dobrou hodnotou maximálního zatížení (275 N). Vosk D, který je ve slévárně v současné době používán, je charakteristický velmi pružným chováním s hodnotou průhybu 8,7 mm, a tudíž nízkým modulem pružnosti. Pružné chování může být jednou z příčin rozměrové nestability a variability.
5. Při posuzování rychlosti změny mezi pevnou a kapalnou fází byly použity dvě odlišné metodiky. První měření vycházelo z reologických vlastností. Naměřeným průběhem ztrátového úhlu v závislosti na teplotě byla v místech fázové přeměny proložena přímka. Velikost směrnice této přímky pak sloužila jako nástroj k posouzení rychlosti změny fází. Obdobným způsobem proběhlo posouzení rychlosti změny fází na základě průběhu teplotní změny objemu. U obou měření se vosk L vyznačoval pouze průměrně rychlou změnou mezi pevnou a kapalnou fází, nicméně srovnatelnou s modelovým voskem D. U vosku L byla pomocí metody diferenciální skenovací kalorimetrie zjištěna nejnižší energetická náročnost tavení:  $89,8 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ . V současnosti používaný vosk D má hodnotu latentního tepla rovnu  $102 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ . Nejvyšší naměřenou hodnotou  $125 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$  disponoval použitý modelový vosk H o teoreticky stejném složení jako vosk D. Nárůst

latentního tepla oproti vosku D byl nejspíš způsoben velkým množstvím obsažených nečistot.

6. Zkouška zabíhavosti neodhalila výrazný rozdíl mezi voskem D a L. Rozdíl jejich hodnot zabíhavosti činil 12 cm. Snížená zabíhavost vosku L je způsobena jeho vysokou hodnotou dynamické viskozity. Měření zabíhavosti nebylo zcela objektivní, protože probíhalo při jednotném nastavení vstřikovacích paramaterů pro všechny vosky. Pro optimalizaci vstřikovacích parametů lze očekávat daleko lepší výsledky.

Za většinu pozitivních vlastností vděčí vosk L vysokému obsahu (39 %) kvalitního plniva v podobě zesíťového polystyrenu (XLPS). Zesíťovaný polystyren se vyznačuje nízkou hustotou  $1,07 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , díky které prakticky nedochází k jeho sedimentaci. Další nespornou výhodou je jeho malá objemová roztažnost, která se na výsledné směsi bezesporu projevila. Jeho nevýhodou je však vysoká cena.

Vosk s vysokým obsahem plniva může při vytavování, i přes sníženou objemovou roztažnost, způsobovat praskání skořepin. Tento jev je způsoben tím, že částice plniva zaslepí většinu pórů v primárním obalu a zabrání tak úniku již nataveného vosku směrem do skořepiny. Následkem vzrůstajícího tlaku vosku na skořepinu dojde k jejímu prasknutí.

Laboratorní zkoušky dále zjistily odlišnosti mezi jednotlivými výrobními dávkami vosku, který je ve slévárně v dnešní době užíván. Jednotlivé výrobní dávky byly testovány pod označením D, E a F. Rozměrová analýza odhalila rozdílná smrštění (rozdíl až 0,3 mm).

Hodnota průhybu u vosku D v několika měřeních překonala limitní hodnotu (10 mm) nastavenou na zařízení pro statickou zkoušku ohybem.

Měření obsahu popela byla odhalena příčina výskytu nečistot ve skořepině, na kterou si slévárna stěžovala. Nečistoty pochází z použitých modelových vosků, které byly užívány na zhotovení vtoků. Vosk H, u kterého byla provedena primitivní regenerace přímo ve slévárně, obsahoval 0,48 % popela, což je  $9,7\times$  větší množství, než je maximální doporučené množství stanovené Britskou obchodní asociací pro přesné lití (BICTA). Naměřené hodnoty poukázaly na nedostatečnou filtraci použitých vosků ve slévárně.

### **Závěr poloprovozních zkoušek**

Poloprovozní zkoušky byly původně naplánovány do dvou etap. V první etapě měly být vybrané modelové směsi podrobeny rozměrové analýze na zkušebním tělese, v druhé na konkrétním modelu odlitku. Druhá etapa nemohla být zahrnuta do této diplomové práce, z důvodu poruchy 3D měřicího zařízení. Tato měření v současné době dále probíhají.

Z poloprovozní rozměrové analýzy na zkušebním tělese vyplývá, že nejmenší variabilitu dat vykazují vosky L, J, případně jejich směs s označením L+. Vosk D měl ve srovnání s voskem L opět velkou směrodatnou odchylku.

U vosku D+ a L+ proběhlo posouzení změny rozměrů 24 a 96 hodin od zhotovení. U vosku L+ byly zaznamenány minimální změny. Největší změna u vosku L+ činila pouze 0,02 %. Vosk D+ stále trochu rozměrově „pracoval“. Největší změna zaznamenaná u vosku D+ byla 0,23 %.

I přes nedokončení všech plánovaných zkoušek lze doporučit voskovou směs L, případně její směs s voskem J označenou jako L+. Tyto vosky by měly efektivně řešit stávající problémy zmíněné v úvodu této práce.

Vhodným doplněním této práce by bylo posouzení technologických vlastností po delší době užívání vosku v provozu, ekonomická rozvaha a porovnání rozměrů dosažených na hotovém odlitku s příslušným předepsaným jmenovitým rozměrem tolerančním polem.

## Seznam použité literatury

- [1] BEELEY, PR. and SMART, RF. *Investment Casting*. 1st ed. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0-901716-66-9.
- [2] HORÁČEK, Milan. *Rozměrová přesnost odlitek vyráběných metodou vytavitelného modelu*. Brno, 2003. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [3] ŠMÍD, Dušan. *Optimalizace technologie vybraných náročných odlitek ze slitin Al*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. s.79.
- [4] PICKARD, Howard. *Best Practice Dewaxing*. Investment Casting Wax [online]. 2011 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl20.pdf>
- [5] WILLIAMS, R.B. *Properties and Quality Control of Investment Casting Wax*. Investment Casting Wax [online]. 1988 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl7.pdf>
- [6] BLAYSON OLEFINES LTD. *Product Information – Straight (Unfilled) Wax*. 2006. Dostupné z: [http://www.blayson.com/downloads/straight\\_wax.pdf](http://www.blayson.com/downloads/straight_wax.pdf)
- [7] BLAYSON OLEFINES LTD. *Product Information – Emulsified Wax*. 2011. Dostupné z: [http://www.blayson.com/downloads/emulsified\\_wax.pdf](http://www.blayson.com/downloads/emulsified_wax.pdf)
- [8] BLAYSON OLEFINES LTD. *Product Information – Filled Wax*. 2011. Dostupné z: [http://www.blayson.com/downloads/filled\\_wax.pdf](http://www.blayson.com/downloads/filled_wax.pdf)
- [9] WILLIAMS, R.B. *Update on Investment Casting Wax*. Investment Casting Wax [online]. 1991 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl10.pdf>
- [10] WILLIAMS, R.B. *Waxes for Investment Casting – A view from England*. Investment Casting Wax [online]. 1987 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl1.pdf>
- [11] BLAYSON OLEFINES LTD. *Product Information – Water Soluble Wax*. 2011. Dostupné z: [http://www.blayson.com/downloads/soluble\\_wax.pdf](http://www.blayson.com/downloads/soluble_wax.pdf)
- [12] BLAYSON OLEFINES LTD. *Wax Product Range and Services*. 2011. Dostupné z: [http://www.blayson.com/downloads/product\\_range.pdf](http://www.blayson.com/downloads/product_range.pdf)
- [13] HIRST, RICHARD. *Cost Reduction Through Wax Reclamation: EICF Best Practice Workshop Bilbao*. Investment Casting Wax [online]. 2005 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl3.pdf>
- [14] BLAYSON OLEFINES LTD. *Product Information – Recycled Wax*. 2011. Dostupné z: [http://www.blayson.com/downloads/recycled\\_wax.pdf](http://www.blayson.com/downloads/recycled_wax.pdf)
- [15] BOND, David a Koji NISHIKAWA. *Investment Casting Technology*. Investment Casting Wax [online]. [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl5.pdf>

- [16] IGI Microcrystalline Waxes. *Microcrystalline Wax* [online]. [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://igiwax.com/index.php?page=microcrystalline-wax/>
- [17] BOND, David. *Fillers in Wax: Developments of Stable Filled Wax*. Investment Casting Wax [online]. 2009 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl18.pdf>
- [18] FIELDER, Harvey. DUSSEK CAMPBELL YATES LTD. *The Effect of Fillers on the Physical Properties of Investment Casting Waxes*. Crayford, Kent, (Velká Británie). Dostupné z: <http://www.remetuk.com/technical-paper/tp-45-the-effect-of-fillers-on-the-physical-properties-of-investment-casting-waxes.htm>
- [19] HANCOCK, Phil. THE BLAYSON TECHNICAL CENTRE: *Wax Testing*. Investment Casting Wax [online]. 2011 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl21.pdf>
- [20] HANCOCK, Phil. *Wax Testing: Now and the Future*. Investment Casting Wax [online]. 2010 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl19.pdf>
- [21] HANCOCK, Phil. THE BLAYSON TECHNICAL CENTRE. *Technical report: Wax Evaluation (Confidential)*. Waterbeach, Cambridge (Velká Británie), 2011.
- [22] HANCOCK, Phil. *Wax Fundamentals and Use with Ceramic Cores: Now and the Future*. Investment Casting Wax [online]. 2007 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl15.pdf>
- [23] KOBERSKÝ, F. *Optimalizace výroby voskových modelů - voskové směsi a jejich zkoušení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 41s.
- [24] NILES, Jeffrey C.; ANIBARRO, Marcelo; FIELDER, Harvey. *Wax characterization for the investment casting process*. Incast. Březen 2003, vol. XVI, no.3, s. 16-19.
- [25] BLAYSON OLEFINES LTD. *Basic Quality Techniques: Laboratory Test Methods*. 7. vyd. Waterbeach, Cambridge (Velká Británie), 23.5.2011.
- [26] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [27] KOLEKTIV AUTORŮ. *Výzkum a vývoj technologie výroby rozměrných, tenkostěnných, hliníkových odlitků (ALFA-TA01010766): Odborná zpráva o postupu jednotlivých prací a dosažených výsledcích v roce 2011*. Uherské Hradiště, 2012
- [28] FIELDER, Harvey. DUSSEK CAMPBELL YATES LTD. *The Mechanical Properties of Investment Casting Waxes*. Crayford, Kent, (Velká Británie), 2001. Dostupné z: <http://www.remetuk.com/technical-paper/tp-uk1-the-mechanical-properties-of-investment-casting-waxes.htm>.
- [29] ASKELAND, Donald R, Pradeep P FULAY a Wendelin J WRIGHT. *The science and engineering of materials*. 6th ed. Stamford, CT: Cengage Learning, c2011, xxi, 921 p. ISBN 04-952-9602-3.

- [30] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003. ISBN 80-7204-283-2.
- [31] MAŇAS, Miroslav a Jiří VLČEK. *Aplikovaná reologie*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2001, 144 s. ISBN 80-731-8039-1.
- [32] BLAYSON TECHNICAL CENTRE. *Technical Report: Factors Affecting Wax Fluidity (Confidential)*. Waterbeach, Cambridge (Velká Británie), 2008.
- [33] JANALÍK, Jaroslav. *Viskozita tekutin a její měření* [online]. Ostrava : VŠB TU, fakulta strojní, 2010 [cit. 2011-12-09]. Dostupné z WWW: <<http://www.338.vsb.cz/PDF/TEXTviskozitaPDF.pdf>>.
- [34] TA INSTRUMENTS. *Basic Rheology Course* [CD]. 2011. Dostupné z: CD přiložené k přístroji AR-G2
- [35] MONKS, H. DUSSEK CAMBELL LTD., UK. *FLOW AND DEFORMATION OF CASTING WAXES IN THE SOLIDIFICATION REGION*. Presented at 8th World Conference on Investment Casting.
- [36] WYSS, Hans M., Ryan J. LARSEN a David A. WEITZ. *Oscillatory Rheology: Measuring the Viscoelastic Behaviour of Soft Materials*. GIT. laboratory journal Europe. 2007, 3-4. ISSN 1611-6038.
- [37] ČECH, Vladimír. *Praktikum ze struktury a vlastností polymerů*. Brno: Vysoké učení technické v Brne, Fakulta chemická, 2006. Dostupné z: [www.fch.vutbr.cz/home/prikryl/praktikaletu/uloha2.doc](http://www.fch.vutbr.cz/home/prikryl/praktikaletu/uloha2.doc)
- [38] ŠTRAHA, Pavel a Zdeněk TRÁVNÍČEK. *Termická analýza*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra anorganické chemie, 2011. Dostupné z: [http://agch.upol.cz/userfiles/file/pdf/Termicka\\_analyza.pdf](http://agch.upol.cz/userfiles/file/pdf/Termicka_analyza.pdf)
- [39] BOND, David a Koji NISHIKAWA. BLAYSON OLEFINES LTD. *Investigation of Wax Expansion: Blayson Technical Lectures*. Waterbeach, Cambridge (Velká Británie), 2002.
- [40] MASOOD, S.H. *An Investigation of Wax Patterns for Accuracy Improvement in Investment Cast Parts*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2001-9-1, roč. 18, č. 5, s. 348-356. ISSN 0268-3768. DOI: 10.1007/s001700170058. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/content/pf52r9fmv12g1093/>
- [41] REZAVAND, S.A.M. a A.H. BEHRAVESH. *An experimental investigation on dimensional stability of injected wax patterns of gas turbine blades*. Journal of Materials Processing Technology. 2007-2-2, roč. 182, 1-3, 580–587. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013606008405>



**Seznam obrázků**

Obr. 1.1 Princip měření bodu skápnutí dle Ubbelohde .....	17
Obr. 1.2 Princip měření bodu tuhnutí .....	18
Obr. 1.3 Penetrometr .....	19
Obr. 1.4 Zatěžovací stroj Lloyd Instruments LRX .....	21
Obr. 1.5 Forma na zhotovení odlévaných zkušebních vzorků .....	21
Obr. 1.6 Schéma rotačního viskozimetru .....	22
Obr. 1.7 Schéma reometru s kontrolovaným smykovým napětím.....	23
Obr. 1.8 Schéma komory diferenčního skenovacího kalorimetru.....	25
Obr. 1.9 Tělesa k vyhodnocování smrštění .....	26
Obr. 1.10 Schéma zařízení na měření objemové roztažnosti vosku .....	27
Obr. 1.11 Formy pro zkoušku zabíhavosti.....	27
Obr. 1.12 Faktory ovlivňující rozměry voskového modelu .....	30
Obr. 2.1 Zkušební těleso .....	34
Obr. 2.2 Tavicí buňka FP38HT .....	34
Obr. 2.3 FP90 Central Processor .....	34
Obr. 2.4 Měření bodu tuhnutí .....	35
Obr. 2.5 Filtrační papír s plnivem .....	37
Obr. 2.6 Büchnerova nálevka.....	37
Obr. 2.7 Kelímek po spálení vosku H.....	39
Obr. 2.8 Exsikátor .....	39
Obr. 2.9 Pec na spalování vosku .....	39
Obr. 2.10 Popis penetrometru SETA.....	40
Obr. 2.11 Detail zatěžovacího na statickou zkoušku ohybem.....	43
Obr. 2.12 Schéma statické zkoušky ohybem.....	43
Obr. 2.13 Zkušební hliníková miska .....	55
Obr. 2.14 Kalorimetr Mettler Toledo DSC 12 E .....	55

## Seznam grafů

Graf 1.1 Závislost tvrdosti voskové směsi na teplotě .....	11
Graf 1.2 Závislost roztažností složek směsi na teplotě .....	12
Graf 1.3 Vliv plniv na roztažnost voskových směsí .....	15
Graf 1.4 Pevnost vosku v ohybu v závislosti na stáří modelu .....	20
Graf 1.5 Závislost viskozity voskové směsi na teplotě .....	22
Graf 1.6 Typická závislost mezi ztrátovým úhlem a teplotou .....	24
Graf 1.7 Smrštění voskové směsi v čase .....	26
Graf 1.8 Dosažitelné tolerance metody vytavitelného modelu .....	28
Graf 1.9 Rozměrové změny v průběhu celé technologie .....	29
Graf 1.10 Pracovní cyklus vstřikolisu .....	31
Graf 2.1 Bod skápnutí pro jednotlivé směsi .....	34
Graf 2.2 Bod tuhnutí pro jednotlivé směsi.....	36
Graf 2.3 Obsah plniva v jednotlivých voscích .....	37
Graf 2.4 Obsah popelu v jednotlivých voscích.....	39
Graf 2.5 Hodnoty penetrace pro jednotlivé směsi.....	40
Graf 2.6 Maximální zatížení ručně odlitých vzorků .....	44
Graf 2.7 Maximální zatížení vstřikovaných vzorků.....	44
Graf 2.8 Maximální průhyb ručně litých vzorků.....	45
Graf 2.9 Maximální průhyb vstřikovaných vzorků .....	45
Graf 2.10 Modul pružnosti ručně litých vzorků.....	46
Graf 2.11 Modul pružnosti vstřikovaných vzorků .....	46
Graf 2.12 Smluvní pevnost v ohybu ručně litých vzorků .....	47
Graf 2.13 Smluvní pevnost v ohybu vstřikovaných vzorků.....	47
Graf 2.14 Hodnoty dynamické viskozity v bodě tuhnutí .....	49
Graf 2.15 Hodnoty dynamické viskozity při 70 °C.....	49
Graf 2.16 Průběhy dynamických viskozit vybraných vosků .....	49
Graf 2.17 Průběhy dynamických viskozit vybraných vosků .....	50
Graf 2.18 Příklad proložení regresní přímky oblastí změny fází u vosku B.....	52
Graf 2.19 Průběh ztrátového úhlu u vosku C.....	52
Graf 2.20 Průběh ztrátového úhlu u vosku A.....	53
Graf 2.21 Příklad naměřených dat elastické a viskózního modulu.....	53
Graf 2.22 Vyhodnocení rychlosti fázové přeměny .....	54
Graf 2.22 Výstup programu Mettler Toledo – termogram .....	56
Graf 2.23 Výstup programu Mettler Toledo .....	56
Graf 2.24 Výstup programu Mettler Toledo .....	57
Graf 2.25 Histogram rozměru testovacího tělesa pro jednotlivé vosky .....	58
Graf 2.26 Velikost změny objemu jednotlivých vosků.....	59
Graf 2.27 Velikost směrnic regresních přímek změny objemu.....	60
Graf 2.28 Histogram rozměru Y na zkušebním tělese .....	66
Graf 2.29 Histogram rozměru Z na zkušebním tělese .....	66
Graf 2.30 Histogram rozměru B na zkušebním tělese .....	67
Graf 2.31 Histogram rozměru X na zkušebním tělese .....	67
Graf 2.32 Rozdíl ve smrštění mezi 24 a 96 h, vosk D+ a L+.....	68
Graf 2.33 Souhrn smrštění pro všechny vosky a rozměry .....	68
Graf 2.34 Souhrn směrodatných odchylek pro všechny vosky a rozměry.....	69

## Seznam tabulek

Tab. 2.1 Shrnutí vlastností voskových směsí pro experimentální část.....	32
Tab. 2.2 Rozměry v matečné formě zkušební tělesa.....	64
Tab. 2.3 Parametry vstřikování pro zkušební těleso.....	64
Tab. 2.4 Parametry vstřikování pro model z vosku D+ .....	70
Tab. 2.5 Parametry vstřikování pro model z vosku L+.....	70

## Seznam použitých vzorců

Vztah 1.1 – Modul pružnosti v tahu z deformace ohybem .....	20
Vztah 1.2 – Smluvní mez pevnosti v ohybu .....	21
Vztah 1.3 – Volné lineární smrštění .....	25
Vztah 2.1 – Obsah plniva .....	36
Vztah 2.2 – Obsah popela .....	38
Vztah 2.3 – Váha zkušební misky .....	54

## Seznam příloh


Příloha 1 – Technická dokumentace k voskům .....	81
Příloha 2 – Data pro kapitolu 2.2.1 – A, B, C, D, E.....	85
Příloha 3 – Data pro kapitolu 2.2.1 – F (ručně lité vzorky) .....	87
Příloha 4 – Data pro kapitolu 2.2.1 – F (vstřikované vzorky) .....	93
Příloha 5 – Data pro kapitoly 2.2.1 – G, J.....	98
Příloha 6 – Grafy pro kapitolu 2.2.1 – H .....	99
Příloha 7 – Grafy pro kapitolu 2.2.1 – I.....	102
Příloha 8 – Grafy pro kapitolu 2.2.1 – K .....	105
Příloha 9 – Data pro kapitolu 2.3.1 – A.....	109

## Seznam použitých zkratek a symbolů

a	[mm]	šířka vzorku (rozměr kolmý k zatížení)
b	[mm]	výška vzorku (rozměr rovnoběžný se zatížením)
BICTA	[-]	Britská obchodní asociace pro přesné lití
BPA	[-]	Bisfenol A
c	[mm]	délka vzorku
d	[mm]	průhyb vzorku
DSC	[-]	diferenciální skenovací kalorimetrie
$E_{\text{ohyb}}$	[MPa]	modul pružnosti v tahu z deformace ohybem
F	[N]	maximální zatížení
$G'$	[Pa]	elastický (paměťový) modul
$G''$	[Pa]	viskózní (ztrátový) modul
$k_P$	[%]	obsah plniva
$k_{PL}$	[%]	obsah popela
l	[mm]	rozměr na voskovém modelu
L	[mm]	vzdálenost podpor
$l_z$	[%]	volné lineární smrštění
$l_0$	[mm]	rozměr v matečné formě
$m_K$	[g]	váha keramického kelímku
$m_{KP}$	[g]	váha keramického kelímku s popelem
$m_{KV}$	[g]	váha keramického kelímku s voskem
$m_M$	[mg]	váha zkušební misky
$m_{MV}$	[mg]	váha zkušební misky se zkoušeným vzorkem
$m_v$	[g]	váha rozpuštěného vosku
$m_v$	[mg]	váha vosku
$m_p$	[g]	váha filtrovacího papíru
$m_{pp}$	[g]	váha filtrovacího papíru s plnivem
$p$	[Pa]	tlak
PBS	[-]	První brněnská strojírna
$R_{mo}$	[MPa]	smluvní mez pevnosti v ohybu
t	[s]	čas
$T_f$	[°C]	konečná teplota
$T_s$	[°C]	počáteční teplota
XLPS	[-]	zesítný polystyren
$\eta$	[Pa·s]	dynamická viskozita
$\Delta V$	[%]	změna objemu
$\alpha$	[-]	hladina významnosti
$\delta$	[°]	fázový úhel

## Přílohy

## Příloha 1 – technická dokumentace k voskům



**CERTIFICATE OF ANALYSIS**

Customer : Fimes  
 Product : PARACAST SW 13406  
 Batch no. : 138866  
 Production week : 2011-30  
 Your order number :  
 Our order number : 229696  
 Sample number : P138866

Assay	Method	Specification	Test value	UOM
Ash content	-	0 - .2	.044	%
Visual colour	ONTW-WI-01	BLUE/GREEN	BLUE/GREEN	-
Congeaing point	ASTM D 938	64 - 70	67.0	DEGC
Filler content	-	22 - 28	26.00	%
Drop melting point	ASTM D 3954	70 - 78	76.6	DEGC
Penetration at 25 Å°C	ASTM D 1321	3 - 9	5.0	DMM
Viscosity at 90 Å°C	ASTM D 3236	200 - 450	450.0	MPAS


This certificate has been produced by electronic dataprocessing and therefore it is effective without a signature. This certificate has been prepared with care and to the best knowledge as part of the quality system of Paramelt. However, it does not relieve our customers of their obligation to inspect the goods upon receipt or establish any warranties to third parties, to whom it might be passed on. No additional warranty of any kind, expressed or implied, is linked hereto.

**FIMES**  
 akciová společnost  
 UHERSKÉ HRADIŠTĚ

Paramelt B.V.  
 Colenestraat 18 • 1704 RJ Heerhugowaard  
 P.O. Box 86 • 1700 AB Heerhugowaard • The Netherlands  
 Tel. +31 72 575 06 00 • Fax +31 72 575 06 99  
 e-mail: info@paramelt.com • www.paramelt.com  
 ING Bank Alkmaar 65 29 56 793 BIC: INGBNL2A  
 Trade Register: Alkmaar 37072051 • VAT number: NL001022015801

102 60 3-

Page 1 of 2



**CERTIFICATE OF ANALYSIS**

Customer : Fimes  
 Product : PARACAST FW 13404  
 Batch no. : 139025  
 Production week : 2011-30  
 Your order number :  
 Our order number : 229696  
 Sample number : P139025

Assay	Method	Specification	Test value	UOM
Ash content	-	0 - .03	.006	%
Visual colour	ONTW-WI-01	GREEN	GREEN	-
Congeaing point	ASTM D 938	68 - 74	74.0	DEGC
Drop melting point	ASTM D 3954	78 - 84	81.6	DEGC
Penetration at 25 Å°C	ASTM D 1321	2 - 8	5.0	DMM
Viscosity at 100 Å°C	ASTM D 3236	250 - 450	318.0	MPAS
Viscosity at 90 Å°C	ASTM D 3236	450 - 550	468.0	MPAS

This certificate has been produced by electronic dataprocessing and therefore it is effective without a signature. This certificate has been prepared with care and to the best knowledge as part of the quality system of Paramelt. However, it does not relieve our customers of their obligation to inspect the goods upon receipt or establish any warranties to third parties, to whom it might be passed on. No additional warranty of any kind, expressed or implied, is linked hereto.

**FIMES**  
 akciová společnost  
 UHERSKÉ HRADIŠTĚ

Paramelt B.V.  
 Colenestraat 18 • 1704 RJ Heerhugowaard  
 P.O. Box 86 • 1700 AB Heerhugowaard • The Netherlands  
 Tel. +31 72 575 06 00 • Fax +31 72 575 06 99  
 e-mail: info@paramelt.com • www.paramelt.com  
 ING Bank Alkmaar 65 29 56 793 BIC: INGBNL2A  
 Trade Register: Alkmaar 37072051 • VAT number: NL001022015801

- 5. 09. 2011

Page 2 of 2



REMET UK Limited

Unit 44, Riverside II, Sir Thomas Longley Road, Rochester, Kent ME2 4DP  
Tel: +44 (0) 1634 226240  
Fax: +44 (0) 1634 226241  
www.remet.com

*Com/70948*

Hyfill RF1 478

BATCH NUMBER: 709250

DATE: 19<sup>th</sup> September 2011

TEST CERTIFICATE

PROPERTY	METHOD	RESULT	SPECIFICATION
Congealing Point (°C)	IP 76	66	NA
Penetration @ 25°C (dmm)	IP 49	4	NA
Penetration @ 43.3°C (dmm)	IP 49	35	NA
Brookfield Viscosity @ 80°C (cps)	DCF.1	890	NA
Brookfield Viscosity @ 90°C (cps)	DCF.1	568	NA
Brookfield Viscosity @ 100°C (cps)	DCF.1	377	NA
Ash Content (%)	DCF.2	0.022	0.03 Max.
Filler Content (%)	DCF.3	31.5	NA
Colour	DCF.4	Brown	

We certify that the goods tested hereon have been inspected and unless otherwise stated, conform to the full requirements of the order, and that the raw materials used have been obtained from approved sources.

A. Hudson, A. Spence.  
(SENIOR QUALITY CONTROLLERS)

This document is created electronically and is valid without a signature

Hyfill RF1 - 478 - electronic test certificate

Registered Name: Remet UK Limited  
Registered Office: 44 Riverside II, Sir Thomas Longley Road, Rochester, Kent. ME2 4DP  
Registered No. 4760567 England

Rev. 02



REMET UK Limited

Unit 44, Riverside II, Sir Thomas Longley Road, Rochester, Kent ME2 4DP  
Tel: +44 (0) 1634 226240  
Fax: +44 (0) 1634 226241  
www.remet.com

HYFILL B478

BATCH NUMBER: 709301

DATE: 06<sup>th</sup> October 2011

*Com/70325*

TEST CERTIFICATE

PROPERTY	METHOD	RESULT	SPECIFICATION
Congealing Point (°C)	IP 76	67	62.0 - 67.0
Penetration @ 25°C (dmm)	IP 49	6	2.0 - 7.0
Brookfield Viscosity @ 80°C (cps)	DCF.1	918	800 - 950
Brookfield Viscosity @ 90°C (cps)	DCF.1	583	500 - 600
Brookfield Viscosity @ 100°C (cps)	DCF.1	376	320 - 380
Ash Content (%)	DCF.2	0.024	0.030 Max.
Filler Content (%)	DCF.3	30.5	28.0 - 32.0
Colour	DCF.4	Green	Green

We certify that the goods tested hereon have been inspected and unless otherwise stated, conform to the full requirements of the order, and that the raw materials used have been obtained from approved sources.

A. Hudson, A. Spence.  
(SENIOR QUALITY CONTROLLERS)

This document is created electronically and is valid without a signature

Hyfill B478 - electronic test certificate

Registered Name: Remet UK Limited  
Registered Office: 44 Riverside II, Sir Thomas Longley Road, Rochester, Kent. ME2 4DP  
Registered No. 4760567 England

Rev. 02

FSI VUT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

List 82

**Blayson****BLAYSON OLEFINES LIMITED**  
Certificate of Conformity

16999

Batch no: **U0361**  
 Material Type: A7-FR/1800 Approval Date: 21/04/2011  
 Wax Form: Green Wax Pellets

Specification Issue 2			
Laboratory Test	Min	Max	Result
Congealing Point/°C BQT-03	62	69	65
Drop Melt Point/°C BQT-06	70	76	73
Ash Value/% BQT-01		0.05	0.00
Penetration/dmm BQT-02	8	13	10
Viscosity/Pa s BQT-05	2.00	3.50	3.05
Water Content/% BQT-04	0.0	0.0	0.0
Filler Content/% BQT-07	36.0	40.0	38.8

We certify that the above material has been manufactured using approved raw materials, processed to specified techniques and fully inspected and that it conforms to the requirements of the wax specification sheet.

Approved for and on behalf of Blayson Olefines.



D Bond, Technical Director

For any further information, please contact the Blayson Technical Centre; lab@blayson.com

Blayson Olefines Ltd  
 Denny Industrial Centre, Pembroke Avenue, Cambridge, CB25 9QP  
 Tel +44(0) 1223 861 491 Fax +44(0)1223 441 500  
 A member of the Blayson Group Ltd  
 Registered in England No. 703644 Registered Office 249 Cranbrook Rd, Ilford, Essex, IG1 4TG

**Blayson****BLAYSON OLEFINES LIMITED**  
Certificate of Conformity

16867

Batch no: **U0464**  
 Material Type: A7-FR/60 Approval Date: 25/05/2011  
 Wax Form: Green Wax Pellets

Specification Issue 2			
Laboratory Test	Min	Max	Result
Congealing Point/°C BQT-03	63	67	66
Drop Melt Point/°C BQT-06	70	73	73
Ash Value/% BQT-01		0.05	0.01
Penetration/dmm BQT-02	9	12	9
Viscosity/Pa s BQT-05	2.10	2.50	2.12
Water Content/% BQT-04	0.0	0.0	0.0
Filler Content/% BQT-07	30.0	32.0	31.4

MANUFACTURED TO PART No. 135115  
 MANUFACTURED TO NGL CODE 691252  
 MANUFACTURED TO CSS23

We certify that the above material has been manufactured using approved raw materials, processed to specified techniques and fully inspected and that it conforms to the requirements of the wax specification sheet.

Approved for and on behalf of Blayson Olefines.



D Bond, Technical Director

For any further information, please contact the Blayson Technical Centre; lab@blayson.com

Blayson Olefines Ltd  
 Denny Industrial Centre, Pembroke Avenue, Cambridge, CB25 9QP  
 Tel +44(0) 1223 861 491 Fax +44(0)1223 441 500  
 A member of the Blayson Group Ltd  
 Registered in England No. 703644 Registered Office 249 Cranbrook Rd, Ilford, Essex, IG1 4TG

FSI VUT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

List 83





## Příloha 2 – Data pro kapitolu 2.2.1 – A, B, C, D, E

Vosk	Bod skápnutí		
	1. měření [°C]	2. měření [°C]	Průměrná hodnota [%]
A	73,5	75,1	74,30
B	73,8	73,6	73,70
C	80,9	82,6	81,75
D	74,0	74,1	74,05
E	74,1	74,2	74,15
F	74,8	74,4	74,60
G	72,7	72,9	72,80
H	73,2	73,9	73,55
I	72,8	73,0	72,90
J	75,4	73,7	74,55
K	78,2	78,5	78,35
L	78,0	78,0	78,00

Bod tuhnutí	
Vosk	Bod tuhnutí [°C]
A	66
B	66
C	66
D	65
E	64
F	64
G	64
H	63
I	64
J	66
K	68
L	64

Vosk	Obsah plniva				
	1. měření [hm %]	2. měření [hm %]	3. měření [hm %]	Průměrná hodnota [hm %]	Směrodatná odchylka [hm %]
A	23,72	23,27	23,4	23,46	0,19
B	28,22	28,76	23,38	26,79	2,42
C	33,62	35,07	36,2	34,96	1,06
D	29,42	29,81	29,19	29,47	0,26
E	30,07	30,68	30,93	30,56	0,36
F	29,23	28,95	29,41	29,20	0,19
G	13,68	13,44	13,33	13,48	0,15
H	29,41	27,77	29,42	28,87	0,78
I	21,96	21,99	21,82	21,92	0,07
J	31,37	31,1	31,42	31,30	0,14
K	29,31	29,69	29,45	29,48	0,16
L	39,06	38,42	39,54	39,01	0,46

Vosk	Obsah popela				
	1. měření [hm %]	2. měření [hm %]	3. měření [hm %]	Průměrná hodnota [ hm%]	Směrodatná odchylka [%]
A	0,031	0,024	0,029	0,028	0,003
B	0,022	0,019	0,019	0,020	0,001
C	0,008	0,011	0,009	0,009	0,001
D	0,026	0,031	0,023	0,027	0,003
E	0,017	0,021	0,021	0,020	0,002
F	0,022	0,025	0,022	0,023	0,001
G	0,085	0,083	0,084	0,084	0,001
H	0,528	0,519	0,405	0,484	0,056
I	0,268	0,270	0,262	0,267	0,003
J	0,023	0,030	0,027	0,027	0,003
K	0,017	0,018	0,019	0,018	0,001
L	0,004	0,009	0,004	0,006	0,002

Vosk	Penetrace			
	1. měření [mm·0.1]	2. měření [mm·0.1]	3. měření [mm·0.1]	Průměrná hodnota [mm·0.1]
A	12	11	11	11,3
B	9	10	10	9,7
C	9	9	10	9,3
D	9	9	9	9,0
E	9	9	9	9,0
F	11	11	11	11,0
G	11	12	13	12,0
H	9	9	10	9,3
I	8	9	9	8,7
J	9	9	10	9,3
K	11	10	10	10,3
L	11	11	10	10,7

**Příloha 3 – Data pro kapitolu 2.2.1 – F (ručně lité vzorky)**

Poznámka: červeně označené hodnoty byly z měření vyřazeny testem odlehých hodnot, podrobnosti viz poslední řádek každé tabulky. Oba testy podávají výsledky s 95% pravděpodobností.

<b>Vosk A – ručně lité vzorky</b>				
Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	103,04	0,97	405,29	1,70
2.	106,65	1,06	374,46	1,76
3.	117,00	1,15	405,09	1,93
4.	123,24	1,19	458,47	2,03
5.	120,84	1,18	414,15	1,99
6.	99,59	0,94	425,18	1,64
7.	121,02	1,16	426,82	1,99
8.	104,42	0,97	380,51	1,72
9.	124,40	1,19	416,31	2,05
10.	91,62	0,86	375,92	1,51
11.	73,66	0,78	306,34	1,21
12.	104,87	0,89	469,36	1,73
13.	118,69	1,11	420,31	1,95
14.	115,79	1,18	412,75	1,91
15.	101,50	0,97	401,13	1,67
16.	112,68	1,05	405,23	1,85
Arit. průměr:	111,02	1,06	412,73	1,83
Směrodatná odchylka:	9,68	0,11	25,67	0,16
P - hodnota testu normality dat: 0,193 => rozdělení je normální, použit Grubbsův test				

<b>Vosk B – ručně lité vzorky</b>				
Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	78,75	0,70	438,54	1,30
2.	73,62	0,67	436,29	1,21
3.	71,87	0,69	439,91	1,18
4.	76,58	0,77	361,00	1,26
5.	80,14	0,76	439,98	1,32
6.	69,81	0,67	426,47	1,15
7.	77,74	0,74	377,40	1,28
8.	84,14	0,76	440,75	1,39
9.	81,59	0,69	481,49	1,34
10.	78,44	0,74	420,17	1,29
11.	81,36	0,78	410,04	1,34
12.	73,93	0,72	403,34	1,22
13.	71,88	0,65	422,39	1,18
14.	81,96	0,73	454,81	1,35
15.	78,58	0,71	446,91	1,29
16.	66,28	0,59	425,35	1,09
Arit. průměr:	76,67	0,71	426,55	1,26
Směrodatná odchylka:	4,82	0,05	28,08	0,08
P - hodnota testu normality dat: 0,520 => rozdělení je normální, použit Grubbsův test				

**Vosk C – ručně lité vzorky**

Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	134,73	2,04	385,00	2,22
2.	106,72	0,98	414,89	1,76
3.	140,10	1,95	429,11	2,31
4.	136,12	2,10	415,19	2,24
5.	130,49	1,65	373,85	2,15
6.	129,75	1,40	424,40	2,14
7.	140,01	1,92	409,77	2,30
8.	<b>85,46</b>	<b>0,67</b>	<b>472,99</b>	<b>1,41</b>
9.	131,38	2,50	408,54	2,16
10.	137,07	2,68	362,03	2,26
11.	144,45	2,53	519,78	2,38
12.	143,89	2,00	503,66	2,37
13.	131,39	1,72	414,62	2,16
14.	134,60	2,37	372,40	2,22
15.	144,68	2,43	335,87	2,38
16.	135,36	1,99	483,59	2,23
Arit. průměr:	134,72	2,02	416,85	2,22
Směrodatná odchylka:	8,91	0,44	49,88	0,15
P - hodnota testu normality dat: 0,005 => rozdělení není normální, použit Dean-Dixonův test				

**Vosk D – ručně lité vzorky**

Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	118,66	1,32	415,22	1,95
2.	118,66	1,01	318,45	1,53
3.	118,66	1,31	383,00	2,05
4.	118,66	0,75	384,32	1,27
5.	118,66	1,32	422,98	2,06
6.	118,66	0,57	384,78	0,94
7.	118,66	1,46	387,76	2,08
8.	118,66	1,12	380,32	1,80
9.	118,66	1,48	1944,29	2,10
10.	118,66	1,04	394,24	1,72
11.	118,66	0,96	370,74	1,58
12.	118,66	0,71	344,56	1,16
13.	118,66	0,94	440,55	1,70
14.	118,66	1,15	410,18	1,93
15.	118,66	1,52	384,90	2,15
16.	118,66	0,82	364,77	1,32
Arit. průměr:	118,66	1,09	483,19	1,71
Směrodatná odchylka:	118,66	0,28	378,32	0,37
P - hodnota testu normality dat: 0,195 => rozdělení je normální, použit Grubbsův test				

**Vosk E – ručně lité vzorky**

Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	129,34	1,53	327,16	2,13
2.	126,91	1,51	679,05	2,09
3.	130,34	1,82	773,30	2,15
4.	127,92	1,58	345,05	2,11
5.	93,73	0,98	653,85	1,54
6.	117,65	1,28	652,91	1,94
7.	123,26	1,60	627,30	2,03
8.	128,78	1,47	683,75	2,12
9.	138,54	1,58	783,69	2,28
10.	130,49	1,82	326,75	2,15
11.	121,92	1,33	797,42	2,01
12.	135,35	1,42	902,47	2,23
13.	134,69	1,59	817,94	2,22
14.	122,27	1,38	818,98	2,01
15.	127,20	1,58	784,10	2,09
16.	116,33	1,17	695,34	1,91
Arit. průměr:	127,40	1,51	667,68	2,10
Směrodatná odchylka:	6,09	0,17	181,64	0,10
P - hodnota testu normality dat: 0,026 => rozdělení není normální, použit Dean-Dixonův test				

**Vosk F – ručně lité vzorky**

Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	101,53	1,28	665,24	1,67
2.	106,81	2,18	630,30	1,76
3.	116,85	1,62	792,30	1,92
4.	117,56	1,77	767,72	1,94
5.	114,30	1,81	784,05	1,88
6.	112,58	1,67	698,31	1,85
7.	115,89	2,13	792,58	1,91
8.	115,24	1,82	808,15	1,90
9.	113,43	2,12	625,67	1,87
10.	105,56	1,34	692,96	1,74
11.	116,61	2,14	685,87	1,92
12.	108,53	2,11	689,77	1,79
13.	112,40	2,00	643,15	1,85
14.	115,86	1,94	715,19	1,91
15.	116,50	1,74	788,12	1,92
16.	110,00	1,97	604,16	1,81
Arit. průměr:	112,48	1,85	711,47	1,85
Směrodatná odchylka:	4,57	0,27	66,47	0,08
P - hodnota testu normality dat: 0,054 => rozdělení je normální, použit Grubbsův test				

**Vosk G – ručně lité vzorky**

Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	106,34	1,63	594,40	1,75
2.	109,60	1,43	634,67	1,80
3.	110,27	1,73	678,32	1,82
4.	103,79	1,78	265,96	1,71
5.	112,25	2,04	307,52	1,85
6.	100,29	1,50	573,65	1,65
7.	122,56	2,13	320,78	2,02
8.	69,36	1,00	509,97	1,14
9.	66,93	0,78	646,60	1,10
10.	79,73	1,03	533,83	1,31
11.	101,81	1,33	661,71	1,68
12.	74,49	0,98	578,84	1,23
13.	104,44	1,40	650,99	1,72
14.	112,08	1,67	296,96	1,84
15.	81,62	1,08	570,11	1,34
16.	119,09	2,31	277,29	1,96
Arit. průměr:	100,51	1,54	497,00	1,65
Směrodatná odchylka:	15,87	0,40	150,61	0,26
P - hodnota testu normality dat: 0,033 => rozdělení není normální, použit Dean-Dixonův test				

**Vosk H – ručně lité vzorky**

Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	129,51	1,07	940,60	2,13
2.	137,12	1,45	776,31	2,26
3.	114,00	1,02	850,97	1,88
4.	134,94	1,37	728,70	2,22
5.	69,67	0,68	720,40	1,15
6.	114,62	1,08	877,79	1,89
7.	57,30	0,59	922,91	0,94
8.	129,33	1,24	883,15	2,13
9.	127,07	1,23	806,37	2,09
10.	123,53	1,17	806,75	2,03
11.	140,61	1,40	934,28	2,31
12.	63,78	0,57	841,61	1,05
13.	52,38	0,47	884,12	0,86
14.	110,21	1,00	762,96	1,81
15.	98,17	0,83	883,38	1,62
16.	79,18	0,72	832,26	1,30
Arit. průměr:	108,60	1,03	837,89	1,79
Směrodatná odchylka:	27,28	0,28	68,36	0,45
P - hodnota testu normality dat: 0,036 => rozdělení není normální, použit Dean-Dixonův test				



**Vosk I – ručně lité vzorky**

Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	133,43	1,41	405,94	2,20
2.	112,16	1,15	370,96	1,85
3.	124,04	1,49	354,72	2,04
4.	132,89	1,63	393,07	2,19
5.	93,95	0,94	364,99	1,55
6.	119,45	1,26	387,99	1,97
7.	119,46	1,29	373,84	1,97
8.	131,13	1,47	389,08	2,16
9.	113,62	1,21	347,11	1,87
10.	116,72	1,42	307,68	1,92
11.	50,87	0,47	419,77	0,84
12.	111,90	1,23	360,53	1,84
13.	132,84	1,59	356,06	2,19
14.	100,21	0,99	370,32	1,65
15.	115,17	1,30	336,98	1,90
16.	118,65	1,31	383,89	1,95
Arit. průměr:	118,38	1,31	366,88	1,95
Směrodatná odchylka:	11,22	0,19	23,96	0,18
P - hodnota testu normality dat: <0,005 => rozdělení není normální, použit Dean-Dixonův test				

**Vosk J – ručně lité vzorky**

Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	87,31	0,66	464,23	1,44
2.	96,55	0,69	477,28	1,59
3.	108,74	0,62	596,14	1,79
4.	89,37	0,57	566,42	1,47
5.	92,89	0,58	521,86	1,53
6.	107,77	0,69	502,31	1,77
7.	106,21	0,69	555,01	1,75
8.	105,14	0,68	521,49	1,73
9.	95,31	0,56	601,56	1,57
10.	30,73	0,28	550,84	0,51
11.	87,10	0,61	488,92	1,43
12.	97,06	0,70	478,31	1,60
13.	100,03	0,62	554,28	1,65
14.	100,05	0,71	430,27	1,65
15.	91,30	0,57	575,98	1,50
16.	90,91	0,62	502,15	1,50
Arit. průměr:	97,05	0,64	522,41	1,60
Směrodatná odchylka:	7,13	0,05	49,25	0,12
P - hodnota testu normality dat: <0,005 => rozdělení není normální, použit Dean-Dixonův test				

**Vosk K – ručně lité vzorky**

Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	138,14	1,36	363,42	2,27
2.	146,74	1,44	449,75	2,42
3.	92,93	0,70	506,82	1,53
4.	133,82	1,27	427,79	2,20
5.	134,91	1,17	463,25	2,22
6.	136,69	1,45	482,01	2,25
7.	139,26	1,44	438,00	2,29
8.	138,76	1,28	425,53	2,28
9.	143,21	1,50	465,41	2,36
10.	134,42	1,30	411,46	2,21
11.	136,92	1,28	451,23	2,25
12.	138,55	1,44	406,52	2,28
13.	128,80	1,10	423,56	2,12
14.	142,00	1,40	425,69	2,34
15.	140,69	1,26	459,70	2,32
16.	122,70	1,01	433,55	2,02
Arit. průměr:	137,04	1,31	435,12	2,26
Směrodatná odchylka:	5,64	0,13	28,15	0,09
P - hodnota testu normality dat: <0,005 => rozdělení není normální, použít Dean-Dixonův test				

**Vosk L – ručně lité vzorky**

Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	96,94	0,61	578,47	1,60
2.	107,60	0,81	476,49	1,77
3.	107,69	0,88	409,52	1,77
4.	102,14	0,68	528,37	1,68
5.	96,10	0,82	388,98	1,58
6.	46,56	0,45	363,44	0,77
7.	101,78	0,81	440,35	1,68
8.	95,16	0,72	490,12	1,57
9.	91,57	0,68	437,13	1,51
10.	110,52	0,85	450,61	1,82
11.	114,33	0,78	506,05	1,88
12.	94,38	0,70	480,80	1,55
13.	107,23	0,74	549,53	1,77
14.	110,87	0,87	464,99	1,82
15.	113,03	0,74	579,97	1,86
16.	107,79	0,71	541,55	1,77
Arit. průměr:	103,81	0,76	488,20	1,71
Směrodatná odchylka:	7,19	0,08	56,68	0,12
P - hodnota testu normality dat: <0,005 => rozdělení není normální, použít Dean-Dixonův test				

**Příloha 4 – Data pro kapitolu 2.2.1 – F (vstříkované vzorky)**

Poznámka: červeně označené hodnoty byly z měření vyřazeny testem odlehlých hodnot, podrobnosti viz poslední řádek každé tabulky. Oba testy podávají výsledky s 95% pravděpodobností.

<b>Vosk A – vstříkované vzorky</b>				
Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	273,06	3,09	602,34	1,49
2.	307,24	3,70	577,87	1,68
3.	331,10	4,11	678,56	1,81
4.	299,96	3,78	506,71	1,64
5.	275,27	2,89	606,88	1,50
6.	322,93	3,84	572,37	1,76
7.	332,04	4,04	600,38	1,81
8.	326,45	4,18	557,36	1,78
9.	316,64	3,92	580,83	1,74
10.	330,13	4,16	577,47	1,82
11.	303,40	3,69	584,28	1,67
12.	277,83	3,13	599,37	1,53
Arit. průměr:	308,00	3,71	587,03	1,68
Směrodatná odchylka:	21,46	0,42	37,75	0,12
P - hodnota testu normality dat: 0,113 => rozdělení je normální, použit Grubbsův test				

<b>Vosk B – vstříkované vzorky</b>				
Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	185,35	2,26	578,17	1,01
2.	196,78	2,74	515,49	1,07
3.	179,77	2,22	642,76	0,98
4.	183,98	2,29	650,12	1,00
5.	185,42	2,35	523,80	1,01
6.	176,26	2,16	606,80	0,96
7.	196,64	2,36	552,62	1,07
8.	197,12	2,49	608,17	1,08
9.	188,69	2,41	539,86	1,03
10.	195,96	2,35	556,03	1,07
11.	195,20	2,37	538,28	1,06
12.	179,49	2,08	578,50	0,98
Arit. průměr:	188,39	2,34	574,22	1,03
Směrodatná odchylka:	7,40	0,16	42,79	0,04
P - hodnota testu normality dat: 0,101 => rozdělení je normální, použit Grubbsův test				

**Vosk C – vstříkované vzorky**

Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	334,27	4,34	539,86	1,82
2.	321,22	3,91	555,64	1,75
3.	367,34	6,32	498,43	2,00
4.	302,52	3,26	609,09	1,65
5.	348,63	4,82	536,81	1,90
6.	365,32	5,55	598,22	1,99
7.	357,66	5,40	598,33	1,95
8.	371,34	6,13	504,04	2,03
9.	365,50	6,12	530,72	2,01
10.	350,78	5,08	549,56	1,93
11.	315,13	3,79	577,45	1,73
12.	357,59	5,33	545,54	1,97
Arit. průměr:	346,44	5,00	553,64	1,89
Směrodatná odchylka:	21,88	0,96	34,42	0,12

P - hodnota testu normality dat: 0,101 => rozdělení je normální, použit Grubbsův test

**Vosk D – vstříkované vzorky**

Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	286,21	8,18	448,99	1,56
2.	266,29	5,03	460,87	1,45
3.	280,25	10,01*	436,40	1,54
4.	292,82	9,30	457,72	1,60
5.	279,45	10,01*	434,52	1,54
6.	287,88	10,01*	424,57	1,58
7.	285,32	10,01*	480,84	1,57
8.	285,81	10,01*	464,08	1,57
9.	260,28	4,78	435,11	1,42
10.	292,49	8,65	446,64	1,60
11.	292,36	10,02*	429,05	1,59
12.	301,36	8,52	461,02	1,64
Arit. průměr:	284,21	8,71	448,32	1,56
Směrodatná odchylka:	11,02	1,82	16,23	0,06

P - hodnota testu normality dat: 0,166 => rozdělení je normální, použit Grubbsův test

\*Poznámka: hodnoty průhybů dosáhly nastavené limitní hodnoty.

**Vosk E – vstříkované vzorky**

Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	322,62	5,31	424,90	1,76
2.	329,58	5,58	439,55	1,80
3.	326,15	5,22	472,57	1,78
4.	258,17	3,17	480,58	1,41
5.	340,05	5,87	472,02	1,85
6.	333,85	5,45	451,24	1,82
7.	327,81	5,25	457,00	1,79
8.	272,91	3,58	520,66	1,49
9.	335,33	5,62	466,85	1,83
10.	240,38	2,85	553,31	1,31
11.	334,21	5,67	477,58	1,82
12.	332,69	5,14	495,98	1,81
Arit. průměr:	319,3981	5,077	468,99	1,742
Směrodatná odchylka:	25,98365	0,836	25,049	0,142
P - hodnota testu normality dat: <0,005 => rozdělení není normální, použít Dean-Dixonův test				

**Vosk F – vstříkované vzorky**

Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	316,92	5,09	474,20	1,73
2.	343,98	7,67	486,21	1,88
3.	316,85	5,29	483,29	1,73
4.	336,67	7,38	488,39	1,84
5.	330,41	6,23	489,00	1,80
6.	323,36	5,47	497,92	1,76
7.	335,80	6,54	510,89	1,83
8.	325,23	5,90	493,36	1,77
9.	212,44	2,72	678,87	1,16
10.	348,28	8,03	495,19	1,92
11.	296,74	3,17	472,36	1,63
12.	303,09	3,77	478,35	1,67
Arit. průměr:	325,21	5,87	488,11	1,78
Směrodatná odchylka:	15,37	1,46	10,69	0,08
P - hodnota testu normality dat: <0,005 => rozdělení není normální, použít Dean-Dixonův test				

**Vosk G – vstříkované vzorky**

Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	245,03	2,13	717,75	1,35
2.	257,97	2,29	703,77	1,42
3.	256,92	2,28	715,43	1,41
4.	280,85	2,58	666,81	1,54
5.	297,01	2,79	646,27	1,63
6.	247,47	2,16	733,35	1,36
7.	267,21	2,41	699,93	1,47
8.	263,46	2,36	696,38	1,45
9.	271,25	2,46	690,30	1,49
10.	250,35	2,19	701,31	1,38
11.	273,62	2,49	685,10	1,50
12.	250,98	2,20	725,24	1,38
Arit. průměr:	263,51	2,36	698,47	1,45
Směrodatná odchylka:	14,73	0,19	23,46	0,08

P - hodnota testu normality dat: 0,56 => rozdělení je normální, použit Grubbsův test

**Vosk J – vstříkované vzorky**

Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	251,34	1,96	710,81	1,37
2.	238,02	1,83	746,58	1,30
3.	258,34	2,00	774,02	1,41
4.	230,04	1,83	713,20	1,25
5.	251,42	1,87	753,57	1,37
6.	255,49	1,89	746,91	1,39
7.	250,02	1,96	704,03	1,36
8.	267,55	2,02	732,10	1,46
9.	225,43	1,91	742,86	1,23
10.	256,11	2,06	784,49	1,40
11.	239,85	1,86	811,08	1,31
12.	227,54	1,69	794,65	1,24
Arit. průměr:	245,93	1,91	751,19	1,34
Směrodatná odchylka:	12,92	0,10	32,76	0,07

P - hodnota testu normality dat: 0,356 => rozdělení je normální, použit Grubbsův test

**Vosk K – vstříkované vzorky**

Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	342,11	3,82	667,43	1,87
2.	341,78	4,07	730,22	1,86
3.	337,02	4,00	726,90	1,84
4.	332,07	3,92	665,01	1,81
5.	340,68	4,05	644,53	1,86
6.	316,02	3,37	712,00	1,72
7.	344,12	4,22	717,80	1,88
8.	308,01	3,09	661,97	1,68
9.	328,58	3,67	690,77	1,79
10.	261,51	2,52	579,99	1,43
11.	300,89	3,16	671,76	1,64
12.	324,13	3,61	670,09	1,77
Arit. průměr:	328,67	3,73	687,13	1,79
Směrodatná odchylka:	14,13	0,36	28,38	0,08
P - hodnota testu normality dat: 0,036 => rozdělení není normální, použít Dean-Dixonův test				

**Vosk L – vstříkované vzorky**

Číslo vzorku	Maximální zatížení [N]	Maximální průhyb [mm]	Modul pružnosti [MPa]	Smluvní mez pevnosti [MPa]
1.	286,73	2,63	874,96	1,56
2.	261,08	2,30	639,94	1,42
3.	295,40	2,76	672,08	1,61
4.	271,04	2,66	569,61	1,48
5.	244,79	2,13	777,14	1,34
6.	287,00	2,71	652,00	1,57
7.	261,69	2,41	635,90	1,43
8.	298,13	2,91	659,30	1,63
9.	296,72	2,68	661,22	1,62
10.	271,80	2,41	676,48	1,48
11.	267,83	2,41	635,97	1,46
12.	268,18	2,24	633,82	1,46
Arit. průměr:	275,87	2,52	674,04	1,50
Směrodatná odchylka:	16,08	0,23	75,53	0,09
P - hodnota testu normality dat: 0,337 => rozdělení je normální, použít Grubbsův test				

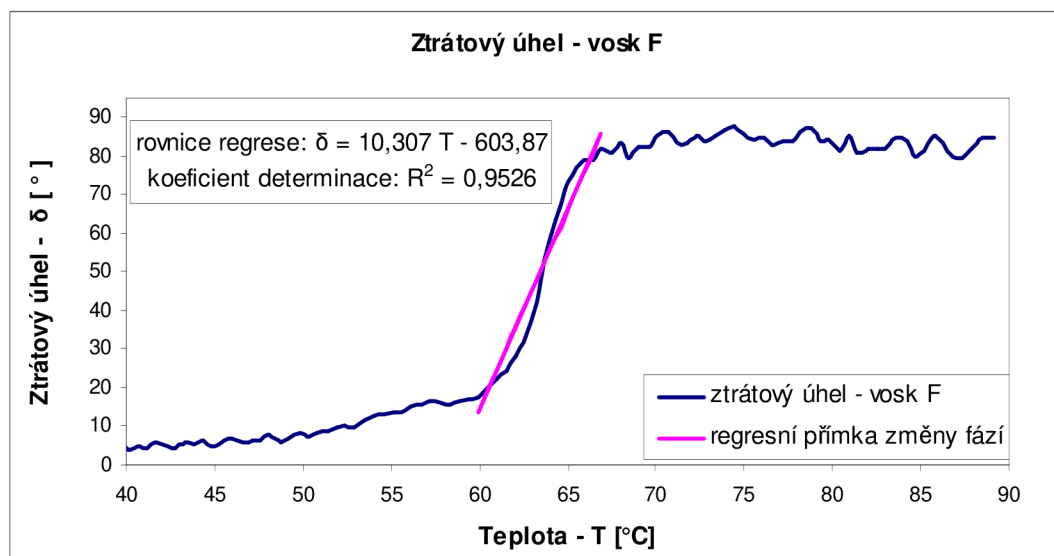
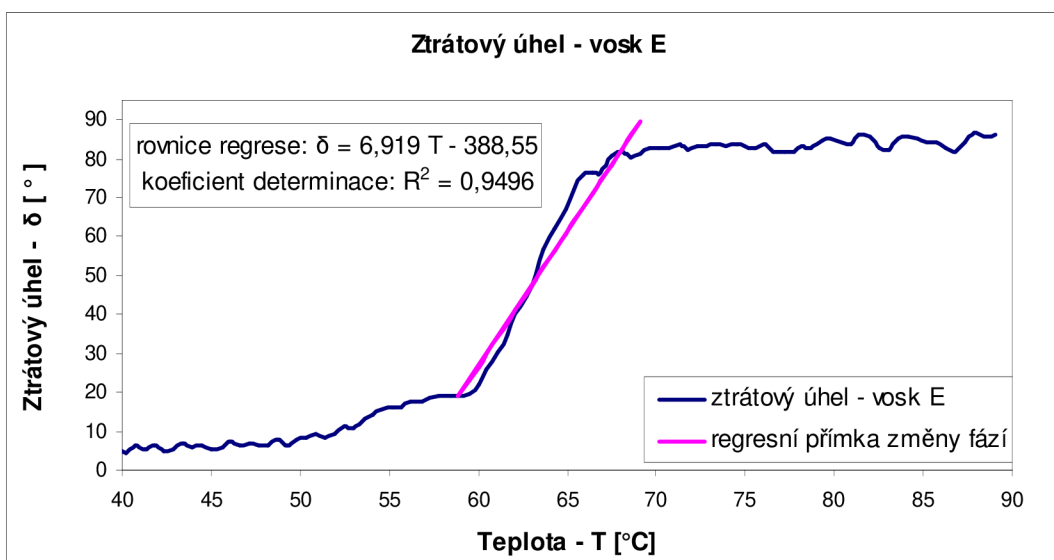
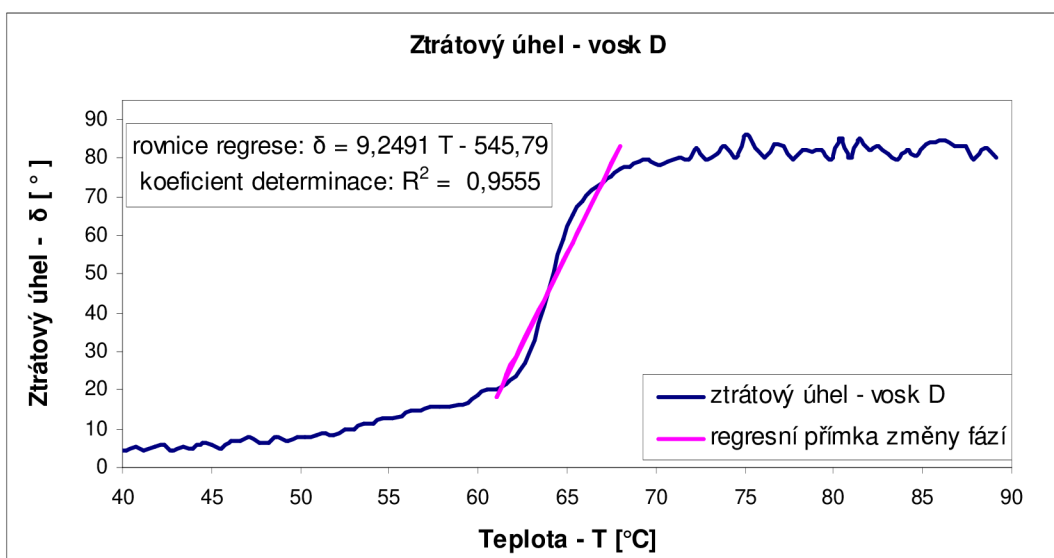


## Příloha 5 – Data pro kapitoly 2.2.1 – G, J

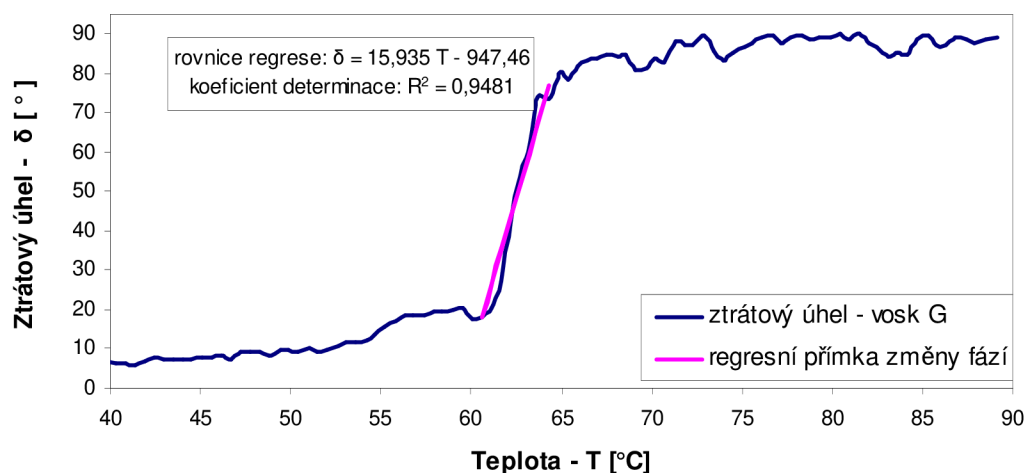
Dynamická viskozita		
Vosk	Viskozita při 70 °C [Pa·s]	Viskozita v bodě tuhnutí [Pa·s]
A	0,776	1,041
B	1,523	2,349
C	1,329	1,986
D	1,504	2,118
E	1,461	2,271
F	1,273	2,05
G	0,418	0,624
H	1,093	1,708
I	0,950	1,324
J	1,048	1,511
K	1,086	1,235
L	2,127	3,514

Rozměrová analýza										
Naměřené rozměry na zkušební tělese TT150 pro rozměr 150,05 mm v matečné formě										
Č. vzorku \ Vosk	A	B	C	D	E	F	G	J	K	L
1	148,90	148,97	149,04	149,22	148,77	148,91	148,74	149,07	149,06	149,04
2	148,92	148,94	149,08	149,27	148,97	148,88	148,83	149,11	149,08	148,94
3	148,88	149,00	149,14	149,14	149,12	148,98	148,90	149,11	148,99	148,97
4	148,88	148,90	149,12	149,16	148,97	148,94	148,79	149,10	149,00	149,03
5	148,98	148,97	149,00	149,20	148,78	148,86	148,87	149,13	149,01	148,96
6	148,92	149,04	149,04	149,12	149,06	148,90	148,80	149,10	148,97	148,94
7	148,93	149,03	149,02	149,10	148,82	148,79	148,83	149,00	149,04	148,93
8	148,91	149,05	149,19	149,12	148,82	148,75	148,82	149,11	149,06	148,96
9	148,95	149,02	149,08	149,02	149,05	148,90	148,86	149,08	149,03	148,96
10	149,04	149,01	149,12	149,04	149,04	148,87	148,94	149,08	149,04	148,94
11	149,04	148,93	149,10	149,00	148,88	148,76	148,87	149,12	149,16	148,94
12	148,93	148,92	149,08	148,93	148,91	148,79	148,99	149,14	149,00	148,94
13	148,84	149,01	149,07	149,13	148,83	148,86	148,77	149,10	149,08	148,94
14	148,89	149,04	149,02	148,92	148,83	148,92	148,85	149,08	149,04	148,98
15	148,89	149,00	149,13	149,13	148,83	148,78	148,95	149,11	149,11	148,98
16	148,89	149,00	149,12	148,90	148,99	148,88	148,83	149,14	149,02	148,93
17	148,92	149,00	149,10	149,11	149,14	148,73	148,89	149,13	149,03	148,95
18	148,91	148,93	149,04	149,11	149,04	148,88	148,92	149,12	148,99	148,95
19	148,86	149,03	149,08	149,05	148,84	148,84	148,88	149,10	149,16	148,97
20	148,89	149,00	149,05	148,95	148,90	148,82	148,90	149,14	149,17	148,94
21	150,05	150,05	150,05	150,05	150,05	150,05	150,05	150,05	150,05	150,05
Arit. Průměr [mm]	148,97	149,04	149,13	149,13	148,98	148,91	148,92	149,15	149,10	149,01
Směrodatná odchylka [mm]	0,2459	0,23	0,2112	0,2282	0,2627	0,2631	0,2601	0,2037	0,2199	0,234
Smrštění [%]:	0,7161	0,6712	0,613	0,613	0,7081	0,7585	0,752	0,5986	0,6315	0,6904

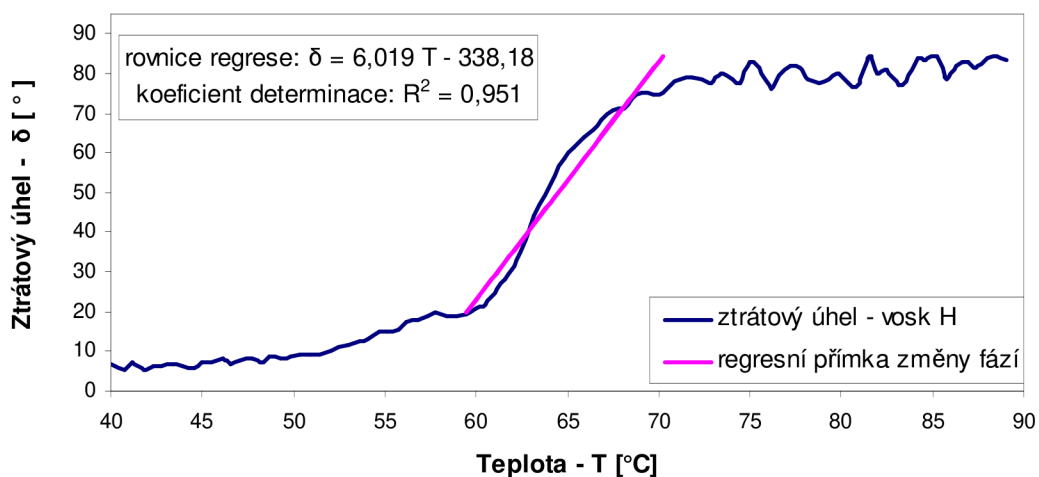
## Příloha 6 – Grafy pro kapitulu 2.2.1 – H



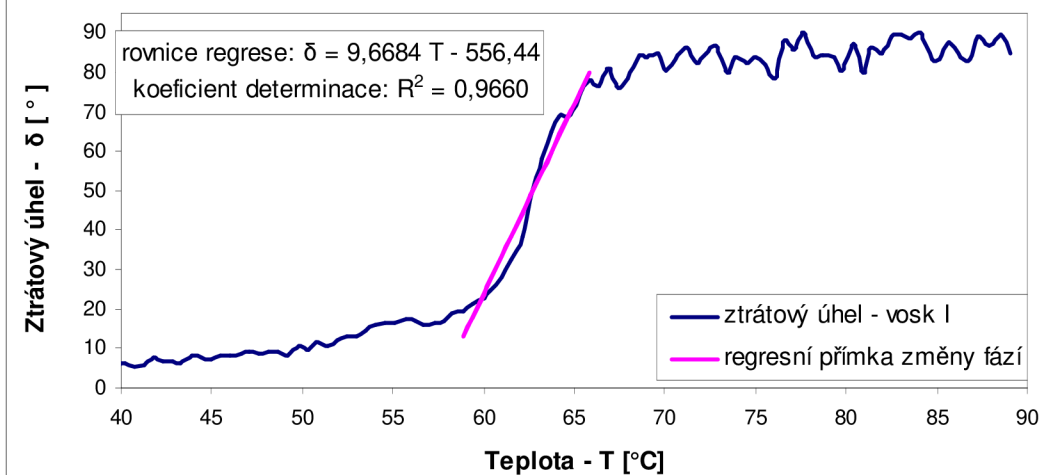
Ztrátový úhel - vosk G



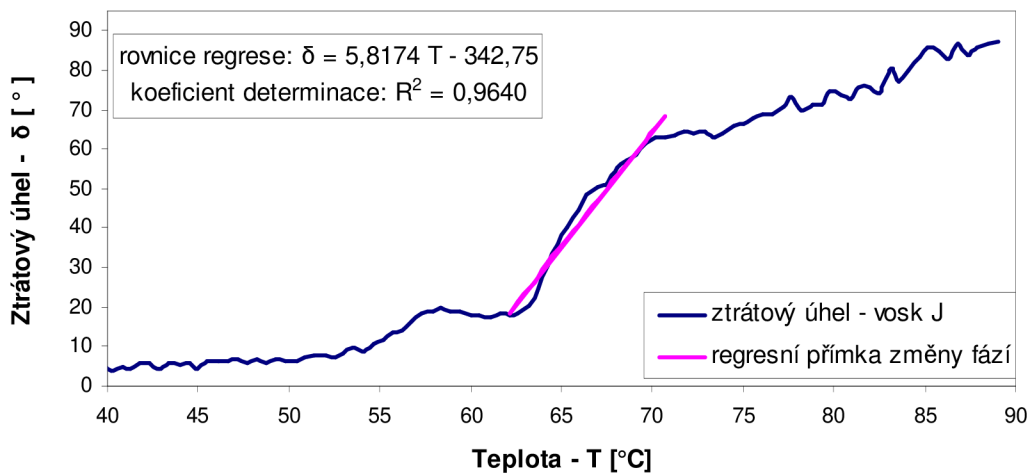
Ztrátový úhel - vosk H



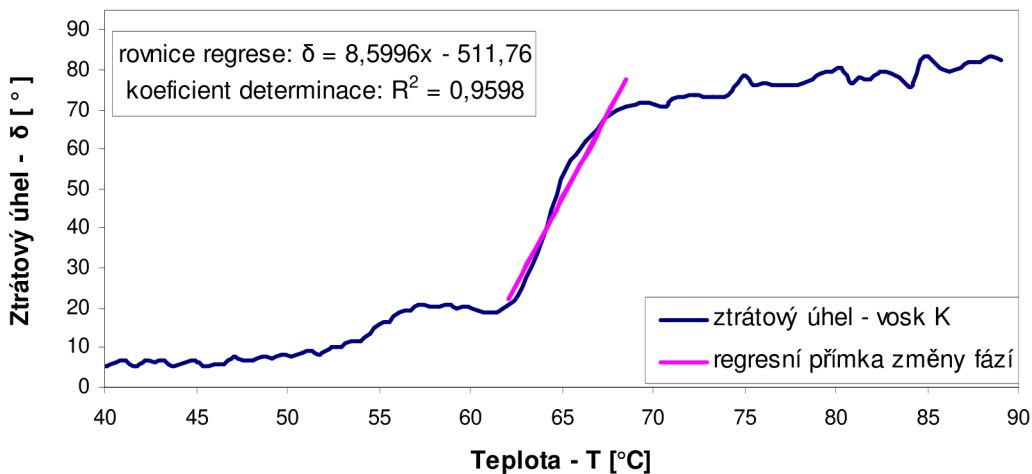
Ztrátový úhel - vosk I



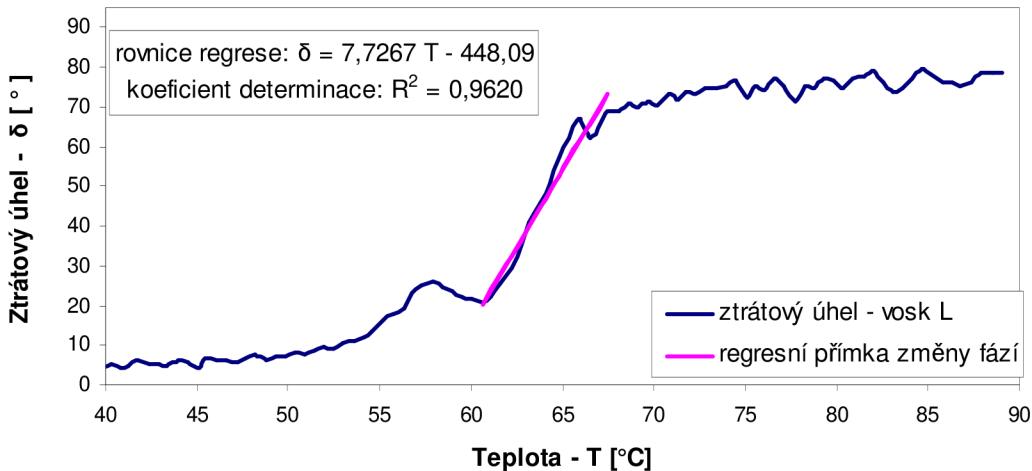
Ztrátový úhel - vosk J



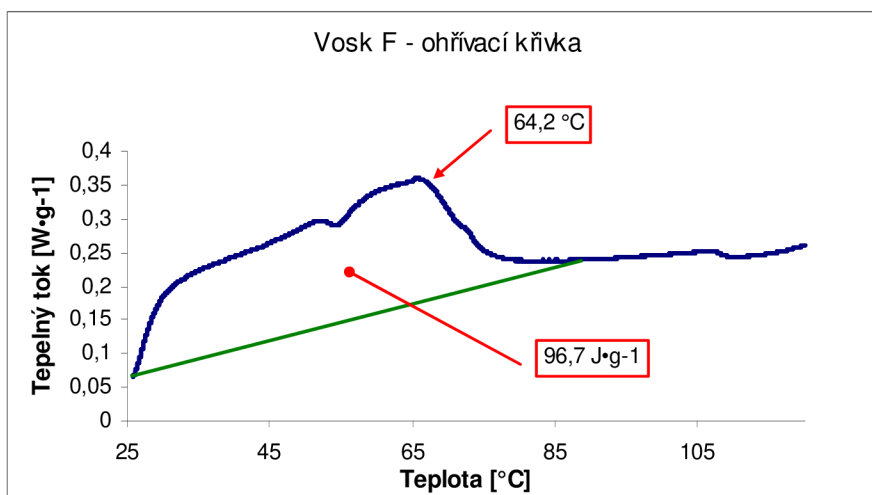
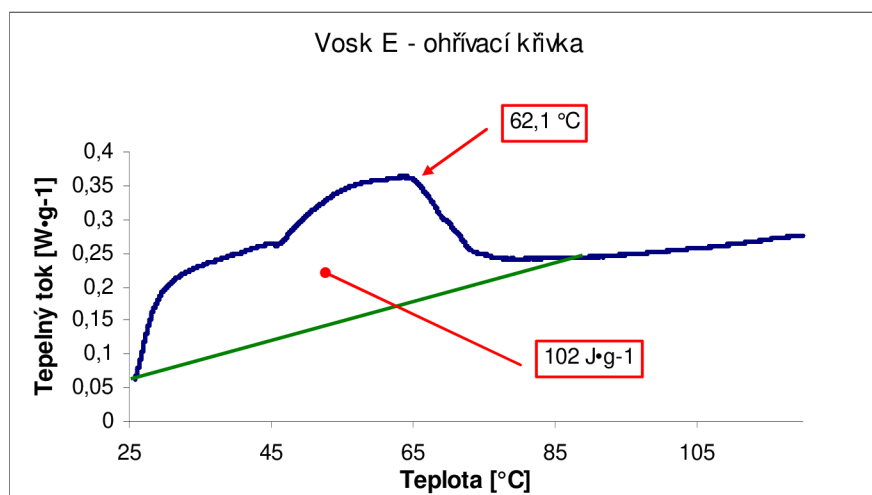
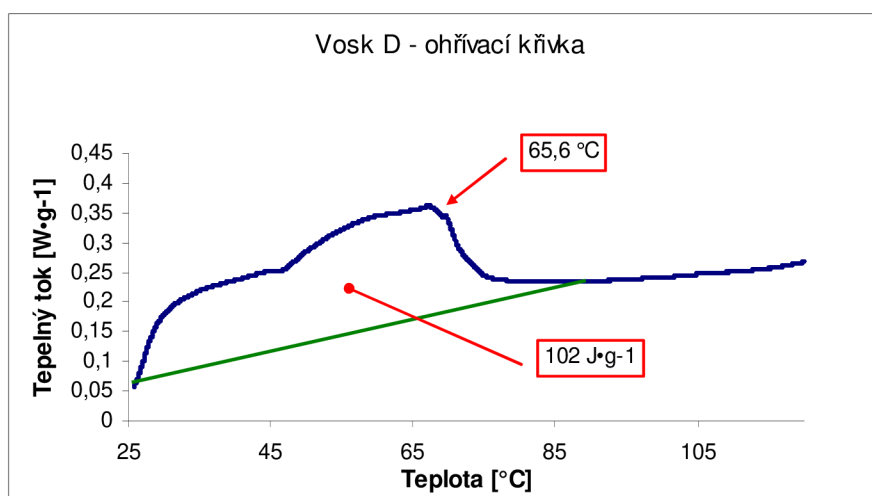
Ztrátový úhel - vosk K

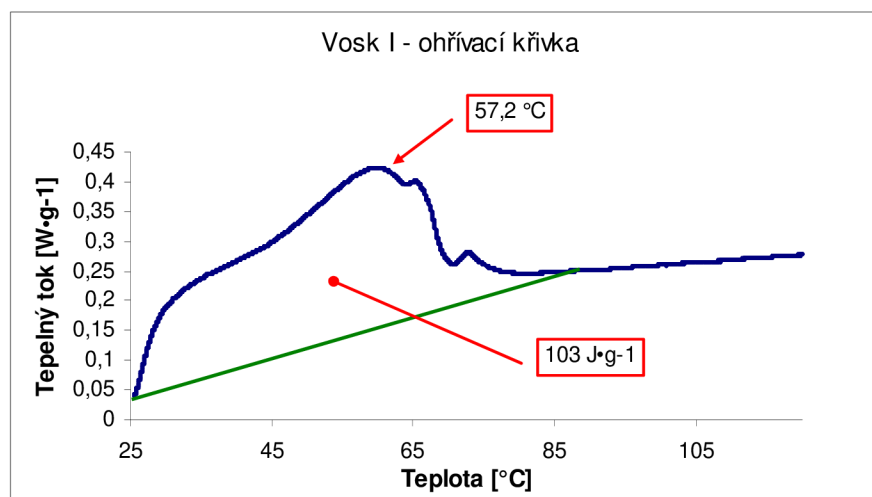
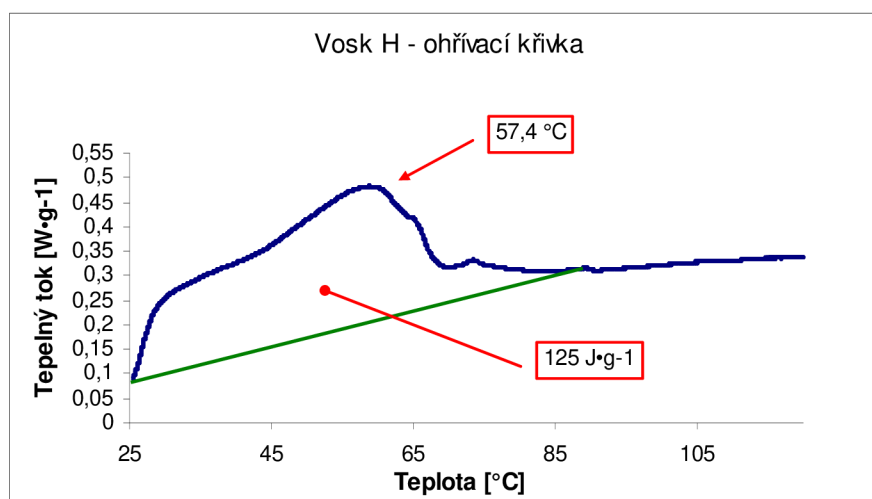
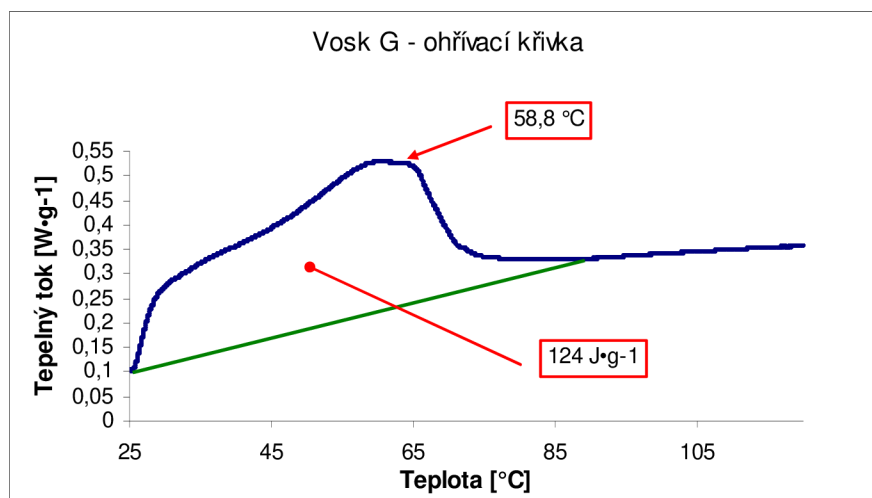


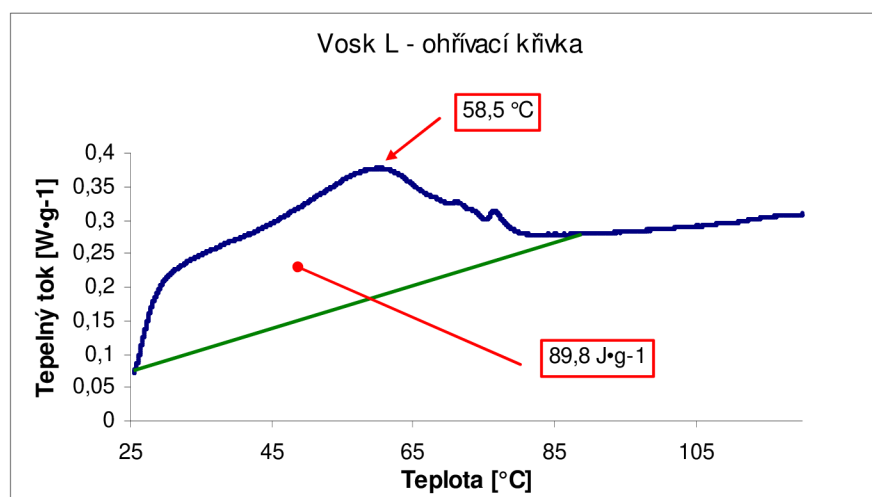
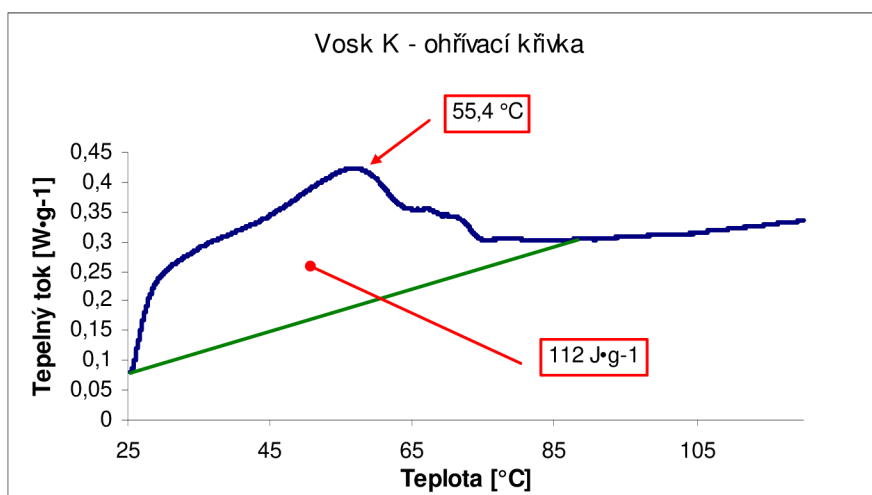
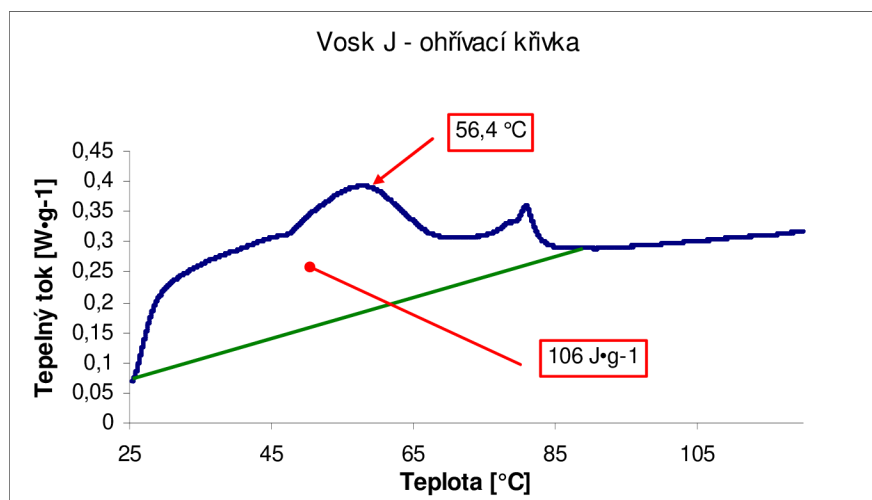
Ztrátový úhel - vosk L



## Příloha 7 – Grafy pro kapitolu 2.2.1 – I

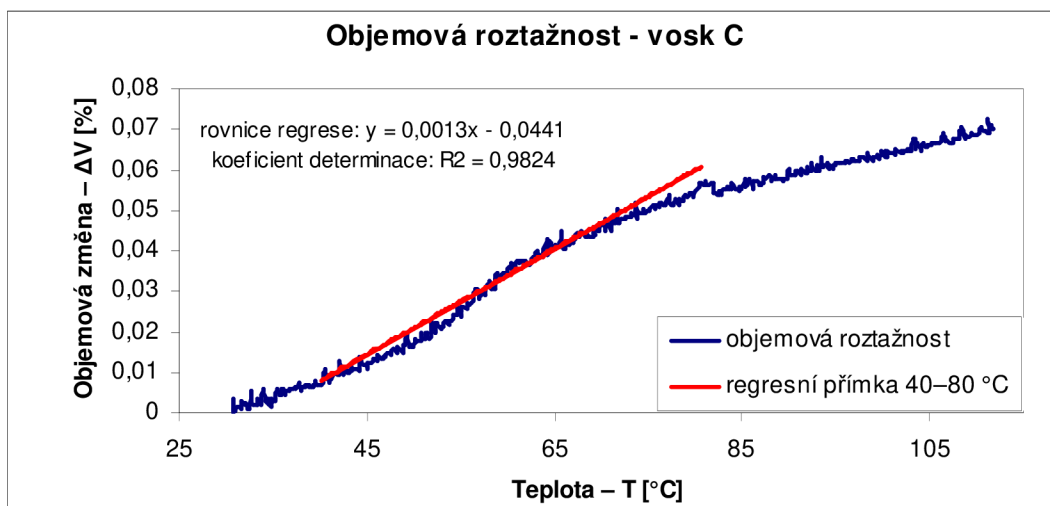
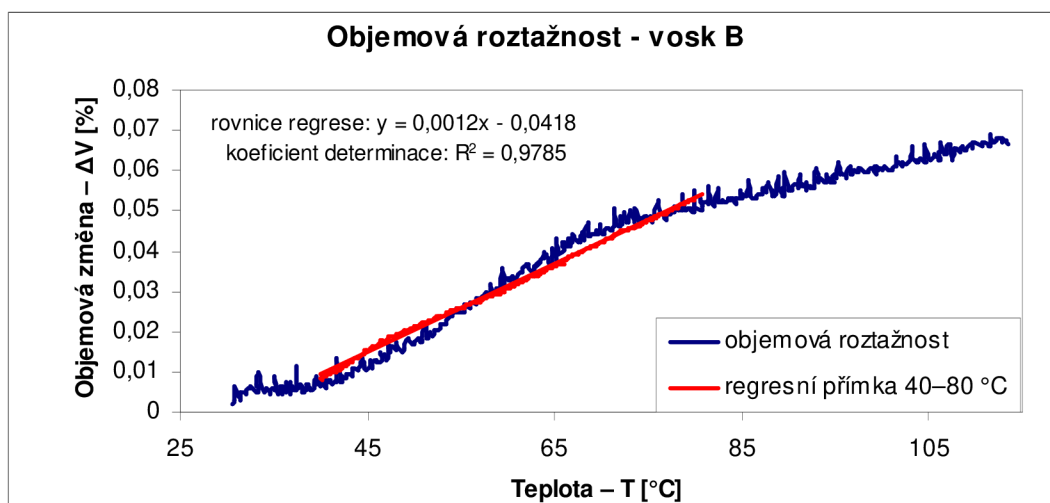
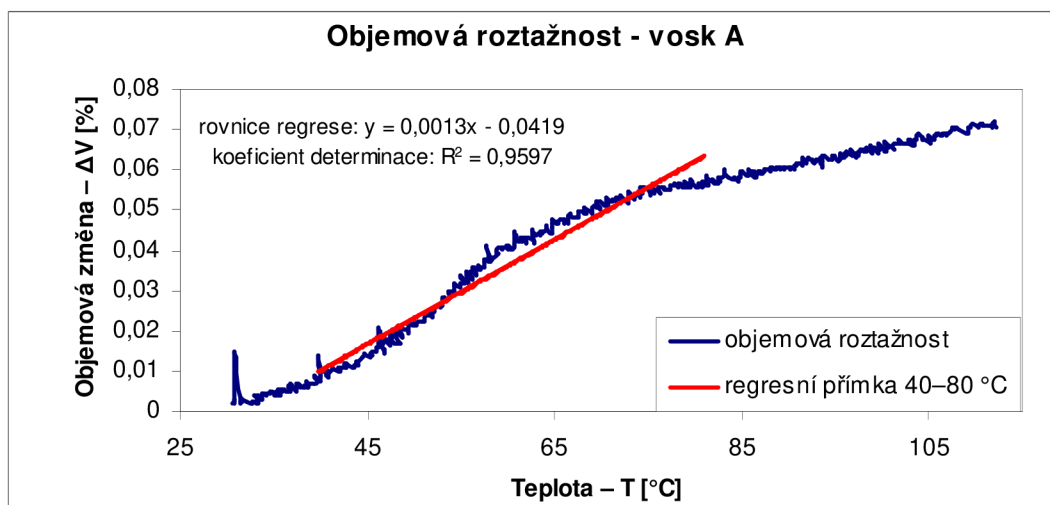


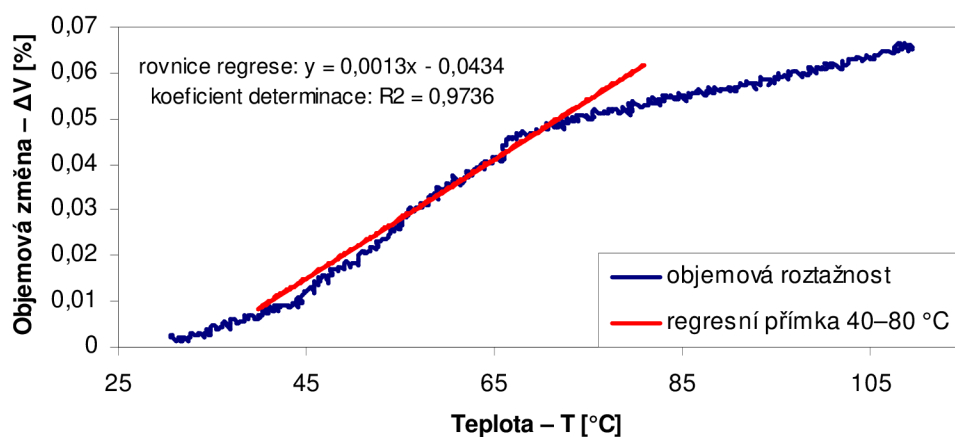
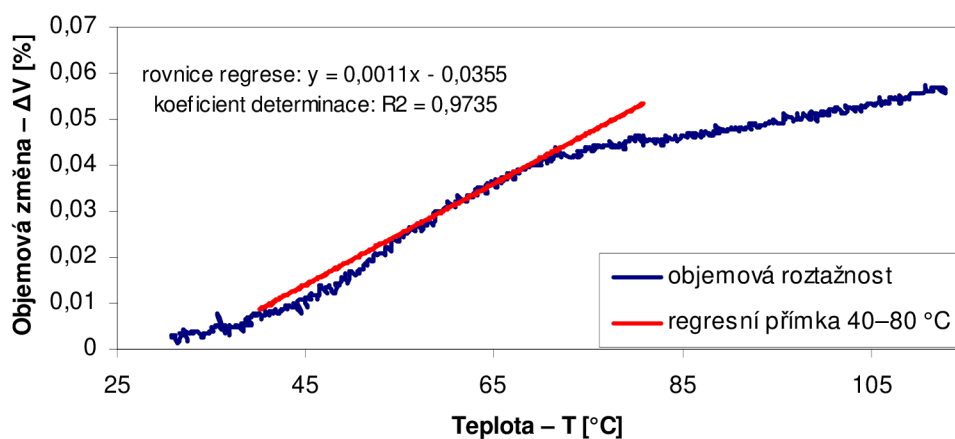
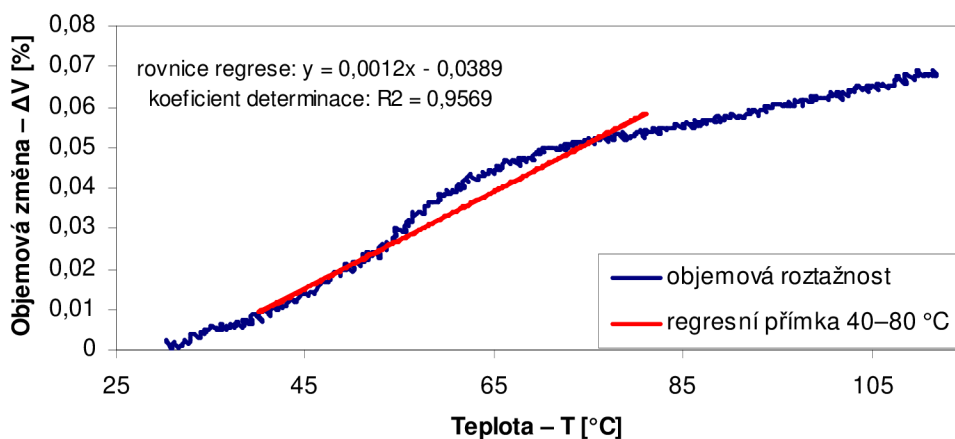


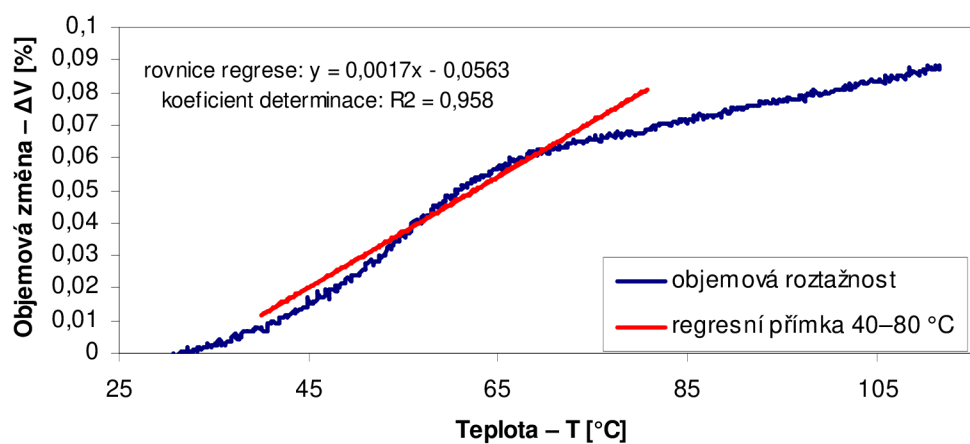
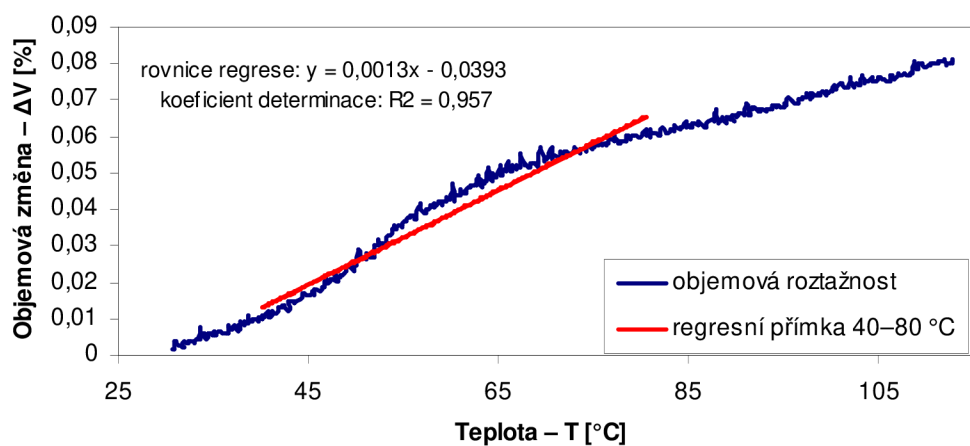
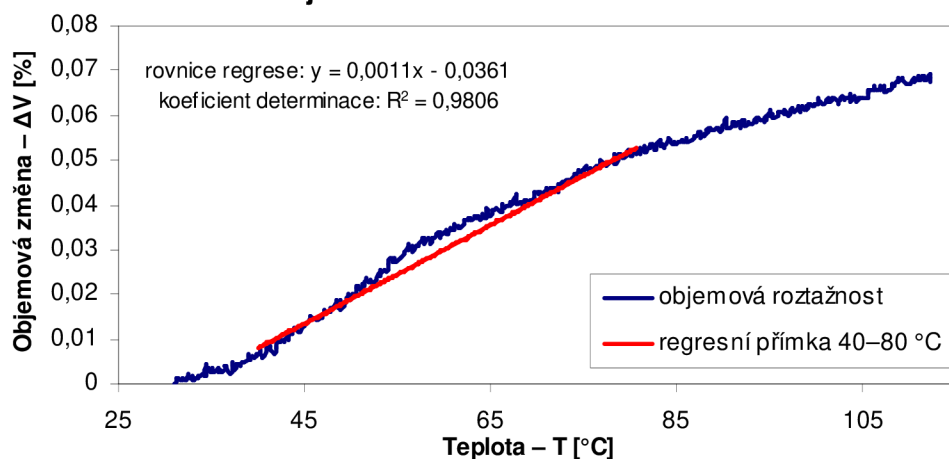


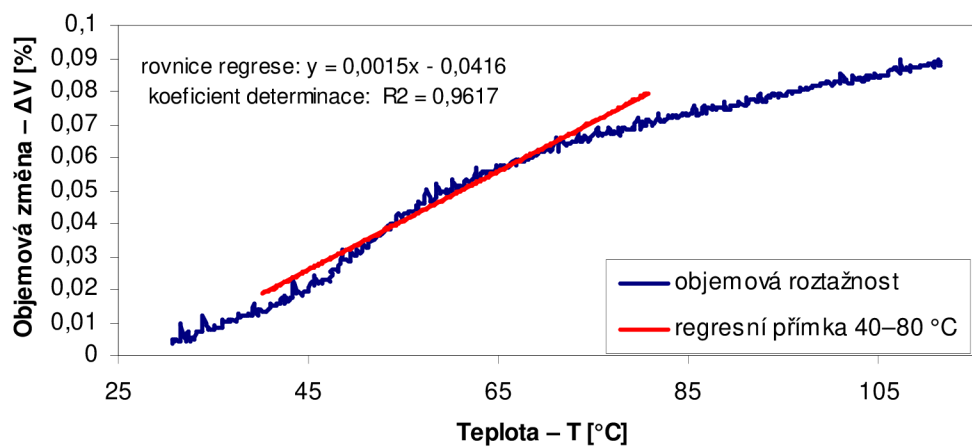
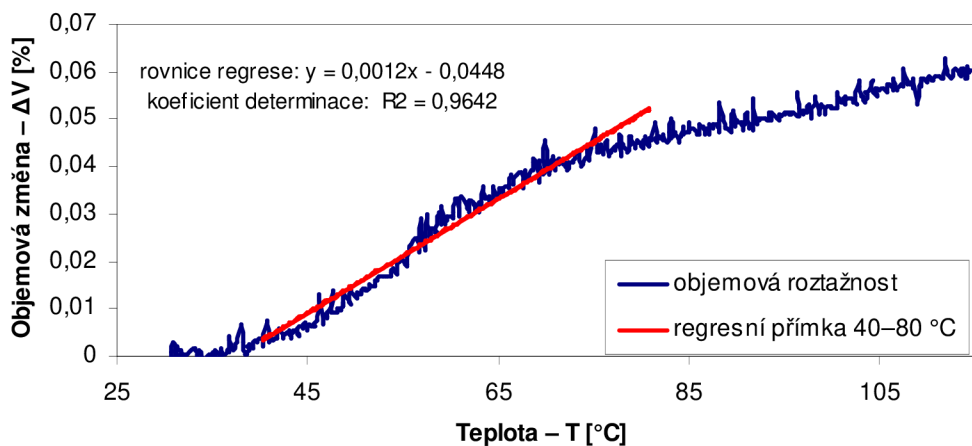


## Příloha 8 – Grafy pro kapitolu 2.2.1 – K



**Objemová roztažnost - vosk D****Objemová roztažnost - vosk E****Objemová roztažnost - vosk F**

**Objemová roztažnost - vosk G****Objemová roztažnost - vosk H****Objemová roztažnost - vosk J**

**Objemová roztažnost - vosk K****Objemová roztažnost - vosk L**

## Příloha 9 – Data pro kapitolu 2.3.1 – A

Vosk A	Rozměr po 96 hodinách [mm]			
Číslo vzorku	X	Y	Z	B
1	174,16	39,91	Měření neproběhlo	140,71
2	174,15	39,86		140,71
3	174,03	39,87		140,70
4	174,11	39,84		140,73
5	174,12	39,85		140,69
6	174,11	39,88		140,71
7	174,12	39,89		140,80
8	174,10	39,90		140,74
9	174,11	39,89		140,71
10	174,11	39,86		140,77
11	174,09	39,87		140,77
12	174,15	39,87		140,72
13	174,14	39,86		140,76
14	174,11	39,89		140,73
15	174,14	39,86		140,72
Aritmet. průměr [mm]	174,12	39,87	/	140,73
Směrod. odchylka [mm]	0,03	0,02	/	0,03
Smrštění [%]	1,57	1,79	/	0,75

Vosk B	Rozměr po 96 hodinách [mm]			
Číslo vzorku	X	Y	Z	B
1	174,42	39,98	Měření neproběhlo	141,18
2	174,35	39,99		141,1
3	174,25	39,98		141,11
4	174,28	39,96		141,19
5	174,32	39,98		141,21
6	174,15	39,98		141,13
7	174,19	39,97		141,12
8	174,22	39,95		141,17
9	174,15	39,98		141,17
10	174,31	39,99		141,18
Aritmet. průměr [mm]	174,26	39,98	/	141,16
Směrod. odchylka [mm]	0,08	0,01	/	0,04
Smrštění [%]	1,49	1,54	/	0,45

Vosk D	Rozměr po 96 hodinách [mm]			
Číslo vzorku	X	Y	Z	B
1	174,27	39,92	49,92	Měření neproběhlo
2	174,23	39,97	49,92	
3	174,29	40,01	49,92	
4	174,3	40,09	49,92	
5	174,34	40,05	49,96	
6	174,38	39,99	49,91	
7	174,42	39,99	49,92	
8	174,4	39,99	49,92	
9	174,44	39,99	49,94	
10	174,43	39,99	49,93	
Aritmet. průměr [mm]	174,35	40,00	49,93	/
Směrod. odchylka [mm]	0,07	0,04	0,01	/
Smrštění [%]	1,44	1,48	1,95	/

Vosk J	Rozměr po 96 hodinách [mm]			
Číslo vzorku	X	Y	Z	B
1	174,64	40,01	49,97	141
2	174,63	40,02	49,93	140,95
3	174,64	40,02	49,92	141
4	174,68	40,02	49,94	140,98
5	174,67	40,04	49,98	141,06
6	174,7	40,04	49,94	141,06
7	174,68	40,03	49,93	141,02
8	174,69	40,05	49,93	141,08
9	174,69	40,03	49,97	141,06
10	174,68	40,04	49,93	141,03
11	174,66	40,05	49,92	141,01
12	174,67	40,04	49,93	141,01
13	174,69	40,04	49,95	140,98
14	174,66	40,03	49,94	141,02
15	174,67	40,02	49,93	141,07
16	174,7	40,04	49,94	141,04
17	174,69	39,99	49,94	141,07
18	174,65	39,99	49,96	141,04
19	174,69	40,01	49,98	141,02
20	174,68	40,02	49,96	141,06
21	174,69	40	49,96	140,97
22	174,71	40,05	49,93	141,07
23	174,68	40,01	49,96	141,07
24	174,68	40,01	49,92	141,03
25	174,69	40,04	49,97	141,03
26	174,69	40,03	49,96	141,06
27	174,66	40,03	49,95	141,01
28	174,67	40,01	49,97	141,05
29	174,67	40,01	49,97	141,02
30	174,69	40,01	49,97	141
Aritmet. průměr [mm]	174,68	40,02	49,95	141,03
Směrod. odchylka [mm]	0,02	0,02	0,02	0,03
Smrštění [%]	1,26	1,42	1,91	0,54

Vosk L	Rozměr po 96 hodinách [mm]			
Číslo vzorku	X	Y	Z	B
1	174,58	40,01	50,01	141,01
2	174,56	40,02	49,97	140,95
3	174,48	40,02	49,94	140,93
4	174,55	40,04	49,94	140,92
5	174,51	40,02	49,91	140,92
6	174,55	40,01	49,92	140,91
7	174,55	40,00	49,91	140,92
8	174,62	40,00	50,00	140,99
9	174,62	39,99	49,95	140,94
10	174,55	40,01	49,93	140,94
11	174,56	40,02	49,94	140,95
12	174,58	40,01	49,96	141,00
13	174,57	40,00	49,95	140,95
14	174,58	40,02	49,92	140,92
15	174,58	40,03	49,95	140,96
16	174,54	40,02	49,95	140,92
17	174,55	40,03	49,93	140,93
18	174,53	40,00	49,95	140,97
19	174,59	40,03	49,93	140,94
20	174,58	40,00	49,92	140,92
21	174,58	40,01	49,94	140,93
22	174,58	40,02	49,92	140,91
23	174,54	40,01	49,92	140,91
24	174,60	40,01	49,96	140,95
25	174,58	40,00	49,94	140,90
26	174,53	40,03	49,95	140,94
27	174,53	40,01	49,94	140,89
28	174,56	40,01	49,94	140,91
29	174,56	40,01	49,94	140,92
30	174,59	40,01	49,94	140,97
Aritmet. průměr [mm]	174,56	40,01	49,94	140,94
Směrod. odchylka [mm]	0,03	0,01	0,02	0,03
Smrštění [%]	1,32	1,44	1,92	0,60

Vosk L+	Rozměr po 96 hodinách [mm]			
Číslo vzorku	X	Y	Z	B
1	174,42	40,00	49,97	140,95
2	174,42	39,98	49,99	140,92
3	174,45	39,97	49,98	140,98
4	174,42	39,99	49,96	140,88
5	174,41	39,99	49,94	140,84
6	174,36	39,98	49,93	140,88
7	174,40	39,97	49,99	140,87
8	174,33	39,97	49,98	140,81
9	174,35	39,97	49,98	140,82
10	174,40	39,94	49,97	140,85
11	174,41	39,99	49,95	140,87
12	174,41	39,97	49,97	140,87
13	174,37	39,97	49,96	140,87
14	174,36	39,97	49,98	140,87
15	174,35	39,97	49,97	140,86
16	174,39	39,97	49,94	140,88
17	174,40	39,96	49,96	140,81
18	174,42	39,98	49,97	140,88
19	174,42	39,98	49,98	140,89
20	174,38	39,98	49,98	140,86
Aritmet. průměr [mm]	174,39	39,98	49,97	140,87
Směrod. odchylka [mm]	0,03	0,01	0,02	0,04
Smrštění [%]	1,42	1,54	1,87	0,65

Vosk D+	Rozměr po 96 hodinách [mm]			
Číslo vzorku	X	Y	Z	B
1	174,29	40,02	49,92	/
2	174,32	39,99	49,89	140,80
3	174,21	39,95	49,97	140,73
4	174,19	39,93	50,05	140,64
5	174,16	39,95	49,93	140,77
6	174,22	39,94	49,96	140,66
7	174,19	39,92	49,96	140,68
8	174,16	40,04	49,88	140,64
9	174,17	39,92	49,95	140,71
10	174,15	39,95	49,89	140,81
11	174,20	39,94	49,91	140,80
12	174,23	39,97	49,89	140,77
13	174,26	39,92	49,99	140,81
14	174,14	39,94	49,92	140,74
15	174,26	39,96	49,93	140,67
16	174,22	39,95	49,95	140,70
17	174,14	39,91	49,95	140,67
18	174,14	39,97	49,92	140,71
19	174,22	39,91	49,93	140,75
20	174,19	39,95	49,97	140,77
Aritmet. průměr [mm]	174,20	39,95	49,94	140,73
Směrod. odchylka [mm]	0,05	0,03	0,04	0,06
Smrštění [%]	1,52	1,60	1,93	0,75

Vosk D+	Rozměr po 24 hodinách [mm]			
Číslo vzorku	X	Y	Z	B
1	174,43	40,00	50,05	141,04
2	174,42	40,05	50,07	141,00
3	174,38	40,04	50,06	140,90
4	174,43	40,02	50,05	140,89
5	174,42	40,04	50,04	141,11
6	174,48	40,09	50,04	140,93
7	174,40	39,99	50,02	140,97
8	174,39	40,04	50,03	141,01
9	174,38	40,03	50,02	141,04
10	174,35	40,03	49,99	141,13
11	174,40	40,04	50,03	141,13
12	174,53	40,06	50,03	141,06
13	174,42	40,05	50,04	141,12
14	174,40	40,05	50,06	141,08
15	174,46	40,07	50,07	140,98
16	174,46	40,03	50,09	140,99
17	174,46	40,05	50,09	141,05
18	174,46	40,05	50,08	140,99
19	174,41	40,08	50,03	141,02
20	174,47	40,08	50,07	140,99
Aritmet. průměr [mm]	174,43	40,04	50,05	141,02
Směrod. odchylka [mm]	0,04	0,02	0,03	0,07
Smrštění [%]	1,40	1,37	1,71	0,54

Vosk L+	Rozměr po 24 hodinách [mm]			
Číslo vzorku	X	Y	Z	B
1	174,51	39,98	50,00	140,91
2	174,46	40,00	49,99	140,94
3	174,48	39,98	50,00	140,92
4	174,48	39,99	50,00	140,93
5	174,43	39,99	49,98	140,90
6	174,40	39,98	49,93	140,90
7	174,42	39,98	50,00	140,91
8	174,34	39,98	49,98	140,90
9	174,36	39,99	49,99	140,85
10	174,46	39,98	49,98	140,87
11	174,40	39,98	49,98	140,90
12	174,42	39,99	49,96	140,91
13	174,43	40,00	49,97	140,87
14	174,42	39,99	49,97	140,91
15	174,40	39,97	49,96	140,89
16	174,43	39,99	49,97	140,92
17	174,43	39,98	49,96	140,84
18	174,43	39,99	49,98	140,90
19	174,42	39,98	49,97	140,91
20	174,42	39,97	49,97	140,89
Aritmet. průměr [mm]	174,43	39,98	49,98	140,90
Směrod. odchylka [mm]	0,04	0,01	0,02	0,02
Smrštění [%]	1,40	1,52	1,85	0,63