

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektrotechnologie

**Viskozita pastovitých materiálů  
pro elektrotechniku**

*Bakalářská práce*

Praha 2016

Autor práce: **Jakub Močíčka**

Vedoucí práce: **Ing. Ivana Beshajová Pelikánová Ph.D.**

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jakub Močička**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Viskozita pastovitých materiálů pro elektrotechniku**

### Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši zabývající se strukturou a vlastnostmi sítotiskových a pájecích past.
2. Pojednejte o viskozitě pastovitých materiálů a jejím měření.
3. S pomocí rotačního viskozimetru proveďte měření viskozity vybraných past.
4. Naměřené výsledky vyhodnoťte.

### Seznam odborné literatury:

- [1] ČSN EN ISO 3219, *Plasty. Polymery/pryskyřice v kappalném nebo emulgovaném nebo dispergovaném stavu. Stanovení viskozity rotačním viskozimetrem s definovanou smykovou rychlostí*, Prosinec 1996
- [2] Brookfield Dial Viscometer: Operating Instruction – manual, 1985
- [3] BESHajOVÁ PELIKÁNOVÁ, Ivana. The Influence of Viscosity of Thick Film Pastes on Quality of Printed Structures. In *19th Electronic Devices and Systems Conference 2012*, Brno, červen 2012, pp. 283 - 288, ISBN 978-80-214-4539-0
- [4] ONDRÁČEK, Michal. *Vliv viskozity tlustovrstvé pasty před tiskem na formování vrstev : bakalářská práce*. VUT v Brně. 2012. Dostupné na <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/12456/BP%20xondra28.pdf?sequence=1>

Vedoucí: Ivana Pelikánová Beshajová Ing., Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

Ing. Karel Dušek, Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 8. 3. 2016

## **Prohlášení**

1. Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.
2. Souhlasím s tím, aby práce byla zpřístupněna pro studijní a výzkumné účely.

V Praze dne 22. 5. 2016

Jakub Močíčka

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí své práce Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové Ph.D. za nespočet podnětů k mé bakalářské práci, za pomoc při měření a za opravu přístrojů, které byly potřeba k vyhotovení práce. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu během celého studia a za udílení motivace, která mě dovedla až sem.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá viskozitou pastovitých materiálů pro elektrotechniku. V práci jsou popsány základní struktury, vlastnosti a využití past používaných pro tlusté vrstvy, dále je proveden rozbor tekutin z hlediska řízení se Newtonovým zákonem viskozity a praktické způsoby měření viskozity. Za pomoci rotačního viskozimetru je změřeno několik vzorků sítotiskových a pájecích past, pro které je určena závislost viskozity na otáčkách za minutu a vliv teploty na viskozitu. Pro vybrané vzorky je dále změřena teplotní závislost viskozity.

## **Abstract**

This bachelor thesis is focused on viscosity of paste materials for electrotechnics. In thesis are described basic structures, properties and usage of pastes for thick layers, also analysis of fluids from following the Newton law of viscosity point is carried out. With a use of a rotational viscometer few samples of soldering and screen printing pastes are measured, for those pastes the dependency of viscosity on rotation per minute is determined. Also on selected pastes the temperature dependency of viscosity is measured.

## **Klíčová slova**

Pájecí pasty, sítotiskové pasty, neneutonské tekutiny, viskozita, rotační viskozimetr, teplotní závislost.

## **Keywords**

Soldering paste, screen printing paste, non-newtonian fluids, viscosity, rotational viscometer, temperature dependence.

## Obsah

Úvod .....	10
1 Tlusté vrstvy .....	11
2 Dělení materiálů pro tvorbu tlustých vrstev podle funkce vrstvy .....	12
2.1 Odporové pasty .....	12
2.2 Vodivé pasty .....	12
2.3 Dielektrické pasty .....	12
2.4 Izolační a ochranné pasty .....	12
3 Podložky pro tlusté vrstvy .....	13
4 Sítotisk .....	14
4.1 Zhotovení šablony (síta) .....	15
4.2 Vypalování tlustých vrstev (síta) .....	16
5 Využití tlustých vrstev .....	17
6 Reologie .....	18
6.1 Newtonská tekutina .....	18
6.2 Neneutonská tekutina .....	18
7 Viskozita .....	20
8 Způsoby měření viskozity .....	21
8.1 Kapilární viskozimetry .....	21
8.2 Výtokové viskozimetry .....	22
8.3 Tělískové viskozimetry .....	22
8.4 Rotační viskozimetry .....	22
8.4.1 Pravidla pro měření viskozity rotačním viskozimetrem .....	22
8.4.2 Výpočet viskozity systémem souosých válců .....	23
8.4.3 Výpočet viskozity systémem kužel-deska .....	25
8.5 Vibrační viskozimetry .....	25
8.6 Speciální způsoby měření neneutonských kapalin .....	25
9 Praktická část .....	27
9.1 Parametry rotačního viskozimetru používaného pro měření .....	27
9.2 Měřené vzorky .....	28
9.3 Měření závěsným systémem .....	28
9.3.1 Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE TYPE 818 (Sn62 Pb36 Ag2) .....	29
9.3.2 ED 8010 .....	29
9.3.3 ED 7100 .....	30
9.3.4 ECO SOLDER PASTE M705-GRN360-K2-V (Sn 99,3 Cu 0,7) .....	31
9.3.5 SPARKLE PASTE OZ 63-330F-40-10 .....	31
9.4 Měření systémem kužel-deska .....	33
9.4.1 Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE TYPE 818 (Sn62 Pb36 Ag2) .....	33
9.4.2 ED 8010 .....	34
9.4.3 ED 7100 .....	34
9.4.4 POLYMERNÍ GRAFITOVÁ PASTA CSP-3225 .....	35
9.4.5 POLYMERNÍ AG PASTA CSP-3110 D .....	36
9.4.6 KESTER SOLDER PASTE EM907 (Sn96,5 Ag3 Cu0,5) .....	36
9.4.7 ECO SOLDER PASTE M705-GRN360-K2-V (Sn99,3 Cu0,7) .....	37
9.4.8 SPARKLE PASTE OZ 63-330F-40-10 .....	38
9.4.9 Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE. TYPE: 670 (Sn42 Bi58) .....	39
9.4.10 ECO SOLDER PASTE L20-SSG-010-42-10 (Sn42 Bi58) .....	39
9.5 Měření teploty systémem kužel-deska .....	40
9.5.1 ED 7100 .....	41
9.5.2 ECO SOLDER PASTE M705- GRN360- K2-V (Sn99,3 Cu0,7) .....	42
9.5.3 KESTER SOLDER PASTE EM907 (Sn96,5 Ag3 Cu0,5) .....	43
10 Závěr .....	44
11 Seznam použité literatury .....	46
12 Seznam použitých obrázků .....	48

13 Seznam použitých tabulek ..... 49

# Úvod

V rámci bakalářské práce jsem se zabýval pastovitými materiály pro elektrotechniku, kdy značná část je věnována viskozitě pastovitých materiálů a jejímu měření.

Rozvoj tlustých vrstev je spojován s miniaturizací součástek. Tlusté vrstvy slouží jako alternativa k výrobě desek plošných spojů a jako takové nalézají uplatnění v automobilovém průmyslu, lékařství, osvětlovací technice a v dalších odvětvích, kde lze využít jejich příznivých vlastností.

Viskozita je důležitou vlastností nejen tlustých vrstev, jedná se o zásadní fyzikální veličinu pro hodnocení pohybu v tekutině a v rámci tlustých vrstev do značné míry ovlivňuje kvalitu nanášené tlusté vrstvy. Příkladem může být síťotisková metoda, kdy je požadována odpovídající viskozita pasty, aby bylo možné pastu rovnoměrně rozetřít na podložku a zároveň nedocházelo k jejímu zatékání do nežádoucích míst.

Cílem mé bakalářské práce je zpracovat rešerši o vlastnostech a charakteru pastovitých materiálů pro elektrotechniku, viskozitě a způsobech jejího měření a změřit viskozitu několika vzorků past pomocí rotačního viskozimetru.



# 1 Tlusté vrstvy

Pokud je tloušťka vrstvy podstatně větší než střední volná dráha mezi elektrony, mluvíme o této vrstvě jako o tlusté vrstvě. Pod pojmem střední volná dráha elektronu si pak lze představit dráhu, kterou urazí částice mezi dvěma srážkami. [1] V praxi to znamená, že tloušťka tlustých vrstev se pohybuje od jednotek mikrometrů až po desítky mikrometrů. [2] Základním materiálem používaným při výrobě tlustých vrstev jsou pasty, které obsahují složky plnicí rozdílné funkce. Těmito složkami jsou:

- Funkční složka – nejčastěji jsou používány kovové nebo polovodičové oxidové prášky pro odporové vrstvy, kovové prášky pro vodivostní pasty a skleněné či keramické pro dielektrické pasty.
- Pojící složka – vytváří základní matici vrstvy a drží pohromadě částice funkční složky. Z hlediska pojící složky pasty dělíme na anorganické, kde jako pojivo funguje skelná frit, a organické – polymerní. [3]
- Technologická složka – vytváří vazbu mezi funkční a pojící složkou, čímž umožňuje vytvoření pasty. [2]

## 2 Dělení materiálů pro tvorbu tlustých vrstev podle funkce vrstvy

### 2.1 Odporové pasty

Oxidy vzácných kovů se řadí k nejvíce používaným prvkům tvořícím funkční složku odporových past. Jako příklad oxidů vzácných kovů lze uvést  $\text{RuO}_2$  či  $\text{IrO}_2$ . Nespornou výhodou odporových past je široký rozsah hodnot odporu na čtverec, ve kterém mohou být tyto pasty vyrobeny. Ve standardních případech se tento rozsah pohybuje od  $10^1$  do  $10^9 \Omega/\square$ . Budeme-li uvažovat polymerní odporové pasty, pak jejich hlavní složkou je uhlík. Hlavním faktorem velikosti odporu je množství vodivé fáze vzhledem k množství izolačního skla ve složení tlusté vrstvy. [3] „Kvalita a reprodukovatelnost vlastností odporových vrstev závisí na dodržení technologických podmínek, především teploty (na  $\pm 1^\circ\text{C}$ ) a doby výpalu.“ [4]

### 2.2 Vodivé pasty

Jako funkční složka vodivých past jsou většinou používány prášky z ušlechtilých kovů, jako je stříbro, zlato, platina, paládium nebo jejich kombinace. V případě potřeby snížit rozpustnost v pájce se přidává do pasty zlato jakožto druhý kov k již přítomnému, namísto zlata lze k úpravě vlastností pasty použít i celou řadu jiných kovů, jako například stříbro, které snižuje elektromigraci. [4] „Kompozice na bázi stříbra jsou charakterizovány velmi dobrou vodivostí a výbornou smáčitelností vrstev pájkou. Vrstvy Au jsou ideální pro eutektické pájení slitinou Au-Si a termokompresní sváření.“ [4] „Teplota výpalu vodivých past se pohybuje v rozmezí od  $760^\circ\text{C}$  do  $1\,000^\circ\text{C}$ ...“ [4]

### 2.3 Dielektrické pasty

Dielektrické pasty nabízejí řadu využití, příkladem mohou být izolace křížicích se vodičů, kondenzátory menších velikostí integrovaných do topologie tlustovrstvých integrovaných obvodů, či krytí a pouzdrění pasivních sítí. Na rozdíl od vodivých past, kde funkční složku tvoří ušlechtilé kovy, v případě dielektrických past je nejčastěji používán  $\text{BaTiO}_3$ . Podstatným znakem funkční složky dielektrických past je možnost upravovat permitivitu vrstvy na vhodnou velikost. [4]

### 2.4 Izolační a ochranné pasty

Izolační a ochranné pasty jsou velmi specifické pasty, jelikož neobsahují funkční složku. V praxi se izolační vrstvy využívají například pro izolované křížení vodivých drah vícevrstevných struktur, zatímco ochranné pasty nabízejí uplatnění zejména jako ochrana součástek před vnějšími vlivy. [1]

### 3 Podložky pro tlusté vrstvy

*„Podložka slouží převážně jako nosič vrstev vodivých, odporových a dielektrických, které tvoří pasivní obvodové součástky. Je rovněž základnou pro mechanické upevnění aktivních a pasivních vsazovacích součástek (čipů) a chrání je proti mechanickému poškození.“* [4] Podložky používané v tlustovrstvých technologiích se vyznačují řadou vlastností. Mezi nejdůležitější patří teplotní koeficient roztažnosti, který by měl být srovnatelný s teplotním koeficientem tlusté vrstvy. Dalšími vlastnostmi požadovanými od podložek jsou hladkost, rovnost, zanedbatelné smršťování během výpalu, malé dielektrické ztráty a vhodná velikost relativní permitivity  $\epsilon_r$ , která je navíc konstantní v kmitočtovém pásmu a teplotním rozsahu, kde bude podložka používána. [4]

Díky výhodným vlastnostem, jako je odolnost vůči otěru, tvrdost, křehkost, elektrická pevnost, nejevení únavy a neměnění tvaru vlivem stárnutí stejně jako vysoká odolnost vůči chemikáliím, mikroorganismům či klimatickým vlivům, je vhodným materiálem pro anorganické tlusté vrstvy keramika. V rámci keramiky je důležitá korundová keramika ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) založená na bázi oxidu hlinitého, která se kromě již zmíněných obecných vlastností keramiky vyznačuje vhodnými mechanickými vlastnostmi, což ji učinilo velmi významnou v oblasti mikroelektroniky, respektive elektroniky. Dalším významným druhem keramiky využívaným k výrobě podložek pro tlusté vrstvy je aluminium-nitridová keramika (AlN), a to hlavně díky tepelné vodivosti 170 W/mK (hodnota srovnatelná s kovy) a velkému měrnému odporu. [1]

*„Pro polymerové vrstvy je možné jako podložku použít organické materiály. Jde o polymerní materiály založené na izolantu z organické pryskyřice (epoxidová a fenolická pryskyřice (např. skloepoxid, označovaný FR4, sklopolyimid atd.)). Nevýhodou těchto materiálů je velká navlhavost.“* [1]

## 4 Sítotisk

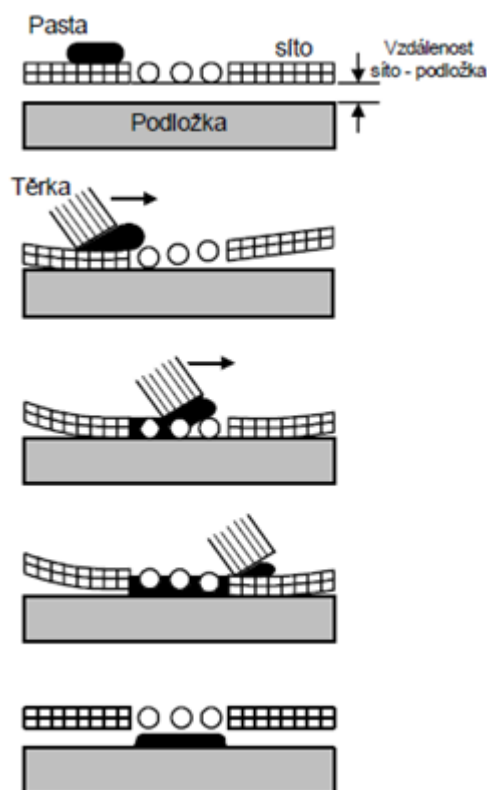
Způsob výroby tlustých vrstev prostřednictvím sítotisku je považován za vůbec nejvýznamnější v mikroelektronice. [4] Princip sítotisku spočívá ve vytváření vzoru protlačováním pasty přes oka síťky nezamaskované části, kdy je síťka již předem napnuta v rámu a na její okraj je umístěna pasta, která se bude roztírat. K docílení rovnoměrného rozložení pasty je potřeba při roztírání pasty vykonávat pohyb nejenom „vpřed“, ale i „vzad“ (tedy v obou směrech). Pro roztírání pasty se využívá těrky, která svým pohybem roztírá pastu a prohýbá síťku, čímž ji mechanicky namáhá. [2] „Síťka je umístěna ve vzdálenosti od síta nazývané odtrh o (0,25–1 mm) nad základní podložkou. Tato vzdálenost definuje výšku vrstvy.“ [4] Jako materiály pro výrobu sítěk jsou nejčastěji používány nylon, teroton či nerezové drátky. K dosažení delší životnosti síťky z hlediska jejího otírání je výhodné použít spíše kovovou síťku než plastovou. [2] Grafické vyjádření základního principu sítotisku lze vidět na obrázku č. 1.

Kvalitu sítotisku ovlivňuje řada faktorů, které můžeme rozdělit do dvou velkých skupin, kterými jsou vnitřní a vnější vlivy. Vnější vlivy nemůžeme během tisku ovlivnit a jsou způsobeny zejména výrobními předměty a prostředky. Patří mezi ně:

- drsnost podložky,
- vliv síta,
- vliv šablony,
  - použití přímé či nepřímé sítotiskové šablony,
  - vliv tloušťky masky a její přesnosti,
  - použití nepřímé kovové masky.
- vliv sítotiskové pasty. [4]

Oproti tomu vnitřní vlivy jsou způsobeny zejména nastavením parametrů sítotisku, tudíž jejich efekt se projeví zejména v průběhu samotného sítotisku. Patří mezi ně:

- „vliv výšky odtrhu o 0,5 až 0,8 mm,
- působení síly na stěrku  $F_s$ ,
- rychlost stěrky  $V_s - 120 - 150 \text{ mm}$ ,
- vliv úhlu stěrky – pro tisk přesných motivů volíme stěrku s úhlem  $35^\circ - 45^\circ$ .“ [4]



Obrázek 1 – Provedení sítotisku [1]

#### 4.1 Zhotovení šablony (síta)

Při výrobě síta se postupuje v následujících krocích. Nejprve se napne síťovina na rám, což je možné provést dvěma způsoby, kdy prvním z nich je napnutí napřímo na rámu a druhým způsobem je napnutí nad rámem. Od síťoviny je požadována odolnost vůči otěru, který způsobují jak pasta, tak těrka, v případě těrky se při její výrobě používají materiály, které tak neotírají síťovinu (dalšími požadavky na těrku jsou chemická odolnost, pružnost a pevnost, předcházející požadavky nejlépe splňují těrky vyrobené ze silikonové pryže). „Propustná plocha sítky je určena velikostí ok (běžně se udává počet ok na 1 cm) a průměrem vlákna.“ [4] Kromě již zmíněného průměru vlákna a velikosti ok jsou šablony charakterizovány obecně ještě volnou plochou, „což je procentuální podíl celkové plochy síta tvořené oky.“ [4] Druhým krokem je ovrstvení síta, které spočívá v nanesení světlocitlivé emulze na síto za pomoci ovrstvovacího stroje či korýtky. „Tloušťka emulze výrazně ovlivňuje tloušťku tlusté vrstvy.“ [4] „Na usušenou světlocitlivou vrstvu se osvitěním kopíruje tiskový motiv z předlohy. Motiv se na síto přenáší pomocí kontaktního kopírování ve vakuovém rámu. Většinou se používá zdroj vyzařující ultrafialové záření.“ [4] Dalšími úpravami šablony jsou její vyvolání a usušení. Rozlišují se dva způsoby vyvolání, jejichž rozdíl tkví v odstranění neosvětlených nebo osvětlených míst v závislosti na typu emulze. [1]

## 4.2 Vypalování tlustých vrstev (síta)

*„Při výpalu dochází k chemické reakci směsi pasty a k vytvoření vazby s podložkou.“* [1]

Teploty výpalu jednotlivých past se liší, například pro tlusté vrstvy se skleněnou maticí se technologická složka vypaluje při teplotě 200 °C, výpal však může probíhat u některých druhů past (zejména anorganických) až při teplotě 900 °C s tím, že samotný proces probíhá řádově desítky minut. V případě vytvrzování polymerních past se teplota pohybuje v rozmezí 120–160 °C a stejně jako v případě vypalování past se skleněnou maticí i pro polymerové pasty trvá vytvrzení řádově desítky minut. Podmínkou pro úspěšné vytvrzení polymerové pasty je použití technologické složky, jejíž teplota vypařování nepřekračuje teplotu vytvrzení polymerových past. [2] Proces vypalování probíhá nejčastěji v tunelových (průběžných) pecích. Vlastnosti vypálené vrstvy pak ovlivňují zejména atmosféra pece a teplotní profil pece. V případě atmosféry je nejvíce používaná vzduchová, lze se však setkat i s jinými, jako je dusíková jakožto příklad ochranné atmosféry pro materiály se sklonem k oxidaci. Proces výpalu lze rozdělit na 4 základní fáze:

- *„sušení – teplota se pohybuje od 70 do 150 °C, doba sušení 15 až 30 minut. Dochází k úniku organických ředidel těkavého charakteru z nanesené pasty. Tloušťka vrstvy po zasušení má být kolem 25 μm*
- *zóna předehřívací – teplota kolem 350 °C, dochází k odpaření zbylých stop organických rozpouštědel, vyhořívá filmtvorný materiál,*
- *zóna vypalovací – teplota 850 °C, začíná tvorba slitin a slinování funkčních složek pasty, probíhají důležité chemické reakce ovlivňující výsledné vlastnosti pasty,*
- *zóna chladicí – dochází k ochlazení podložek postupně až na teplotu okolí, tuhne roztavená skelná fáze ve vrstvě.“* [4]

## 5 Využití tlustých vrstev

Tlak na snižování výrobních nákladů spolu s miniaturizací součástek měl za následek vznik a rozšiřování tlustovrstvých technologií. Technologie tlustých vrstev nabízí řadu využití, jednou z nich je použití jako „*alternativa ke klasické technologii výroby desek plošných spojů*“. [5] Využívá se výhodných vlastností materiálů tlustých vrstev v prostředí, „*kde jsou kladeny vysoké nároky na dlouhou životnost, tepelnou odolnost, mechanickou pevnost, tepelnou vodivost, elektrickou pevnost, malé elektrické ztráty atd.*“ [5] Jejich aplikace lze nalézt v „*automobilovém a leteckém průmyslu, lékařském průmyslu, osvětlovací LED technice, výkonové elektrotechnice, hybridní mikroelektronice, mikrovlnné technice, sensorice, elektronických součástkách atd.*“ [5] Konkrétněji pak:

- „*Hybridní obvody – spoje, plošné cívky, pasivní sítě (především rezistory), řídicí jednotky spínaných zdrojů*“
- *Topná tělesa – komerční i průmyslová elektronika, elektrické ohřivače, rychlovarné konvice, žehličky, kávovary, topné desky elektrických sporáků, rozmrazování skel, ohřev kolejnic a mechanismů výhybek, ochrana potrubí proti mrazu*
- *Senzory*
  - *odporové – teplotní čidla, tenzometry, potenciometry (polohové)*
  - *kapacitní – polohové snímače, senzory vlhkosti*
  - *ostatní – termočlánky, chemické články, biosenzory*
- *Fóliové klávesnice, plošné spoje*
- *Elektroluminiscenční prvky – displeje, světelné panely, reklama*
- *Fotovoltaické prvky*
- *Jiné aplikace – piezoelektrické reproduktory, tepelné tiskové hlavy, rychlé tlustovrstvé pojistky, vysokonapěťové prvky, mikropásková vedení, ionizátory, prvky s rozloženými parametry, vysokoteplotní supravodiče“ [6]*

## 6 Reologie

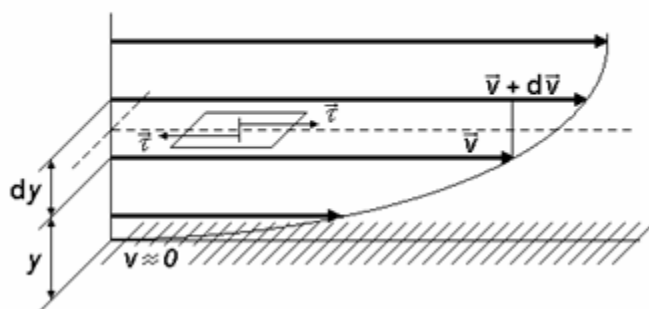
„Vědní obor zvaný reologie se zabývá studiem vnitřní reakce látek na působení vnějších sil, resp. jejich deformovatelností a tokovými vlastnostmi.“ [7] Kapalné látky můžeme rozdělit na newtonovské, pro které je při dané teplotě a tlaku viskozita fyzikální konstantou nezávislou na rychlostním gradientu a na neneutonské, u nichž „viskozita není fyzikální konstantou“. [7]

### 6.1 Newtonská tekutina

Je tekutina, vyznačující se lineární závislostí tečného napětí  $\tau$  na rychlostním gradientu  $\frac{dv}{dy}$  při laminárním toku, neboli pro ni platí Newtonův zákon viskozity:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

kde  $\eta$  se nazývá součinitel viskozity (vnitřního tření) nebo koeficient dynamické viskozity (vazkost). Na obrázku níže je vidět rychlostní profil proudící tekutinou v příčném řezu. [8]



Obrázek 2 - Rozdělení rychlostí v příčném řezu proudící tekutinou [8]

Chováním odpovídajícím newtonské tekutině se vyznačují „všechny plyny, většina čistých kapalin a mnoho roztoků a disperzí.“ [9]

### 6.2 Neneutonská tekutina

Jako neneutonská kapalina (respektive tekutina) se označuje kapalina, která se neřídí Newtonovým zákonem viskozity. Neneutonské kapaliny lze dále dělit na [10]:

- Pseudoplastické – kapaliny, pro něž s rostoucím rychlostním gradientem klesá zdánlivá viskozita.
- Dilatantní – kapaliny, pro něž s rostoucím rychlostním gradientem roste zdánlivá viskozita.
- Binghamské – kapaliny, které tečou až po překročení meze toku.
- Tixotropní – kapalina závislá na čase, kdy s prodlužující se dobou napětí klesá zdánlivá viskozita (vlivem tečného napětí).



- Reopexní – stejně jako tixotropní kapaliny, i reopexní jsou závislé na čase, ovšem platí pro ně, že s prodlužující se dobou napětí roste zdánlivá viskozita (vlivem tečného napětí). [11]

## 7 Viskozita

Fyzikální veličina zvaná viskozita udává poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti podle toho, jak daleko od sebe se nacházejí sousední vrstvy proudící kapaliny. Prostřednictvím viskozity lze charakterizovat vnitřní tření kapaliny, zároveň je viskozita úzce spojena s přitažlivými silami mezi částicemi. Kapaliny vyznačující se větší přitažlivou silou mezi částicemi dosahují větší hodnoty viskozity, z toho se také odvíjí charakter pohybu kapaliny, respektive těles v kapalině, kdy kapaliny s větší viskozitou se pohybují nižší rychlostí než kapaliny s malou viskozitou. Obdobné chování platí také pro pohyb těles v kapalině. [12] V rámci sítotisku viskozita ovlivňuje nanášenou vrstvu. Nízká viskozita pasty způsobuje její zatékání a nadržování tvaru stanoveným sítem. Vysoká viskozita zase vytváří hrbolky pod oky síta, které jsou nežádoucí. Dobře viskózní pasta by měla vytvořit hladkou strukturu danou sítem a zároveň dodržovat tvar daný sítem bez zatékání. [13] Dynamická viskozita je definována následující rovnicí:

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2)$$

kde  $\tau$  je tečné napětí a  $\gamma$  je rychlostní gradient. Jednotkou dynamické viskozity je podle mezinárodní soustavy jednotek SI pascal sekunda (Pa·s).

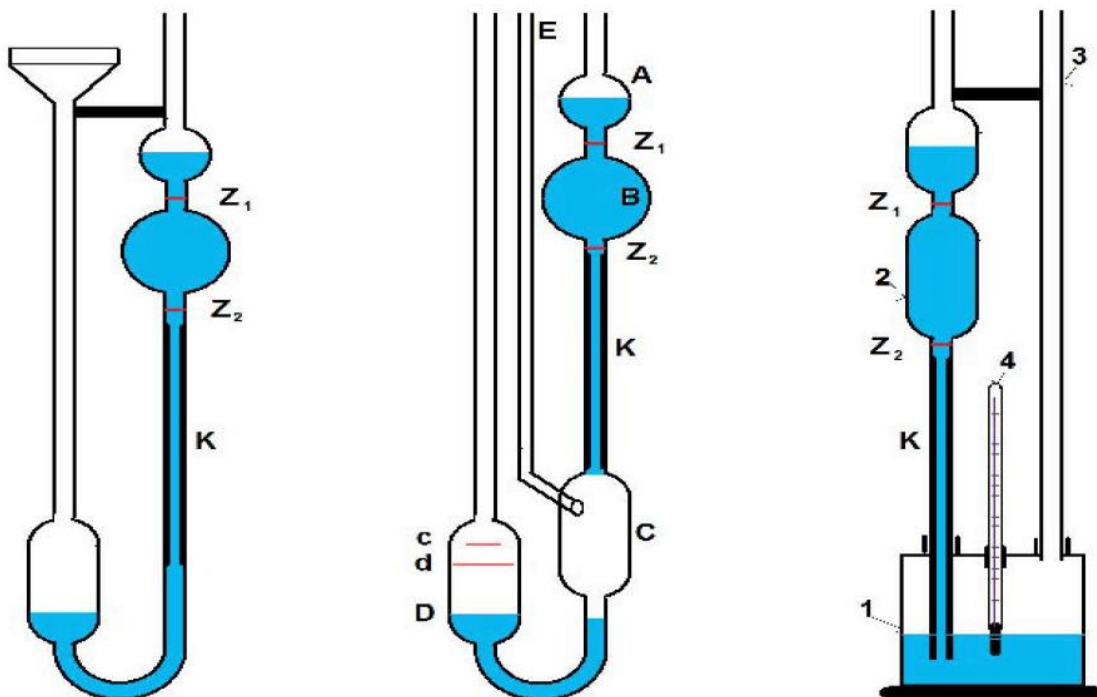
## 8 Způsoby měření viskozity

Pro měření viskozity se používá přístroj zvaný viskozimetr. Rozlišují se následující typy viskozimetru [14]:

- kuličkový viskozimetr,
- kapilární viskozimetr,
- výtokový viskozimetr,
- rotační viskozimetr,
- vibrační viskozimetr.

### 8.1 Kapilární viskozimetry

Teoretickým základem pro funkci kapilárních viskozimetrů je Hagen-Poiseuillův zákon, který mluví o laminárním proudění trubici kruhového průřezu. Nejčastěji se používá konfigurace kapilárního viskozimetru, která měří objemový průtok kapaliny využitím konstantního tlakového spádu, již méně častým provedením kvůli své složitosti je provedení s konstantním objemovým průtokem měřené kapaliny. Z hlediska výtoku měřené kapaliny z kapiláry se rozlišuje Ostwaldovo provedení (výtok je proveden do prostředí naplněného kapalinou), či Ubbelohdovo provedení, kdy „kapalina vytéká do volného prostoru, který je zvláštním otvorem spojen s atmosférou“. Kapilární viskozimetry se dají použít i pro účely měření reogramu (celá toková křivka) neneutonských kapalin. [14] Provedení kapilárního viskozimetru lze vidět na obrázku číslo 3. Vlevo se nachází Ostwaldovo, uprostřed Ubbelohdovo a vpravo Vogel-Ossagovo provedení viskozimetru.



Obrázek 3 – Provedení kapilárních viskozimetrů [14]

## 8.2 Výtokové viskozimetry

Obdobně jako tomu bylo u kapilárního viskozimetru, i pro měření s výtokovým viskozimetrem se vychází z Hagen-Poiseuilleova zákona pro laminární proudění tekutiny v trubici kruhového průřezu. Viskozita se měří jako poměr dvou časů, kde jedním je doba potřebná k výtoku žádané kapaliny o libovolném objemu při předem stanovené teplotě a druhým je doba výtoku měrné kapaliny stejného objemu při stejné teplotě jako v případě žádané kapaliny. Výsledkem je pak relativní hodnota viskozity. V praxi je jako způsob vytlačení kapaliny volen tlak pístu, plynu či vytlačení vlastní tíhou. [14]

## 8.3 Tělískové viskozimetry

Princip těchto viskozimetrů spočívá v měření rychlosti pádu tělíška v tekutině, jejíž viskozitu chceme určit. Nejčastěji je tělesem kulička (odtud také plyne alternativní označení kuličkové viskozimetry). [14]

## 8.4 Rotační viskozimetry

*„Měřicí systém rotačních viskozimetrů se musí sestávat ze dvou tuhých, symetrických, koaxiálních ploch, mezi nimiž se nachází tekutina, jejíž viskozita je měřena. Jedna z těchto ploch rotuje při konstantní úhlové rychlosti, zatímco druhá je v klidové poloze.“* [15] V obrázku č. 4 jsou uvedeny způsoby provedení rotačního viskozimetru.

### 8.4.1 Pravidla pro měření viskozity rotačním viskozimetrem

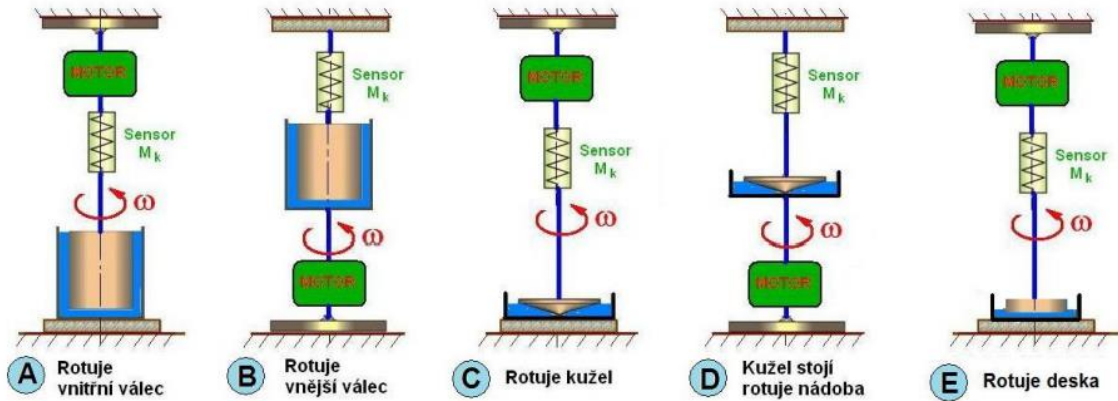
Při měření viskozity rotačním viskozimetrem norma udává nutnost *„měřit kroučící moment s přesností 2 % z celého rozsahu stupnice. V rámci běžného pracovního rozsahu přístroje musí být frekvence otáček měřena s přesností 2 % naměřené hodnoty. Opakovatelnost měření viskozity musí být  $\pm 2 \%$ .“* [15] Norma dále požaduje nepřítomnost viditelných nečistot nebo vzduchových bublin na vzorcích a v případě hygroskopických vzorků či vzorků s těkavými podíly těsné uzavření nádob, v nichž se nacházejí. Přístroj používaný k měření viskozity by měl dle normy být kalibrován periodicky.

Pro newtonské kapaliny (kam, jak bylo zmíněno, spadají sítotiskové pasty) se doporučuje normou měřit při co největším počtu rychlostních gradientů, kde jako minimální hranice jsou stanoveny čtyři rychlostní gradienty, které by měly být dostatečně rozdílné, aby závislost viskozity na těchto rychlostních gradientech byla výrazná. [15]

Výsledky měření se udávají v pascal sekundách jako aritmetický průměr ze tří stanovení spolu s teplotou a rychlostním gradientem k určení podmínek, při nichž byla viskozita měřena. Zmíněné hodnoty teploty a rychlostního gradientu se udávají v závorce, např.

$$\eta(23 \text{ }^{\circ}\text{C}, 1600 \text{ s}^{-1}) = 4,25 \text{ Pa} \cdot \text{s} \text{ [15]}$$

Nejběžnější provedení rotačních viskozimetrů jsou dva sousedé válce, nebo kužel spolu s deskou, či dvě rotující desky.



Obrázek 4 – Nákres provedení rotačních viskozimetrů [14]

Souosé rotační viskozimetry se konstruují s otáčejícím se vnitřním či vnějším válcem (jeden válec tedy tvoří stator a druhý rotor), přičemž nehraje roli, který ze dvou válců se otáčí. Poloměry obou válců by měly být podobné, přesné dovolené velikosti jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 3219.

#### 8.4.2 Výpočet viskozity systémem souosých válců

Při výpočtu viskozity je zvykem počítat smykové napětí a rychlostní gradient jako reprezentativní hodnoty protože tyto hodnoty nejsou stejné v průřezu kruhového typu mezi rotorem a statorem, dalším důvodem je, že reologické vlastnosti zkoušeného materiálu ovlivňují změnu rychlostního gradientu. Reprezentativní hodnoty jsou veličiny zjištěné v určitém místě mezikruží souosých válců s dobrou schopností přiblížit tokové chování kapalin s využitím mocninného zákona, kdy se exponent pohybuje v rozmezí 0,3 až 2. Smykové napětí pak lze vypočítat z rovnic uvedených v normě ČSN EN ISO 3219 [15]:

$$\tau_i = \frac{M}{2\pi L r_i^2 C_L} \quad (3)$$

$$\tau_e = \frac{M}{2\pi L r_e^2 C_L} \quad (4)$$

$$\tau_{rep} = \frac{\tau_i + \tau_e}{2} = \frac{1 + \delta^2}{2\delta^2} \times \tau_i = \frac{1 + \delta^2}{2} \times \tau_e = \frac{1 + \delta^2}{2\delta^2} \times \frac{M}{2\pi L r_i^2 C_L} \quad (5)$$

kde

$\tau_i, \tau_e$  jsou tečná napětí na vnitřní a vnější straně válců,

$r_i, r_e$  jsou vnitřní a vnější poloměry sestavy,

$M$  je kroučící moment, vyjádřený v Nm,

$\delta$  je poměr poloměru vnějšího válce k poloměru vnitřního válce,

$L$  je délka vnitřního válce, v m,

$C_L$  je faktor pro korekci efektu čelních ploch, který zohledňuje kroučící moment působící na koncových plochách měřicího systému (závisí na geometrii měřicího systému a na reologických vlastnostech kapaliny, pro daný typ geometrie se stanovuje experimentálně).

Reprezentativní rychlostní gradient je dán rovnicí (opět uvedené v normě ČSN EN ISO 3219):

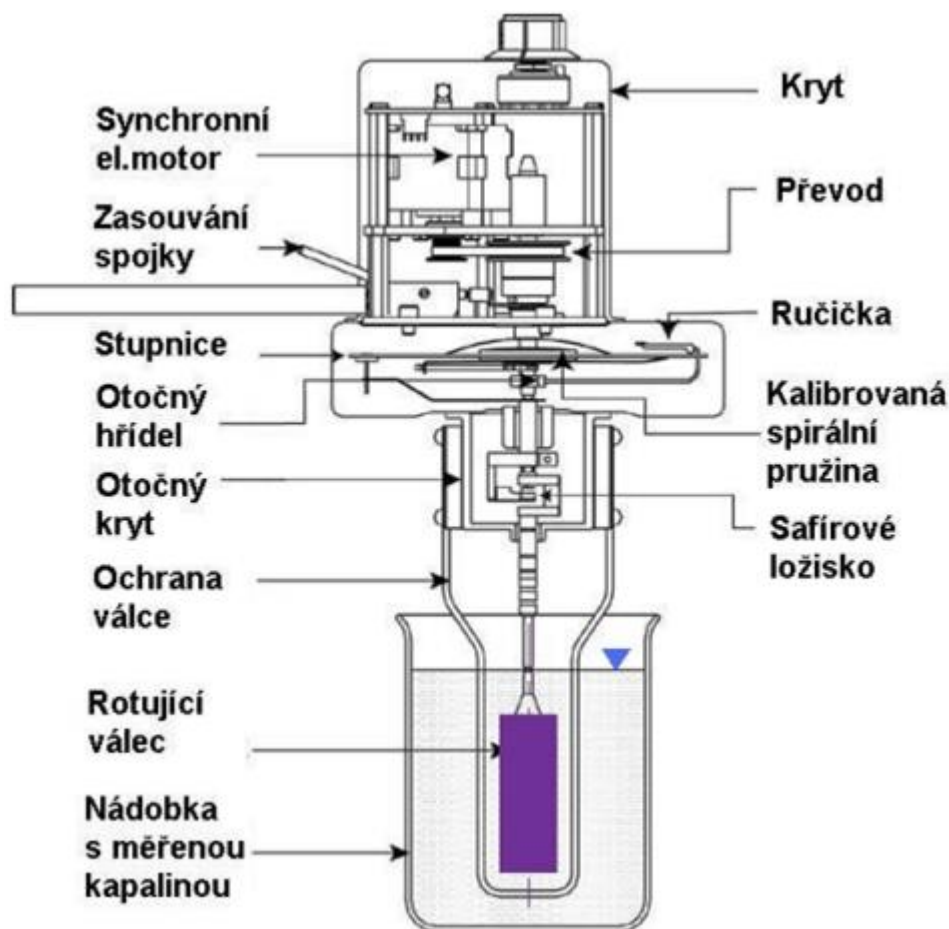
$$\gamma = \omega \times \frac{1 + \delta^2}{\delta^2 - 1} = \frac{2\pi n}{60} \times \frac{1 + \delta^2}{\delta^2 - 1} \quad (6)$$

kde

$\omega$  je úhlová rychlost v  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ,

$n$  jsou otáčky za minutu.

V normě je dále stanovena standardní geometrie měřicího systému, která je charakteristická rozměry, jakými jsou například poloměr hřídele, délka ponořené části hřídele a jiné. Standardní geometrii pak odpovídá hodnota koeficientu  $C_L$  rovných 1,10. Ten však platí jen pro newtonské kapaliny, pro kapaliny neneutonské závisí hodnota  $C_L$  dále na rychlostním gradientu a reologických vlastnostech měřené kapaliny. V případě nemožnosti použít standardní geometrii norma udává podmínky pro jiné geometrie. [15] V obrázku 5 je možno vidět stavbu rotačního viskozimetru.



Obrázek 5 – Řez rotačním viskozimetrem [14]

### 8.4.3 Výpočet viskozity systémem kužel-deska

Jak bylo zmíněno, pasty používané v tlustovrstvých technologiích se řadí mezi neneutonské tekutiny, vhodným typem rotačního viskozimetru k jejich měření je pak viskozimetr kužel-deska. Rozlišujeme dva typy provedení, rozdíl v provedení spočívá pouze v tom, jaká část rotuje. V prvním provedení rotuje kužel spojený s hřídelí proti stojící desce a v druhém provedení naopak rotuje deska a kužel stojí. [14] Požadavkem pro úhel  $\alpha$  mezi kuželem a deskou je jeho minimální velikost (ideálně  $1^\circ$ ), zároveň není dovoleno, aby jeho hodnota překračovala  $4^\circ$ . V případě použití úhlu většího než  $1^\circ$  musí být tento fakt dle normy zaprotokolován. Výhodou malého úhlu  $\alpha$  je možnost brát rychlostní gradient v prostoru mezi deskou a kuželem jako konstantní hodnotu. V případě, že  $\alpha$  nepřekračuje hodnotu  $3^\circ$ , norma ČSN EN ISO 3219 udává, že lze smykové napětí a rychlostní gradient vypočítat z rovnic uvedených níže [15]:

$$\tau = \frac{3M}{2\pi r^3} \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{\omega}{\alpha} \quad (8)$$

kde

M je kroučící moment v Nm,

r poloměr kužele v m,

$\alpha$  je úhel mezi kuželem a deskou v rad,

$\omega$  je úhlová rychlost v rad/s.

V případě, že se v kapalině vyskytují tuhé částice, je doporučováno využití komolého kužele, který lze použít i v případě styku mezi kuželem a deskou a od toho se odvíjejícího tření. Pro uspořádání kužel-deska dále dle normy platí podmínka přesného seřízení kolmé osy kužele na desku, dále styk kužele a desky, popřípadě vytvoření přesné mezery mezi kónickým kuželem a deskou, stejně jako přesné množství zkoumané kapaliny, kdy větší či menší množství jsou nežádoucí. [15]

## 8.5 Vibrační viskozimetry

*„Používají se k měření viskozity útlumu kmitajícího tělesa v kapalině, a to díky pohybujícímu se tělísku (pohyb vykonává torzní nebo příčný).“* Měření s pomocí vibračního viskozimetru lze uskutečnit třemi způsoby, kde prvním z nich je měření příkonu pro oscilace s konstantní amplitudou a frekvencí, druhým je měření rezonanční frekvence a jako třetí způsob lze použít měření doby útlumu po vypnutí přístroje. [14]

## 8.6 Speciální způsoby měření neneutonských kapalin

Speciální metodou pro měření neneutonských kapalin, u kterých je problémem obtížnost nebo časová náročnost, popřípadě nelze změřit reogram, je k měření konzistence používána metoda rozlivem. Při měření se nejprve nádoba neobsahující dno postavená na skleněné, dobře odmaštěné desce naplní konstantním množstvím měřené látky o známé teplotě. V dalším kroku se

pak nádoba zvedne a výsledkem měření je průměr obrazce, který se vytvoří na skleněné desce po zvednutí nádoby. [14]



## 9 Praktická část

Při měření viskozity byla použita metoda závěsného systému u vzorků pájecích či sítotiskových past, kde to dovolovalo jejich množství. U všech vzorků měřených touto metodou bylo použito diskové vřeteno od firmy Brookfield. Měření probíhalo ve dvou opakováních, nejprve ihned po vytažení z lednice, kde byly pasty skladovány, a podruhé po časovém úseku v rozmezí 30–90 minut k porovnání vlivu ponechání pasty při pokojové teplotě, která neodpovídá jejich skladovací teplotě. Druhá metoda měření viskozity spočívala v použití systému kužel-deska, kde byl použit kužel CP-51. Před započítáním měření s využitím libovolného systému bylo potřeba viskozimetr s pomocí vyrovnávacích šroubů nastavit tak, aby byla zajištěna vodorovná poloha.

### 9.1 Parametry rotačního viskozimetru používaného pro měření

K měření byl použit analogový rotační viskozimetr značky Brookfield HBT, dostupný na katedře elektrotechnologie. Tento viskozimetr umožňuje měřit viskozitu v širokém rozsahu a splňuje požadavky normy na přesnost měření a rychlost otáčení spadá do jedné z řad definovaných normou. Přesné rozpětí otáček, ve kterých může viskozimetr pracovat, je stanoveno manuálem na 0,5 ot/min až po 100 ot/min. Teplota, při které může viskozimetr pracovat, je stanovena na -20 °C až 65 °C. Výrobce doporučuje neměřit pod 10% rozsahem viskozimetru z důvodu dosažení co největší přesnosti měření, která činí 1 % z celého rozsahu viskozimetru. [16]

Rotační viskozimetr může pracovat ve třech režimech, a to měření pomocí závěsného systému, které se používá k orientačnímu měření viskozity z důvodu dosahování nejmenší přesnosti. Pro měření závěsným systémem je využívána sada vřeten, která se dají našroubovat na osu viskozimetru. Použití jednotlivých vřeten se liší dle očekávané viskozity a parametrů kapaliny. Druhým způsobem je měření pomocí systému kužel-deska, kdy je zapotřebí před každým měřením nastavit správnou vzdálenost kužele ode dna pohárku, aby bylo prováděné měření vypovídající a aby nedošlo k poškození kužele či dna pohárku. Při měření tímto způsobem je možnost využít termočlánek obsaženého v sestavě a připojením multimetru na speciální vývody misky měřit závislost viskozity na změně teploty. Třetím způsobem je měření pomocí sousých válců, kde opět výrobce dodává nástavec pro měření. [16]

Princip rotačního viskozimetru Brookfield HBT spočívá v měření odporu tekutiny k toku. Měřenou veličinou je točivý moment, který je získán otáčením snímacího prvku v tekutině a odvíjí se od překonávaného viskózního odporu při dané rychlosti. Snímací prvek je spojen s pružinou a je na něj namontováno vřeteno, které se ponoří do tekutiny. Naměřená hodnota pak vychází z navinutí pružiny a proporcionálně odpovídá viskozitě. V manuálu jsou pak uvedeny tabulky k přepočtu na hodnotu viskozity pro každou měřicí konfiguraci. Výsledná viskozita je však v jednotkách centipoise, pro přepočet na pascal sekundy platí:

$$1 \text{ cP} = 1 \text{ mPa} \cdot \text{s} \quad (9)$$

Zároveň jsou v manuálu uvedeny tabulky vyjadřující vztah mezi otáčkami a rychlostním gradientem, které byly použity v měření systémem kužel-deska:

$$\text{Rychlostní gradient (s}^{-1}\text{)} = \frac{\omega \text{ (rad} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}}{\text{Sin } \theta \text{ (}^\circ\text{)}} \quad (10)$$

kde omega je úhlová rychlost a theta je úhel kužele a desky. Hodnoty rychlostního gradientu jsou konstantní pro měřenou viskozitu a odpovídají použitému typu viskozimetru a kužele. [16]

## 9.2 Měřené vzorky

**Tabulka 1 – Seznam použitých vzorků a údaje udávané výrobcem**

Vzorek	Viskozita	Podmínky
Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE TYPE 818 (Sn62 Pb36 Ag2)	900 kcps $\pm$ 10%	25 °C, 5 ot. $\cdot$ min <sup>-1</sup>
ED 8010	Výrobce neudává	Výrobce neudává
ED 7100	Výrobce neudává	Výrobce neudává
POLYMERNÍ GRAFITOVÁ PASTA CSP-3225	20 $\pm$ 5 Pa·s	25 °C, 10 ot. $\cdot$ min <sup>-1</sup>
POLYMERNÍ AG PASTA CSP-3110 D	15 $\pm$ 5 Pa·s	25 °C, 10 ot. $\cdot$ min <sup>-1</sup>
KESTER SOLDER PASTE EM907 (Sn96,5 Ag3 Cu0,5)	1800 poise	25 °C, 10 ot. $\cdot$ min <sup>-1</sup>
ECO SOLDER PASTE M705-GRN360-K2-V (Sn99,3 Cu0,7)	200 $\pm$ 20 Pa·s	Výrobce neudává
SPARKLE PASTE OZ 63-330F-40-10	250 Pa·s	Výrobce neudává
Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE. TYPE: 670 (Sn42 Bi58)	1000 kcps $\pm$ 10%	25 °C, 5 ot. $\cdot$ min <sup>-1</sup>
ECO SOLDER PASTE L20-SSG-O10-42-10 (Sn42 Bi58)	Výrobce neudává	Výrobce neudává

Jak lze vidět z tabulky výše, pouze pro pět vzorků známe viskozitu i podmínky, za kterých bylo měřeno, a u nichž bylo by možné srovnat tyto hodnoty s mými naměřenými výsledky. Pro pájecí pasty od firmy Qualitek, které udávají hodnotu viskozity v kilocentipoisech, nemůžu hodnoty srovnat, jelikož měření prováděné výrobcem probíhalo s využitím vřetene typu TF (ponořeného do hloubky 0,7 palců), které není na katedře elektrotechnologie dostupné. Pro vzorky, kde nejsou udány podmínky, nelze hodnoty viskozity srovnat z důvodu závislosti viskozity na teplotě a rychlosti, a tyto hodnoty jsou tedy jen velmi orientační.

Pro sítotiskové pasty ED 8010 a ED 7100 hodnoty viskozity uvedené výrobcem zcela chybí, a nemám tedy žádné srovnání s naměřenými hodnotami.

## 9.3 Měření závěsným systémem

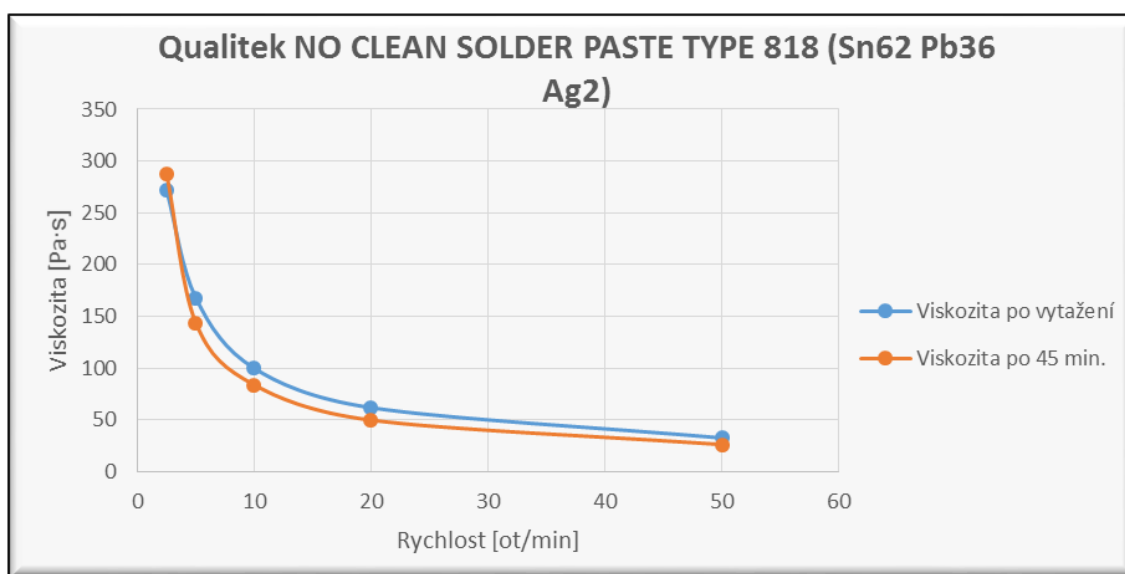
Příprava viskozimetru k měření tímto systémem spočívala, kromě již zmíněného vyrovnání, pouze v našroubování vřetene č. 6 z nerezové oceli, které bylo použito pro měření všech past. Pro všechny vřetena je nutné vynásobit odečtenou hodnotu faktorem, který se odvíjí od použité rychlosti a vřetena, k získání hodnot viskozity v jednotkách centipoisech. Ty lze následně převést na pascal sekundy. Tabulky pro přepočty udává výrobce (dostupné na [16]). Různé velikosti vřeten lze vidět na obrázku dostupném na [17]. Samotné pasty byly měřeny v miskách, ve kterých jsou dodávány. Měření závěsným systémem probíhalo při teplotě 25 °C. Při měření jsem dolní hranici rychlosti stanovil na 2,5 otáček za minutu, v případě, že by tato hranice vedla k nízkému počtu naměřených hodnot z důvodu překročení rozsahu stupnice, byla dolní hranice snížena na 0,5 otáček za minutu. U každé pasty je uvedena tabulka naměřených hodnot a graf vyjadřující závislost viskozity na otáčkách za minutu.

### 9.3.1 Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE TYPE 818 (Sn62 Pb36 Ag2)

Graf závislosti viskozity na otáčkách za minutu této pájecí pasty má podobu jedné větve hyperboly. Jak můžeme vidět, rozdíl ve viskozitě při měření po vytažení z ledničky a po prodlevě 45 minut po vytažení je velmi malý vzhledem k hodnotám viskozity.

**Tabulka 2 – Naměřené hodnoty pro pastu Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE TYPE 818 závěsným systémem**

rychlost [ot/min]	odečet [dítky]	viskozita [Pa·s]	Po 45 minutách	
			odečet [dítky]	viskozita [Pa·s]
2,5	8,5	272	9	288
5	10,5	168	9	144
10	12,5	100	10,5	84
20	15,5	62	12,5	50
50	20,5	32,8	16,5	26,4



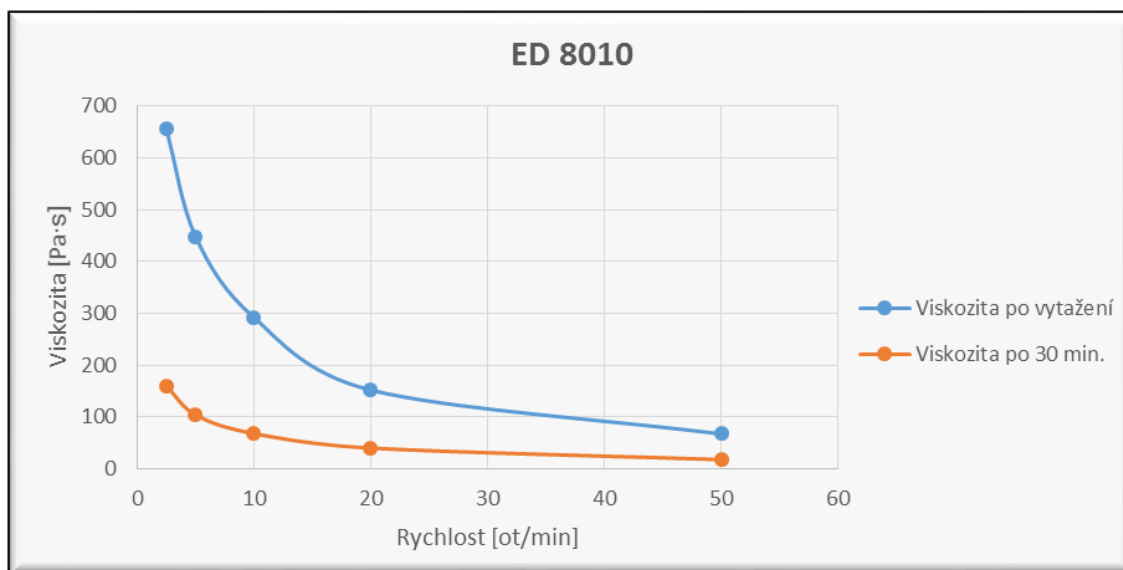
**Obrázek 6 – Graf závislosti viskozity na otáčkách za minutu pro pastu Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE TYPE 818**

### 9.3.2 ED 8010

V případě dielektrické pasty ED 8010 je patrný rozdíl ve viskozitě při měření ihned a po odstavení. Velikost rozdílu z původní hodnoty 496 Pa·s se zmenšuje s rostoucími otáčkami za minutu, přičemž minimum naměřeného rozdílu je rovno 49,6 pascal sekundám.

**Tabulka 3 – Naměřené hodnoty pro pastu ED 8010 závěsným systémem**

rychlost [ot/min]	odečet [dítky]	viskozita [Pa·s]	Po 30 minutách	
			odečet [dítky]	viskozita [Pa·s]
2,5	20,5	656	5	160
5	28	448	6,5	104
10	36,5	292	8,5	68
20	38	152	10	40
50	42	67,2	11	17,6



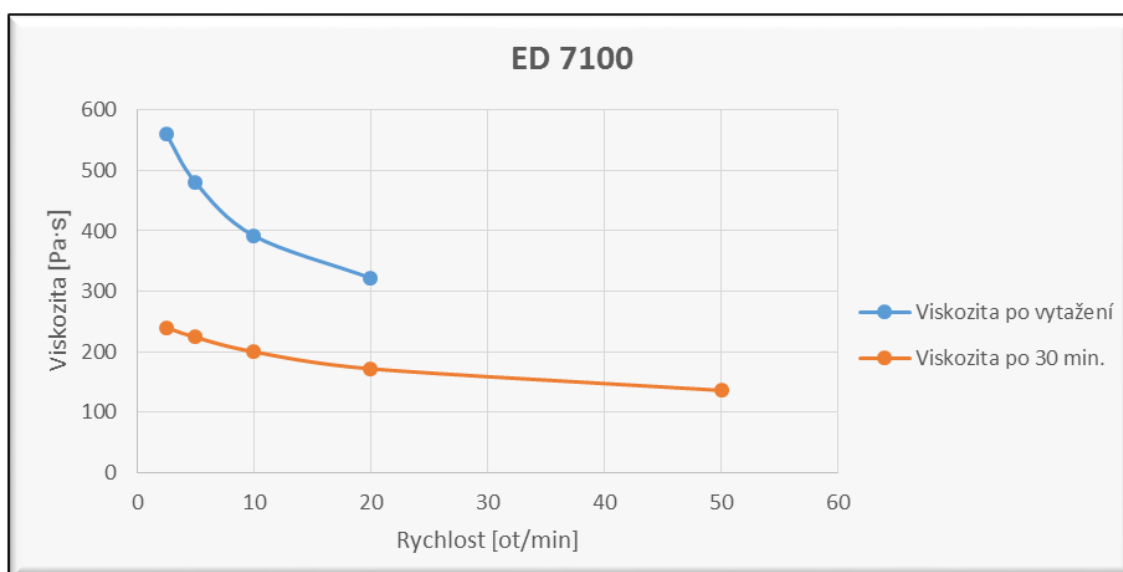
Obrázek 7 – Graf závislosti viskozity na otáčkách za minutu pro pastu ED 8010

### 9.3.3 ED 7100

Stejně jako tomu bylo u předchozí pasty, i v případě uhlíkové pasty ED 7100 dosahují viskozity různých hodnot pro okamžité měření a měření po 30 minutách, rozdíl však není tak výrazný, jako tomu bylo v případě pasty ED 8010. Průběh závislosti při druhém měření se blíží konstantnímu. Nutno dodat, že pasta se nachází za datem použitelnosti, což se mohlo projevit na jejích vlastnostech.

Tabulka 4 – Naměřené hodnoty pro pastu ED 7100 závěsným systémem

rychlost [ot/min]	odečet [dílky]	viskozita [Pa·s]	Po 30 minutách	
			odečet [dílky]	viskozita [Pa·s]
2,5	17,5	560	7,5	240
5	30	480	14	224
10	49	392	25	200
20	80,5	322	43	172
50	>100	-	85	136



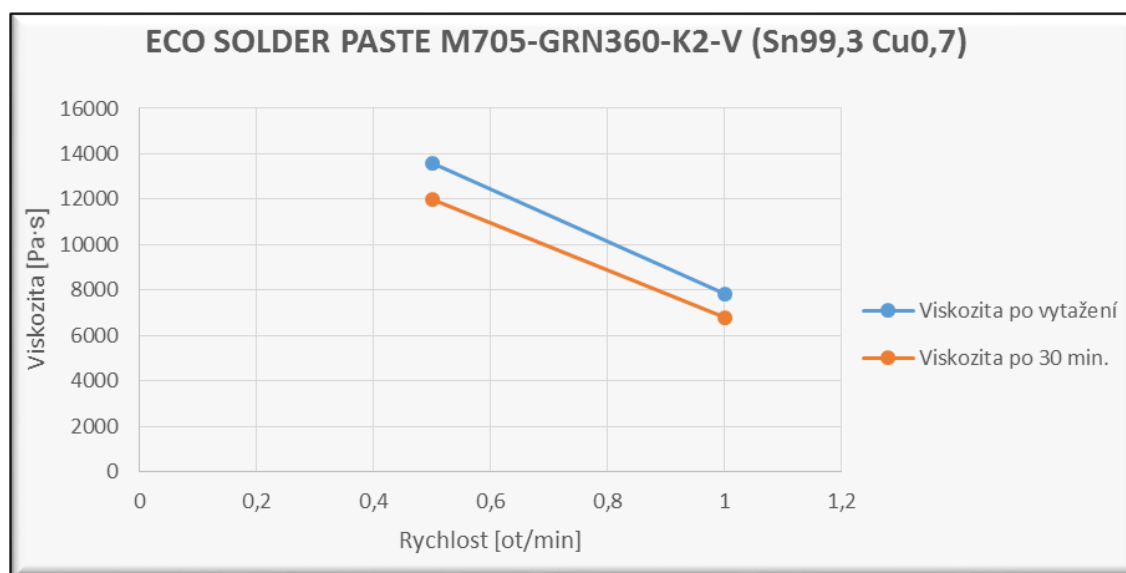
Obrázek 8 – Graf závislosti viskozity na otáčkách za minutu pro pastu ED 7100

### 9.3.4 ECO SOLDER PASTE M705-GRN360-K2-V (Sn99,3 Cu0,7)

V případě této pasty jsem byl schopen naměřit hodnoty viskozity pouze pro dvě hodnoty otáček za minutu, protože viskozita pasty byla natolik vysoká, že již při hodnotě 2,5 otáček za minutu jsem se dostal mimo rozsah viskozimetru. Rozdíl 30 minut v měření nebyl nikterak výrazný. Této pastě, stejně jako tomu bylo v případě předcházející pasty, již skončila doba použitelnosti, která byla do dvacátého září 2014. Avšak na rozdíl od předcházející pasty, která byla sítotisková, je v případě této pájecí pasty i z malého počtu naměřených bodů patrný strmější pokles viskozity s rostoucími otáčkami za minutu.

**Tabulka 5 – Naměřené hodnoty pro pastu ECO SOLDER PASTE M705-GRN360-K2-V závěsným systémem**

rychlost [ot/min]	odečet [dílký]	viskozita [Pa·s]	Po 30 minutách	
			odečet [dílký]	viskozita [Pa·s]
0,5	85	13600	75	12000
1	98	7840	85	6800



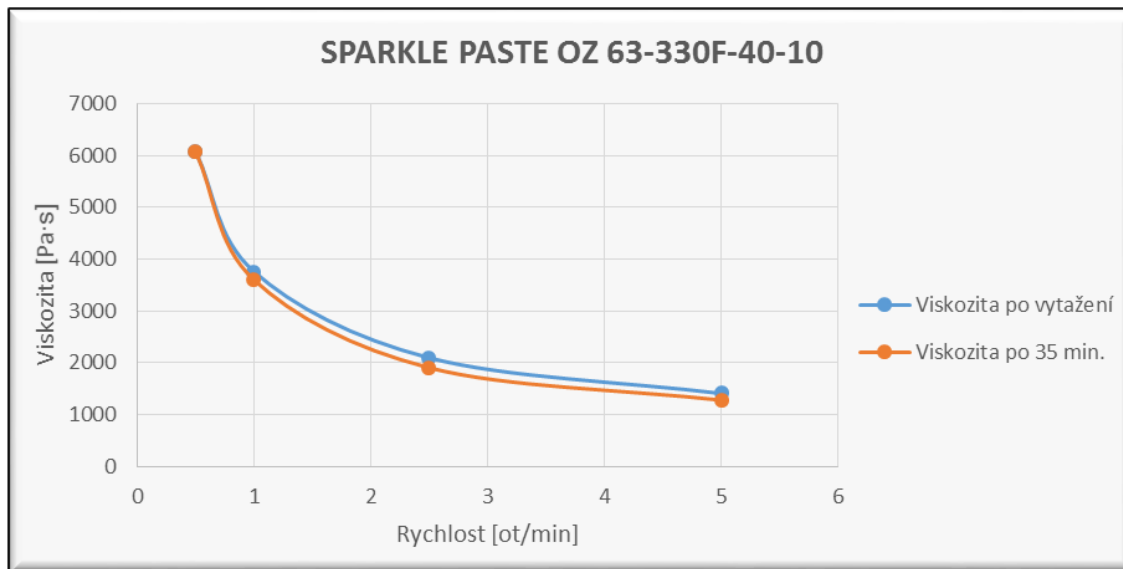
**Obrázek 9 – Graf závislosti viskozity na otáčkách za minutu pro pastu ECO SOLDER PASTE M705-GRN360-K2-V**

### 9.3.5 SPARKLE PASTE OZ 63-330F-40-10

Stejně jako tomu bylo u pájecí pasty na bázi cínu, olova a stříbra, i u této pájecí pasty má graf závislosti viskozity na otáčkách za minutu tvar jedné větve hyperboly a i tady je vidět pouze nepatrný rozdíl výsledků vzhledem k naměřeným hodnotám v měření po vytažení z lednice a v měření s prodlevou 35 minut. Hodnoty viskozit jsou však rozdílné, zatímco u pasty typu 818 se pohybovala od 32,8 do 272 po vytažení, v případě této pasty je v maximu hodnota viskozity více než dvacetkrát vyšší než u pasty typu 818.

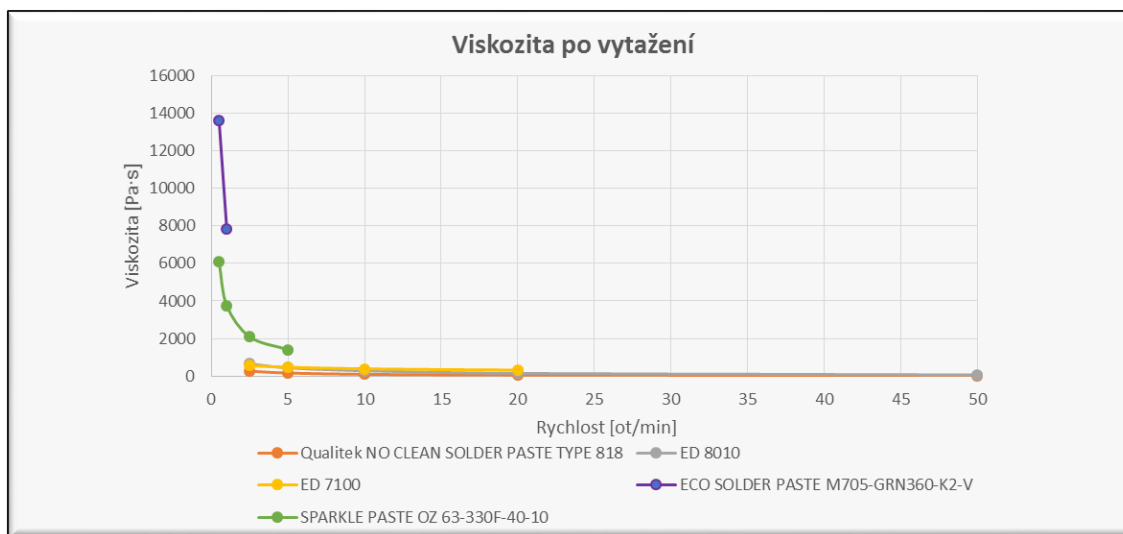
Tabulka 6 – Naměřené hodnoty pro pastu SPARKLE PASTE OZ 63-330F-40-10 závěsným systémem

rychlost [ot/min]	odečet [dílky]	viskozita [Pa·s]	Po 35 minutách	
			odečet [dílky]	viskozita [Pa·s]
0,5	38	6080	38	6080
1	47	3760	45	3600
2,5	65,5	2096	59,5	1904
5	88	1408	80	1280



Obrázek 10 – Graf závislosti viskozity na otáčkách za minutu pro pastu SPARKLE PASTE OZ 63-330F-40-10

V grafu níže jsou uvedeny závislosti viskozity na otáčkách za minutu pro všechny pasty měřené závěsným systémem. Jak je z grafu vidět, nejvyšší hodnoty viskozity dosahuje pasta ECO SOLDER PASTE M705-GRN360-K2-V (Sn99,3 Cu0,7). Naopak nejmenších Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE TYPE 818 (Sn62 Pb36 Ag2). Dále můžeme pozorovat, že hodnoty viskozity sítotiskových past jsou si velmi podobné.



Obrázek 11 – Graf závislosti viskozity na otáčkách za minutu

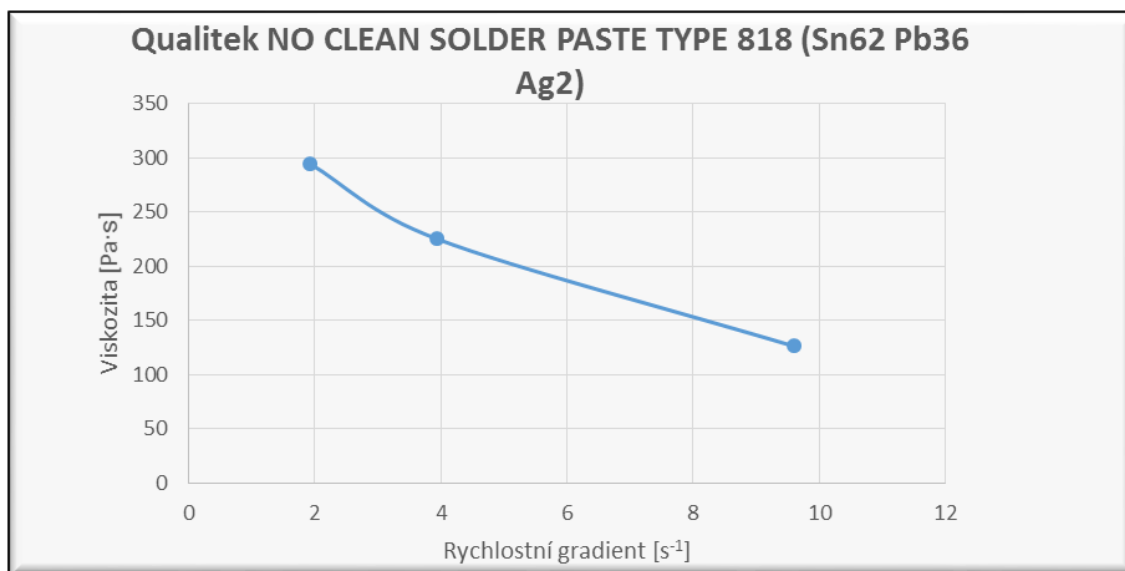
## 9.4 Měření systémem kužel-deska

Při měření systémem kužel-deska bylo dle použitého kuželu (CP-51) zvoleno množství vzorku 0,5 ml, který se umísťuje doprostřed pohárku zevnitř, úhel mezi kuzelem a dnem pohárku pak činí 1,565 °. Po vyvážení viskozimetru bylo zapotřebí našroubovat kužel, upevnit pohárek a nastavit vzdálenost mezi kuzelem a dnem pohárku na 0,013 mm, podrobný popis jak toho dosáhnout je uveden v manuálu od firmy Brookfield. (dostupný na [16]) Pro měření byla zvolena dolní hranice otáček za minutu na hodnotu 0,5, v případě, že odečtená hodnota při těchto otáčkách byla menší než 10, následovalo zvýšení dolní hranice, bylo tak učiněno na základě doporučení výrobce použitého viskozimetru neměřit pod 10% rozsahem přístroje, jak již bylo zmíněno. V případě několika past byla učiněna výjimka, kdy v tabulce a grafu jsou uvedeny odečtené hodnoty menší než 10, nikoliv však menší než 5. U každé pasty je uveden graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu, který byl odečten z dokumentace k viskozimetru Brookfield HBT dle příslušných otáček za minutu. Měření všech past probíhalo při teplotě 25 stupňů Celsia. U každé pasty je uvedena tabulka naměřených hodnot a graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu.

### 9.4.1 Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE TYPE 818 (Sn62 Pb36 Ag2)

Tabulka 7 – Naměřené hodnoty pro pastu Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE TYPE 818 systémem kužel-deska

rychlost [ot/min]	rychlostní gradient [ $s^{-1}$ ]	odečet [dítky]	viskozita [ $Pa \cdot s$ ]
0,5	1,92	36	294,9
1	3,94	55	225,3
2,5	9,6	77	126,2

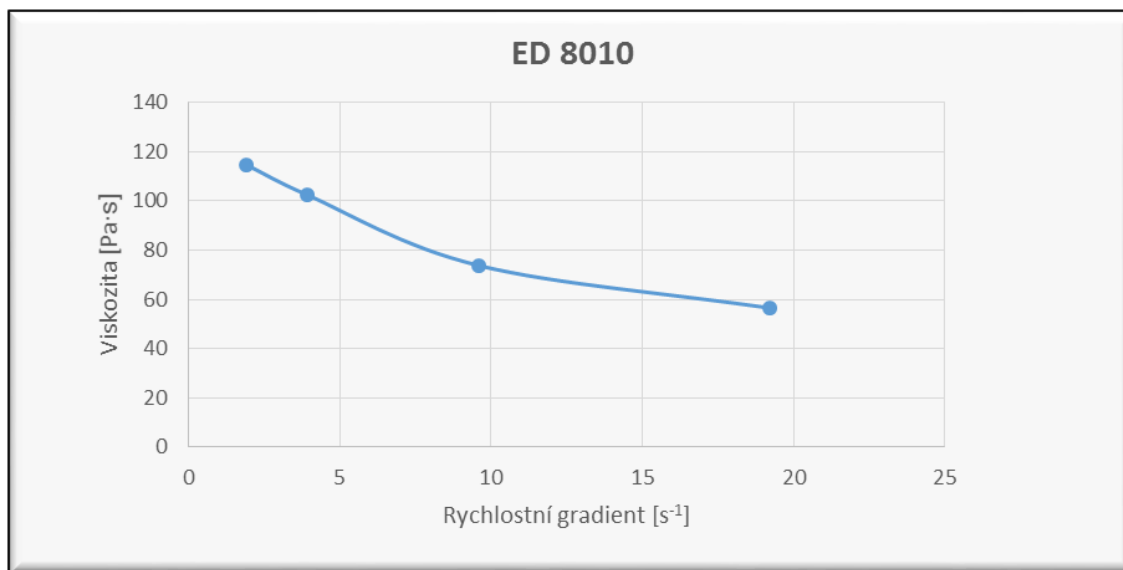


Obrázek 12 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE TYPE 818

## 9.4.2 ED 8010

Tabulka 8 – Naměřené hodnoty pro pastu ED 8010 systémem kužel-deska

rychlost [ot/min]	rychlostní gradient [ $s^{-1}$ ]	odečet [dílky]	viskozita [ $Pa \cdot s$ ]
0,5	1,92	14	114,7
1	3,94	25	102,4
2,5	9,6	45	73,7
5	19,2	69	56,5



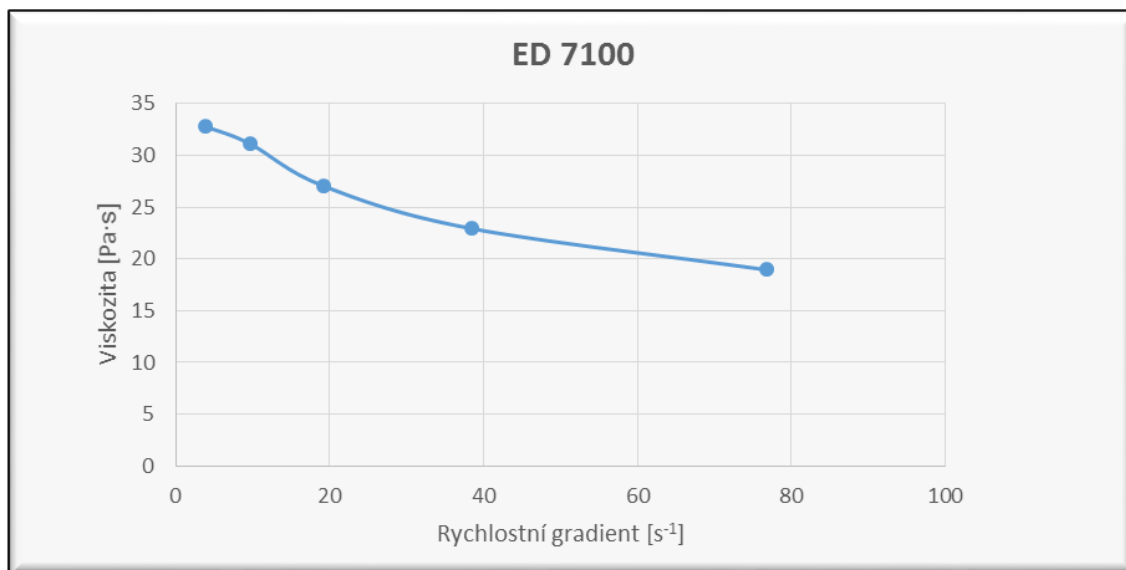
Obrázek 13 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu ED 8010

## 9.4.3 ED 7100

Tabulka 9 – Naměřené hodnoty pro pastu ED 7100 systémem kužel-deska

rychlost [ot/min]	rychlostní gradient [ $s^{-1}$ ]	odečet [dílky]	viskozita [ $Pa \cdot s$ ]
1	3,94	8	32,8
2,5	9,6	19	31,1
5	19,2	33	27,0
10	38,4	56	22,9
20	76,8	92,5	18,9



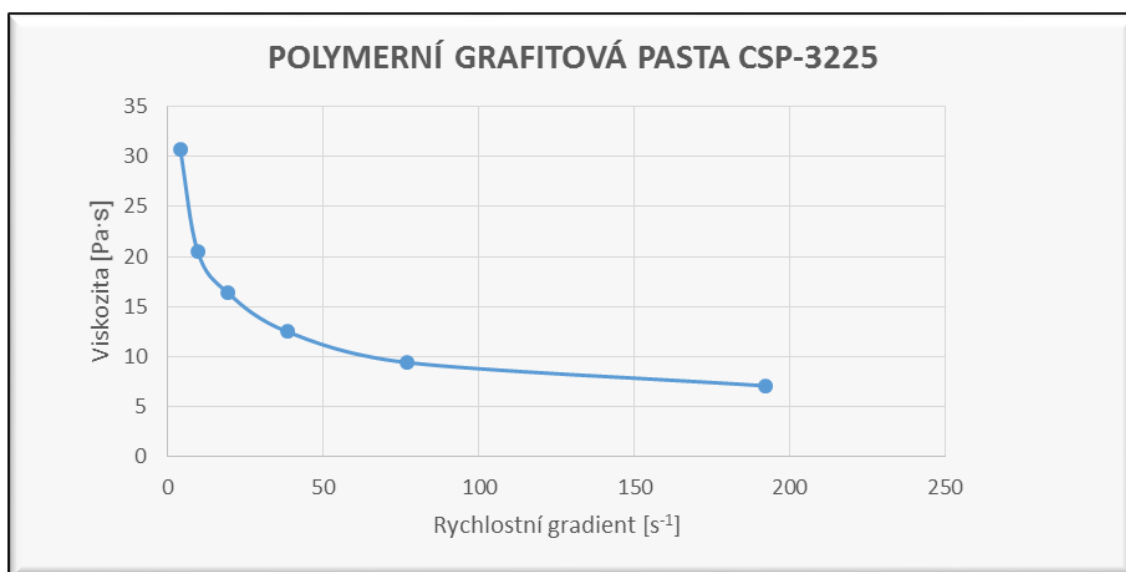


Obrázek 14 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu ED 7100

#### 9.4.4 POLYMERNÍ GRAFITOVÁ PASTA CSP-3225

Tabulka 10 – Naměřené hodnoty pro pastu POLYMERNÍ GRAFITOVÁ PASTA CSP-3225 systémem kužel-deska

rychlost [ot/min]	rychlostní gradient [s <sup>-1</sup> ]	odečet [dílký]	viskozita [Pa·s]
1	3,94	7,5	30,7
2,5	9,6	12,5	20,5
5	19,2	20	16,4
10	38,4	30,5	12,5
20	76,8	46	9,4
50	192	86,5	7,1



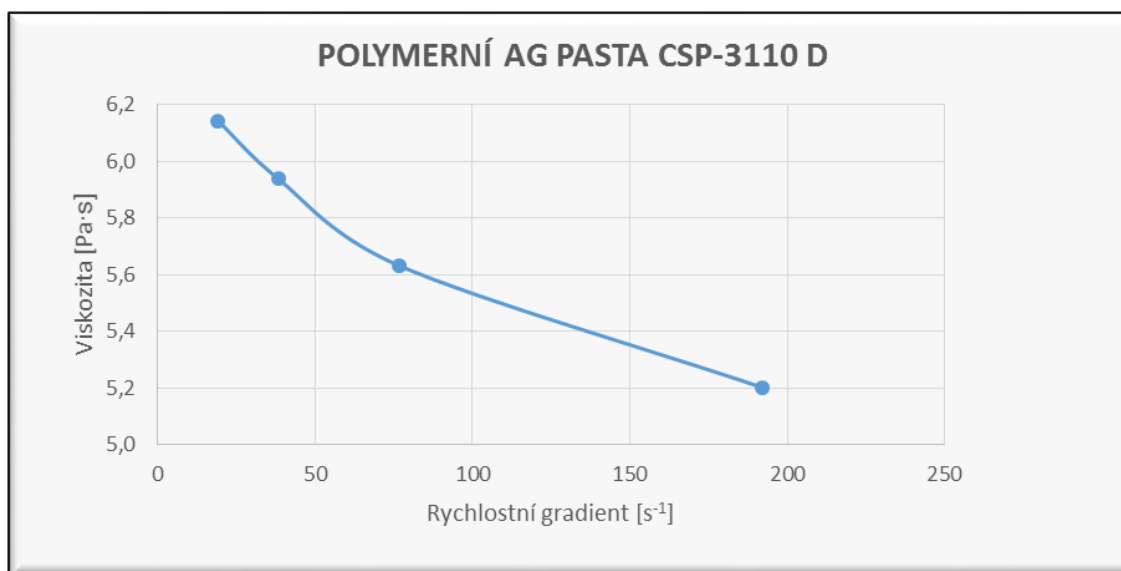
Obrázek 15 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu POLYMERNÍ GRAFITOVÁ PASTA CSP-3225

Pro 10 otáček za minutu je hodnota viskozity rovna 12,5 Pa·s, což je méně, než udává výrobce, může to být způsobeno prošlou použitelností pasty, jejíž platnost skončila 12. 3. 2009. Dalším důvodem může být vliv rozdílných systémů měření, kdy výrobce udává použití užitkového pohárku a vřetene SC4-14/6R.

#### 9.4.5 POLYMERNÍ AG PASTA CSP-3110 D

Tabulka 11 – Naměřené hodnoty pro pastu POLYMERNÍ AG PASTA CSP-3110 D systémem kužel-deska

rychlost [ot/min]	rychlostní gradient [ $s^{-1}$ ]	odečet [dílky]	viskozita [Pa·s]
5	19,2	7,5	6,1
10	38,4	14,5	5,9
20	76,8	27,5	5,6
50	192	63,5	5,2



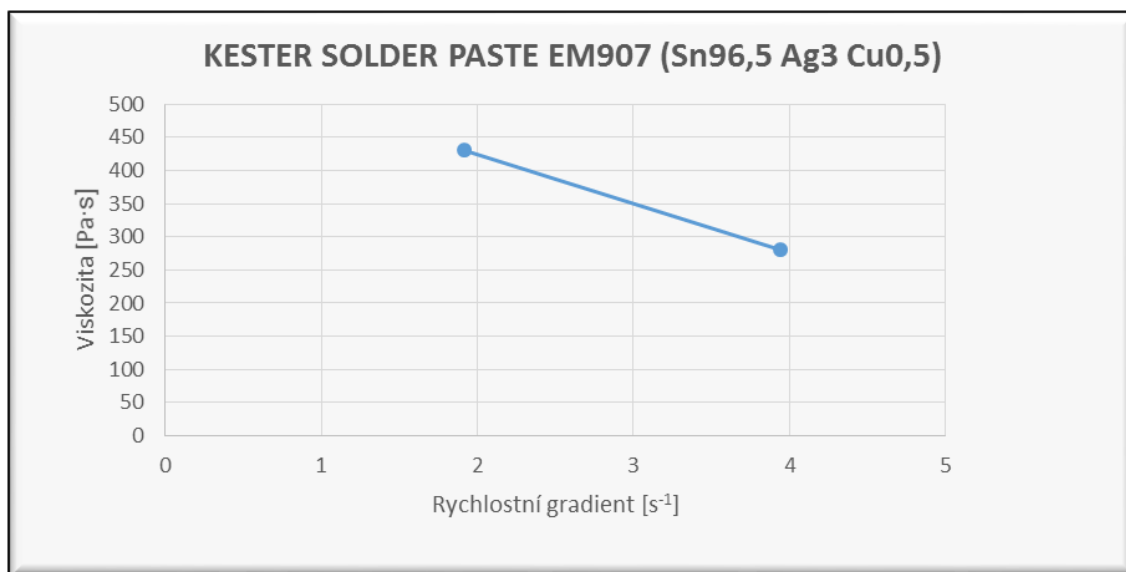
Obrázek 16 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu POLYMERNÍ AG PASTA CSP-3110 D

Pro 10 otáček za minutu je hodnota viskozity rovna 5,9 Pa·s, což je opět méně, než udává výrobce, stejně jako v případě předcházející pasty, i v případě této může být důvodem prošlé datum použitelnosti, obě data jsou shodná (12. 3. 2009). I zde však může být dalším důvodem použití odlišné měřicí soustavy (užitkový pohárek a vřeteno SC4-14/6R).

#### 9.4.6 KESTER SOLDER PASTE EM907 (Sn96,5 Ag3 Cu0,5)

Tabulka 12 – Naměřené hodnoty pro pastu KESTER SOLDER PASTE EM907 systémem kužel-deska

rychlost [ot/min]	rychlostní gradient [ $s^{-1}$ ]	odečet [dílky]	viskozita [Pa·s]
0,5	1,92	52,5	430,1
1	3,94	68,5	280,6



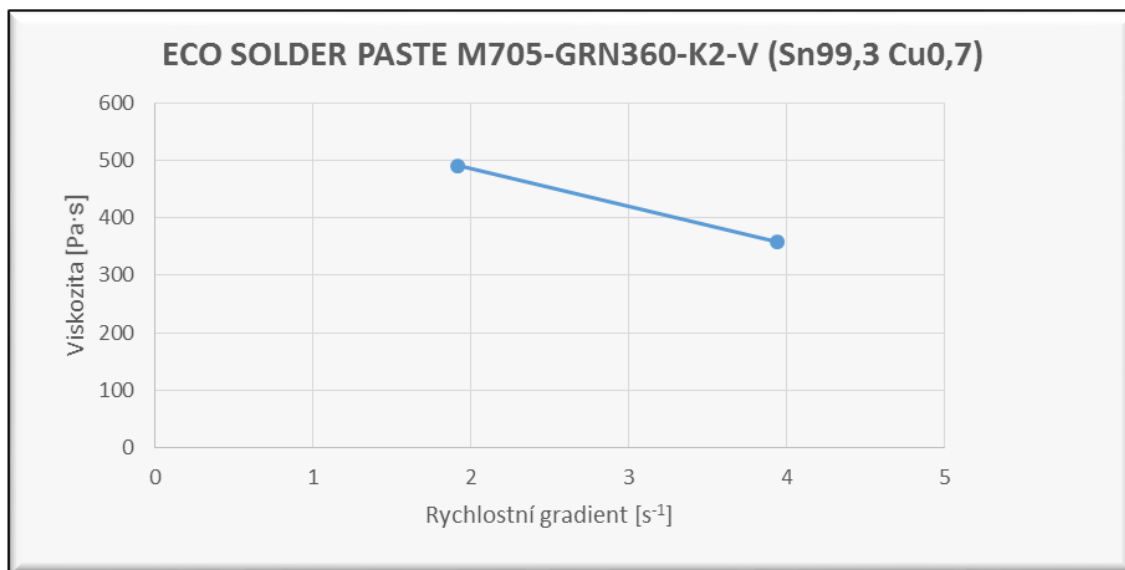
**Obrázek 17 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu KESTER SOLDER PASTE EM907**

V tomto případě jsem se bohužel nedostal až na hodnotu 10 otáček za minutu z důvodu pohybování se mimo rozsah viskozimetru, tudíž hodnoty naměřené viskozity nelze srovnat s hodnotou udávanou výrobcem. Při 1 otáčce za minutu je však hodnota viskozity větší než 180 (hodnota udávaná výrobcem), shodnost výsledků je tedy možná. Jelikož se mně podařilo naměřit pouze dvě hodnoty, je řádná aproximace grafického vyjádření nemožná (nevíme, o jaký druh závislosti se jedná), a nelze tedy potvrdit shodnost naměřených výsledků s hodnotou udávanou výrobcem.

#### 9.4.7 ECO SOLDER PASTE M705-GRN360-K2-V (Sn99,3 Cu0,7)

**Tabulka 13 – Naměřené hodnoty pro pastu ECO SOLDER PASTE M705-GRN360-K2-V systémem kužel-deska**

rychlost [ot/min]	rychlostní gradient [ $s^{-1}$ ]	odečet [dílký]	viskozita [ $Pa \cdot s$ ]
0,5	1,92	60	491,5
1	3,94	87,5	358,4



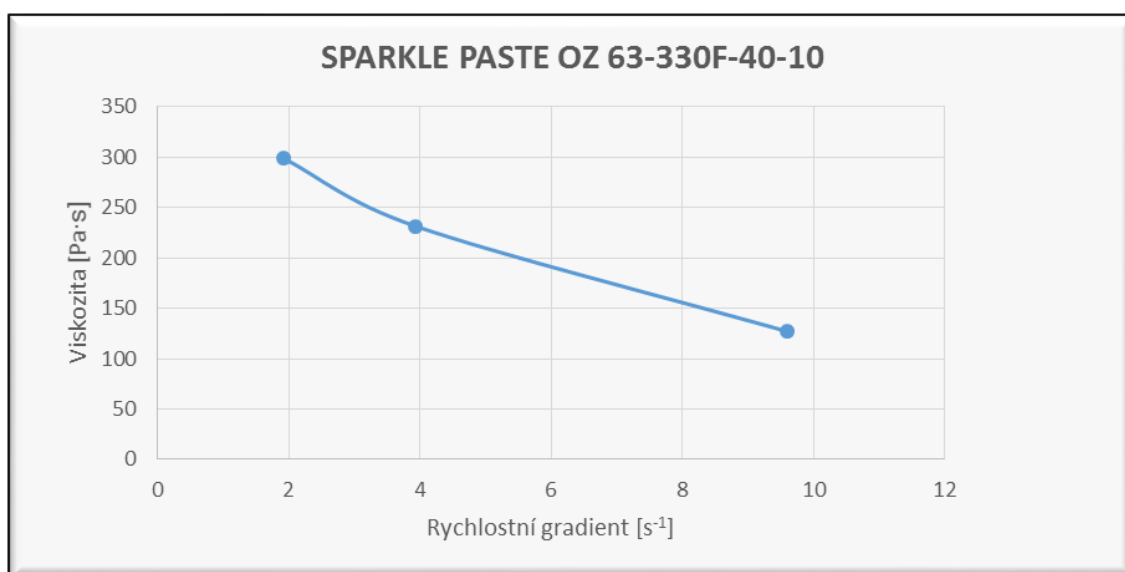
Obrázek 18 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu ECO SOLDER PASTE M705-GRN360-K2-V

Hodnota udávaná výrobcem sice nespadá do mnou naměřeného průběhu (nelze tedy potvrdit jeho správnost), ale průběh závislosti je klesající, tudíž ani nelze vyloučit jeho nesprávnost. Ze stejného důvodu bohužel není možné posoudit vliv prošlosti pasty na její viskozitu.

#### 9.4.8 SPARKLE PASTE OZ 63-330F-40-10

Tabulka 14 – Naměřené hodnoty pro pastu SPARKLE PASTE OZ 63-330F-40-10 systémem kužel-deska

rychlost [ot/min]	rychlostní gradient [s <sup>-1</sup> ]	odečet [dílky]	viskozita [Pa·s]
0,5	1,92	36,5	299,0
1	3,94	56,5	231,4
2,5	9,6	77,5	127,0



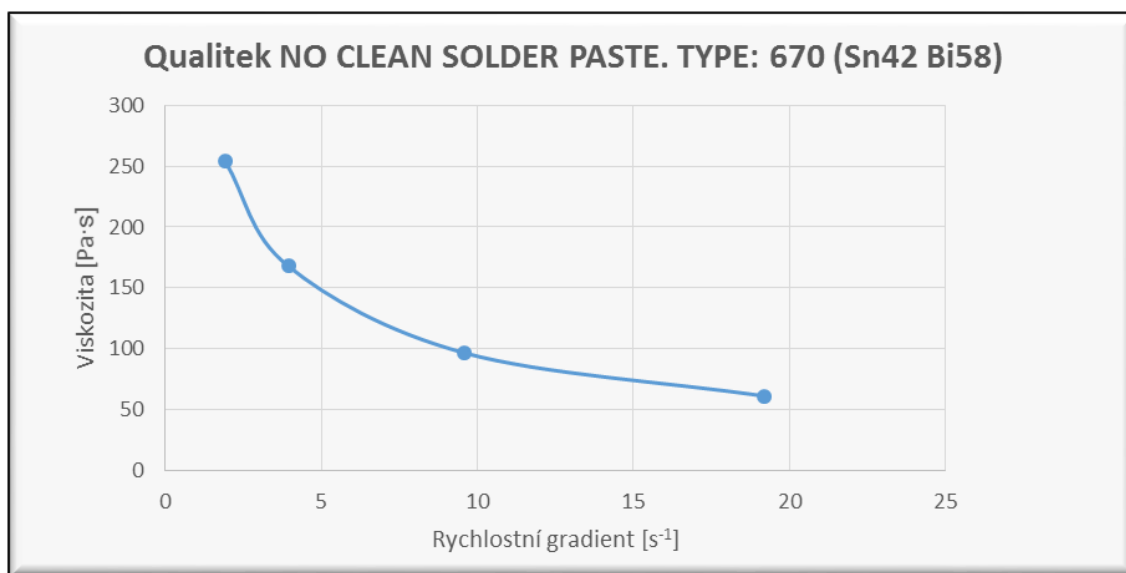
Obrázek 19 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu SPARKLE PASTE OZ 63-330F-40-10

Hodnota udávaná výrobcem se nachází v naměřeném průběhu, ale stejně jako v předcházejícím případě nelze bez znalosti teploty a otáček, při kterých bylo měřeno, vyvozovat další závěry.

#### 9.4.9 Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE. TYPE: 670 (Sn42 Bi58)

**Tabulka 15 – Naměřené hodnoty pro pastu Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE. TYPE: 670 systémem kužel-deska**

rychlost [ot/min]	rychlostní gradient [ $s^{-1}$ ]	odečet [dílký]	viskozita [ $Pa \cdot s$ ]
0,5	1,92	31	254,0
1	3,94	41	167,9
2,5	9,6	59	96,7
5	19,2	75	61,4

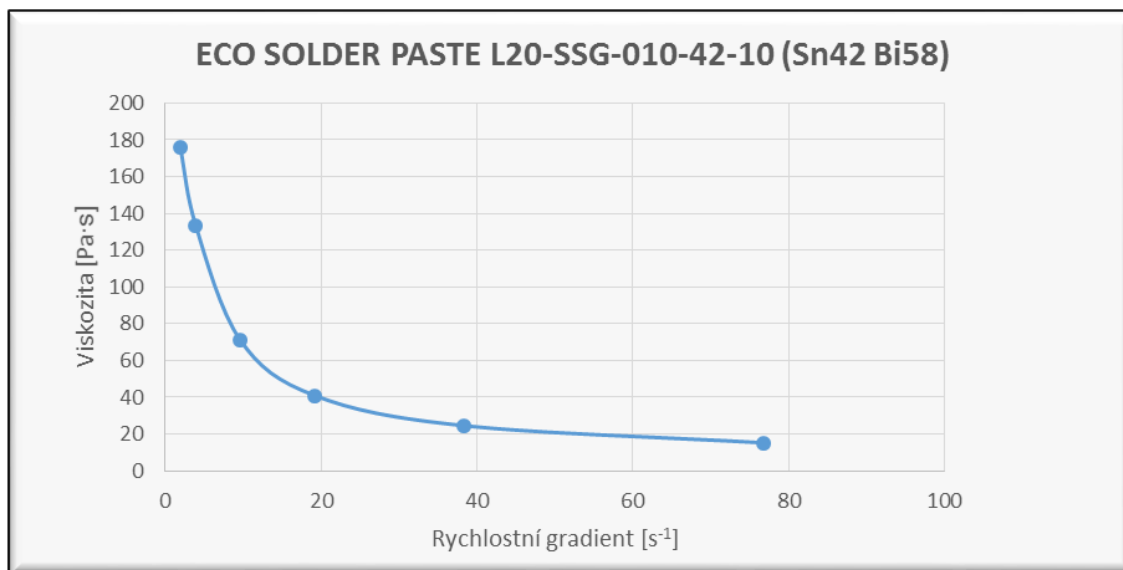


**Obrázek 20 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE. TYPE: 670**

#### 9.4.10 ECO SOLDER PASTE L20-SSG-010-42-10 (Sn42 Bi58)

**Tabulka 16 – Naměřené hodnoty pro pastu ECO SOLDER PASTE L20-SSG-010-42-10 systémem kužel-deska**

rychlost [ot/min]	rychlostní gradient [ $s^{-1}$ ]	odečet [dílký]	viskozita [ $Pa \cdot s$ ]
0,5	1,92	21,5	176,1
1	3,94	32,5	133,1
2,5	9,6	43,5	71,3
5	19,2	50	41,0
10	38,4	60	24,6
20	76,8	74,5	15,3



Obrázek 21 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu ECO SOLDER PASTE L20-SSG-010-42-10

Pro všechny pasty platí, že s rostoucí hodnotou otáček za minutu klesá viskozita, stejně jako tomu bylo při měření závěsným systémem. Jak lze vidět z grafů, stejně tak i s rostoucím rychlostním gradientem klesá hodnota viskozity. Největších hodnot viskozity dosahuje pasta ECO SOLDER PASTE M705-GRN360-K2-V (Sn99,3 Cu0,7) a naopak nejnižších POLYMERNÍ AG PASTA CSP-3110 D, která již při vizuální kontrole jevila známky nízké viskozity. Při srovnání měřených pájecích a sítotiskových past je zřejmé, že sítotiskové dosahují nižších hodnot viskozity než pájecí pasty. Při srovnání dvou past od různých výrobců, které obsahují stejné složení zahrnující bizmut a cín, lze pozorovat rozdílnou hodnotu viskozity při stejném rychlostním gradientu. Tento rozdíl může být způsoben rozdílností dat použitelnosti. Zatímco ECO SOLDER PASTE končí doba použitelnosti až v květnu roku 2016, v případě Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE vypršela už v květnu roku 2014. Při srovnání pájecích past lze vidět, že vyšších hodnot viskozit dosahují pasty s vyšším podílem cínu. V případě olovnaté pasty (Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE TYPE 818) je hodnota viskozity vyšší, než je tomu u past složených z bizmutu, ale zároveň nižší než u ostatních měřených bezolovnatých pájecích past.

## 9.5 Měření teploty systémem kužel-deska

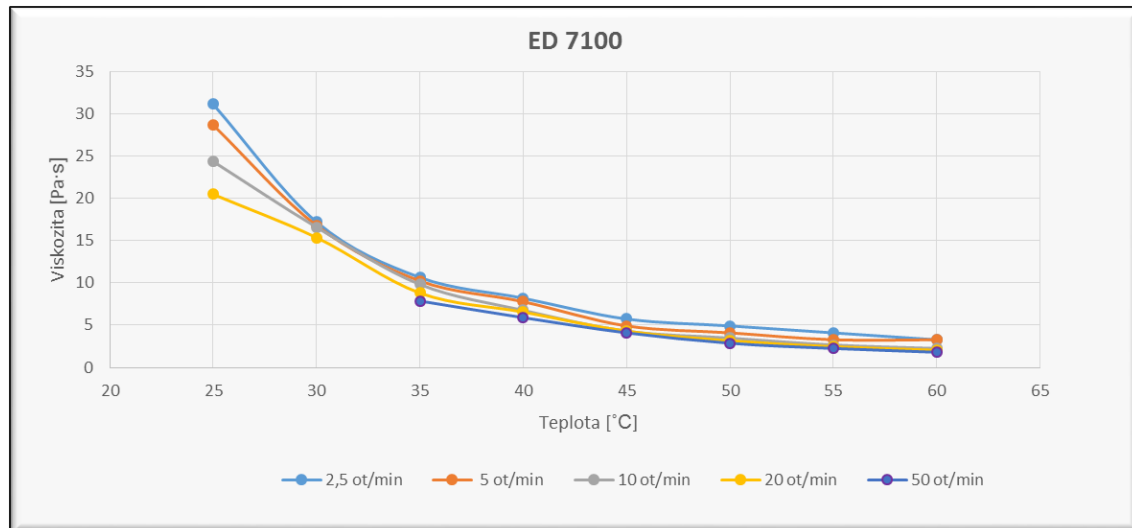
Při měření závislosti viskozity na teplotě jsem připojil na rotační viskozimetr připravený pro měření systémem kužel-deska termostat, jenž reguloval teplotu vody, která byla proháněna mezi dvojitou stěnou pohárku viskozimetru používaného při měření systémem kužel-deska a tento pohárek pak ohřívala. Zároveň byl na pohárek připojen multimetr MTETEX M3850D pro měření pájecích past a multimetr Hewlett-Packard 34401 A pro sítotiskovou pastu. Multimetry využívaly teplotního snímače v pohárku k měření odporu a jeho prostřednictvím byla ověřována teplota pohárku. K provedení měření v co největším rozsahu vyplývala nutnost zvolit pastu s velkou hodnotou viskozity, jelikož již při zvýšení teploty o pět stupňů Celsia bylo dosahováno podstatně nižší viskozity. Měření probíhalo

pro sítotiskovou pastu při rychlosti 2,5 až 50 otáček za minutu. Při ostatních rychlostech nebylo měřeno z důvodu pohybu mimo stupnici či pod 10% rozsahem stupnice pro velkou řadu teplotních kroků. V případě pájecích past byla oproti sítotiskové do měřeného rozsahu přidána rychlost 1 otáčky za minutu.

### 9.5.1 ED 7100

Tabulka 17 – Naměřené hodnoty teplotní závislosti viskozity pro pastu ED 7100

Teplota [°C]		25		30		35	
rychlost [ot/min]	rychlostní gradient [s <sup>-1</sup> ]	odečet [dílký]	viskozita [Pa·s]	odečet [dílký]	viskozita [Pa·s]	odečet [dílký]	viskozita [Pa·s]
2,5	9,6	19	31,1	10,5	17,2	6,5	10,6
5	19,2	35	28,7	20,5	16,8	12,5	10,2
10	38,4	59,5	24,4	40,5	16,6	24	9,8
20	76,8	100	20,5	75	15,4	43	8,8
50	38,4	>100	-	>100	-	96	7,9
Teplota [°C]		40		45		50	
rychlost [ot/min]	rychlostní gradient [s <sup>-1</sup> ]	odečet [dílký]	viskozita [Pa·s]	odečet [dílký]	viskozita [Pa·s]	odečet [dílký]	viskozita [Pa·s]
2,5	9,6	5	8,2	3,5	5,7	3	4,9
5	19,2	9,5	7,8	6	4,9	5	4,1
10	38,4	16,5	6,8	10,5	4,3	8,5	3,5
20	76,8	32	6,6	21	4,3	15,5	3,2
50	38,4	72	5,9	50	4,1	35	2,9
Teplota [°C]		55		60			
rychlost [ot/min]	rychlostní gradient [s <sup>-1</sup> ]	odečet [dílký]	viskozita [Pa·s]	odečet [dílký]	viskozita [Pa·s]		
2,5	9,6	2,5	4,1	2	3,3		
5	19,2	4	3,3	4	3,3		
10	38,4	6,5	2,7	5,5	2,3		
20	76,8	12	2,5	10	2,0		
50	38,4	27,5	2,3	22	1,8		



Obrázek 22 – Graf závislosti viskozity na teplotě pro pastu ED 7100

V tabulce výše jsou uvedeny naměřené hodnoty viskozity. Některé hodnoty nesplňují doporučení pohybování se nad 10% rozsahem viskozimetru udávaným výrobcem, přesto však byly ponechány z důvodu možnosti porovnání s hodnotami dosahovanými při vyšších rychlostech. Z grafu lze pozorovat pokles viskozity s teplotou, zároveň jsou patrné jen malé rozdíly v hodnotách viskozit pro rozdílné rychlosti, což vyplývá i z grafu v měření závěsným systémem, kde lze pozorovat málo se měnící viskozitu spolu s rychlostí. Pro hodnotu 50 otáček za minutu se pohybovaly hodnoty viskozity

při teplotách 25 a 30 °C mimo rozsah viskozimetru, proto graf tvarem neodpovídá grafům při ostatních hodnotách otáček za minutu.

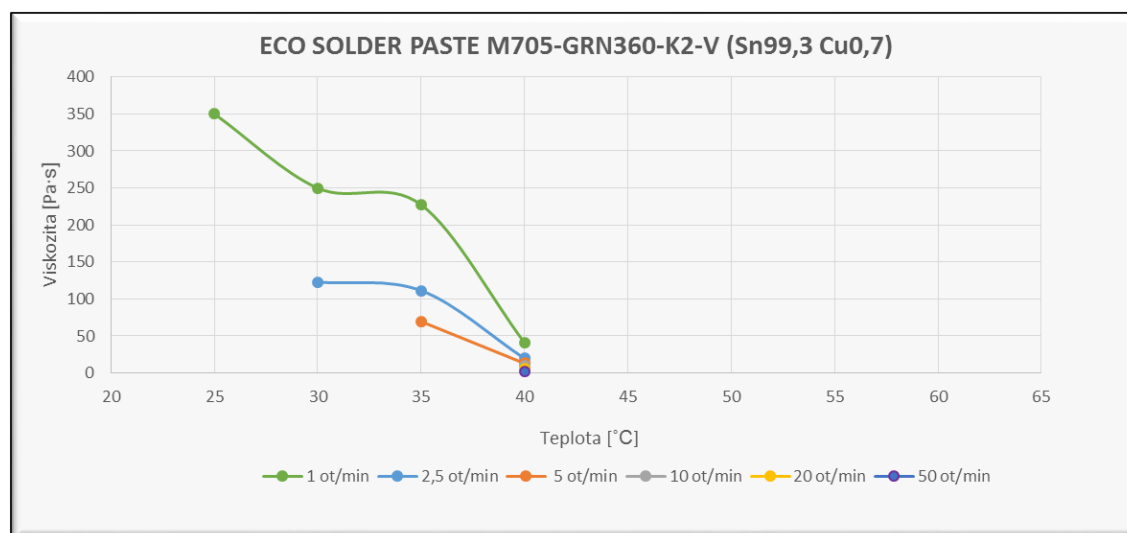
### 9.5.2 ECO SOLDER PASTE M705- GRN360- K2-V (Sn99,3 Cu0,7)

**Tabulka 18 – Naměřené hodnoty teplotní závislosti viskozity pro pastu ECO SOLDER PASTE M705-GRN360-K2-V**

Teplota [°C]		25		30		35	
rychlost [ot/min]	rychlostní gradient [s <sup>-1</sup> ]	odečet [dílky]	viskozita [Pa·s]	odečet [dílky]	viskozita [Pa·s]	odečet [dílky]	viskozita [Pa·s]
1	9,6	85,50	350,2	61	249,9	55,5	227,3
2,5	9,6	>100	-	75	122,9	68	111,4
5	19,2	>100	-	>100	-	85	69,6
10	38,4	>100	-	>100	-	>100	-
20	76,8	>100	-	>100	-	>100	-
50	38,4	>100	-	>100	-	>100	-

Teplota [°C]		40	
rychlost [ot/min]	rychlostní gradient [s <sup>-1</sup> ]	odečet [dílky]	viskozita [Pa·s]
1	9,6	10	41,0
2,5	9,6	12	19,7
5	19,2	16	13,1
10	38,4	23	9,4
20	76,8	26	5,3
50	38,4	30	2,5



**Obrázek 23 – Graf závislosti viskozity na teplotě pro pastu ECOSOLDER PASTE M705-GRN360- K2-V**

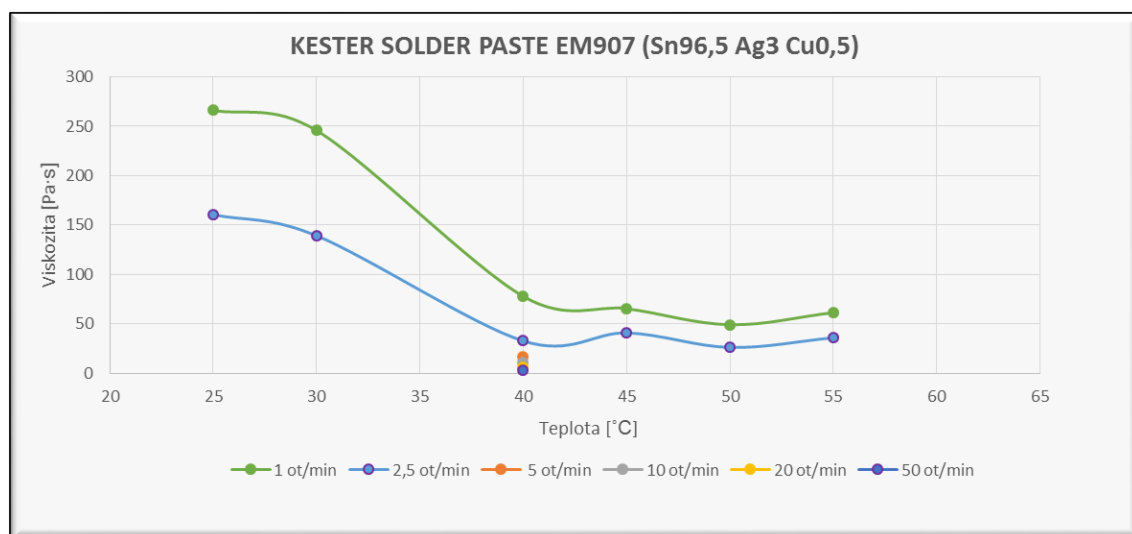
V případě této pájecí pasty je patrný rozdíl v hodnotách viskozity při různých rychlostech, což odpovídá výsledkům měření závěsným systémem. Dle očekávání lze pozorovat klesající hodnoty viskozity s nárůstem teploty. Jak je vidět z tabulky 18, při vyšších hodnotách se pohybovaly hodnoty viskozity mimo rozsah viskozimetru, ovšem postupným oteplováním se při vyšších otáčkách za minutu pasta v pohárku pod kuželem odstředila směrem od středu pohárku a pod samotným kuželem zůstalo jen minimální množství pasty, což mělo za následek rozdíl v naměřených hodnotách viskozity při rostoucí a klesající rychlosti. U prvního měření při teplotě 40 stupňů Celsia a rostoucích otáčkách za minutu bylo dosahováno hodnot odpovídajících chování sítotiskové pasty ED 7100 (mírný pokles viskozity s rostoucí teplotou). Při vyšších rychlostech se projevilo odstředění pasty prudkým poklesem viskozity a při následném vyzkoušení nižších hodnot rychlostí došlo k poklesu viskozity i pro tyto případy až k 10% hranici rozsahu viskozimetru.



### 9.5.3 KESTER SOLDER PASTE EM907 (Sn96,5 Ag3 Cu0,5)

Tabulka 19 – Naměřené hodnoty teplotní závislosti viskozity pro pastu KESTER SOLDER PASTE EM907

Teplota [°C]		25		30		40	
rychlost [ot/min]	rychlostní gradient [s <sup>-1</sup> ]	odečet [dílký]	viskozita [Pa·s]	odečet [dílký]	viskozita [Pa·s]	odečet [dílký]	viskozita [Pa·s]
1	9,6	65	266,2	60	245,8	19	77,8
2,5	9,6	98	160,6	85	139,3	20	32,8
5	19,2	>100	-	>100	-	20,5	16,8
10	38,4	>100	-	>100	-	26	10,6
20	76,8	>100	-	>100	-	30	6,1
50	38,4	>100	-	>100	-	40	3,3
Teplota [°C]		45		50		55	
rychlost [ot/min]	rychlostní gradient [s <sup>-1</sup> ]	odečet [dílký]	viskozita [Pa·s]	odečet [dílký]	viskozita [Pa·s]	odečet [dílký]	viskozita [Pa·s]
1	9,6	16	65,5	12	49,2	15	61,4
2,5	9,6	25	41,0	16	26,2	22	36,0



Obrázek 24 – Graf závislosti viskozity na teplotě pro pastu KESTER SOLDER PASTE EM907

Stejně jako v případě předcházející pasty, i pasta EM907 se řadí mezi pájecí a při zvýšení teploty se projevovала podobným způsobem. Při teplotě 40 stupňů Celsia a při vyšších hodnotách otáček za minutu došlo k prudkému poklesu viskozity, následované prudkým poklesem viskozity i při nižších otáčkách za minutu. Avšak na rozdíl od pasty předcházející byly od 40 stupňů Celsia odečtené hodnoty ze stupnice nižší pro vyšší rychlosti (5 otáček za minutu a více) než pro nižší rychlosti. Z toho jsem usoudil, že pod plochou kužele je natolik málo pasty, že viskozimetr není schopen pro tyto vyšší rychlosti hodnotu viskozity řádně změřit, proto jsem pokračoval v měření při teplotách vyšších než 40 stupňů Celsia pouze při hodnotě otáček za minutu 1 a 2,5.

Při teplotě 55 stupňů Celsia jsem však naměřil pro obě hodnoty otáček za minutu hodnoty viskozity vyšší než při 50 stupních Celsia, což naznačuje, že i při malých hodnotách otáček za minutu se projevilo odstředění pasty.

## 10 Závěr

V bakalářské práci jsem se zabýval měřením viskozity pastovitých materiálů pro elektrotechniku. Krátce byly představeny vlastnosti a struktura pastovitých materiálů spolu s jejich rozdělením. Část práce byla věnována viskozitě jakožto fyzikální veličině a rozdělení tekutin na newtonské a neneutronské z hlediska řízení se Newtonovým zákonem viskozity. Dále byly shrnuty základní typy viskozimetrů pro měření viskozity s rozdílnou konstrukcí, kdy u základních typů jsou uvedeny jejich charakteristiky a princip, který využívají při měření. Největší část je věnována rotačním viskozimetrům, a to z důvodu provádění vlastního měření pomocí tohoto typu viskozimetru.

V praktické části bakalářské práce jsem se seznámil se zásadami měření pomocí rotačního viskozimetru uvedenými v normě ČSN EN ISO 3219, přičemž tyto zásady jsou zpracovány jako součást bakalářské práce, a se sestavením, stavbou a použitím rotačního viskozimetru od firmy Brookfield dostupného na katedře elektrotechnologie. Pro měření byly využity dva systémy, přičemž využití závěsného systému poskytuje spíše orientační hodnoty. Výhodou tohoto systému je možnost měření pro větší rozsah viskozity než v případě systému kužel-deska, a to díky celé řadě vyměnitelných vřeten pro různé rozsahy. Tato možnost však v rámci mého měření nebyla využita v důsledku měření všech past pouze s jedním vřetenem. Zároveň je třeba vzít v potaz, že pro dosažení vyšší přesnosti měření je nutno použít speciální nádobu na pastu, na katedře elektrotechnologie nedostupnou, a proto bylo měřeno v nádobkách, ve kterých jsou pasty dodávány. Při použití systému kužel-deska u rotačního viskozimetru od firmy Brookfield bylo dosahováno vyšší přesnosti, zároveň se měření tímto systémem jeví jako hospodárnější díky využití menšího objemu vzorku. Za nevýhodu lze považovat nutnost problematického nastavování vzdálenosti kužele a desky před každým měřením, což vede k delší době měření, než je tomu u závěsného systému.

Z výsledků měření vyplývá příslušnost zkoumaných pastovitých materiálů k neneutronovským tekutinám, jelikož pro všechny pasty se měnila hodnota viskozity (klesala) s rostoucími hodnotami otáček za minutu a s tím souvisejícím rychlostním gradientem. Nejvyšší hodnota viskozity byla naměřena pro pájecí pastu na bázi cínu a mědi typu M705-GRN360-K2-V, naopak nejmenší viskozitou se vyznačovala polymerní Ag pasta typu CSP-3110 D. Při měření teplotní závislosti s rostoucí teplotou klesala hodnota viskozity pro všechny měřené pasty, což bylo možné pozorovat již při pouhé teplotě pasty vystavené pokojové teplotě v měření závěsným systémem. V případě pájecích past vlivem zvýšení teploty došlo k odstředění pasty směrem od středu pohárku, což mělo za následek prudký pokles naměřených hodnot viskozity.

Ze srovnání vlivu změny rychlosti a teploty na viskozitu vyplývá větší vliv teploty na viskozitu sítotiskové pasty, kde například změna teploty o 5 °C (z 25 na 30 °C) má přibližně stejný vliv na viskozitu jako změna rychlosti z 2,5 až na 20 otáček za minutu. Oproti tomu v případě pájecích past hraje větší roli rychlost, kdy pouhá změna o jeden rychlostní stupeň (například z 1 na 2,5 otáčky za minutu) vyvolá větší změnu viskozity než změna teploty o 5 °C. Jednotlivé vlivy rychlosti a teploty

na všechny měřené pasty se spolu s rostoucí teplotou přibližují a dochází tak ke zmenšování jejich rozdílu.

Z měření past, pro které jsem znal výrobcem udávanou viskozitu, vyplývá možnost, že prošlá doba použitelnosti pasty ovlivňuje hodnotu viskozity. Je-li tomu opravdu tak, změna není nijak zvlášť závažná, zvážíme-li, že měřené pasty byly již šest let po uplynutí doby použitelnosti. Další možností jak na práci navázat, je změření viskozity prošlých past stejným přístrojem a konfigurací, jakou udává výrobce pasty, a tyto hodnoty porovnat. Výsledek měření pak pomůže lépe zhodnotit možnosti využití prošlých past v praxi, případně aspoň vyloučit možné nežádoucí chování (z hlediska viskozity) prošlé pasty na průběh síťotisku.

## 11 Seznam použité literatury

- [1] BESHAIJOVÁ PELIKÁNOVÁ, Ivana. *TLUSTÉ VRSTVY – TISK, VYTVRZENÍ, MĚŘENÍ* [online]. Praha [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://martin.feld.cvut.cz/~pelikano/vyuka/EMT/tlustvrsvy.pdf>. České vysoké učení technické v Praze.
- [2] MACH, Pavel. *Thusté vrstvy a thustovrstvé technologie* [online]. Praha [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/1696/mod\\_resource/content/1/Thuste\\_vrstvy\\_a\\_thustovrstve\\_technologie.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/1696/mod_resource/content/1/Thuste_vrstvy_a_thustovrstve_technologie.pdf). České vysoké učení technické v Praze.
- [3] EDITED BY DEBORAH D. L. CHUNG. *Materials for electronic packaging* [online]. 31. 3. 1995. Boston: Butterworth-Heinemann, 1995, s. 175 - 176 [cit. 2015-12-27]. ISBN 978-008-0511-177. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=4MfULpU38FUC&oi=fnd&pg=PA175&dq=thick+film+tech+nology&ots=G19z5j9lyp&sig=wLRgeZKpERhS1tiynF9KvFwCShA&redir\\_esc=y#v=onepage&q=thick%20film%20technology&f=false](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=4MfULpU38FUC&oi=fnd&pg=PA175&dq=thick+film+tech+nology&ots=G19z5j9lyp&sig=wLRgeZKpERhS1tiynF9KvFwCShA&redir_esc=y#v=onepage&q=thick%20film%20technology&f=false)
- [4] ADÁMEK, Martin, Edita HEJÁTKOVÁ, Marek NOVOTNÝ, Jan PRÁŠEK a Cyril VAŠKO. *Moderní technologie elektronických obvodů a systémů: Laboratorní cvičení* [online]. Brno, 2011, s. 12 – 21 [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/METMEL/studijni-pomucky/METMEL\\_44\\_L\\_MMTE\\_Moderni\\_tehnologie.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/METMEL/studijni-pomucky/METMEL_44_L_MMTE_Moderni_tehnologie.pdf). Vysoké učení technické v Brně.
- [5] Technologie tlustých vrstev. *ELCERAM* [online]. Hradec Králové, c2005-2012 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://www.elceram.cz/cs/technologie-technologie-tlustyh-vrstev.html>
- [6] SZENDIUCH, Ivan. *Thusté vrstvy* [online]. 2008 [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/05a\\_thuste\\_vrstvy.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/05a_thuste_vrstvy.pdf)
- [7] HOLUBOVÁ, Renata. *Základy reologie a reometrie kapalin* [online]. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014, s. 23 [cit. 2015-12-27]. ISBN 978-80-244-4178-8. Dostupné z: [http://mofychem.upol.cz/KA6/Zaklady\\_reologie.pdf](http://mofychem.upol.cz/KA6/Zaklady_reologie.pdf)
- [8] Stanovení viskozity roztoků – teoretická část. *VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE* [online]. Praha, c2014 [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: [http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res\\_stanoveni\\_viskozity\\_roztoku/teorie.htm](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_stanoveni_viskozity_roztoku/teorie.htm)
- [9] BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠIŠKOVÁ. Co je co v povrchové a koloidní chemii: newtonská tekutina. In: *VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE* [online]. Praha: Vydavatelství VŠCHT, c2005 [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_es-001/hesla/newtonska\\_tekutina.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/newtonska_tekutina.html)
- [10] BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠIŠKOVÁ. Co je co v povrchové a koloidní chemii: nenewtonská tekutina. In: *VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE* [online]. Praha: Vydavatelství VŠCHT, c2005 [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_es-001/hesla/nenewtonska\\_tekutina.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/nenewtonska_tekutina.html)
- [11] ONDRÁČEK, Michal. *Vliv viskozity thustovrstvé pasty před tiskem na formování vrstev: bakalářská práce*. VUT v Brně. 2012. Dostupné na <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/12456/BP%20xondra28.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [12] ŠVÍGLEROVÁ, Jitka. Viskozita: Fyzikální definice. In: *Slovník fyziologie* [online]. Poslední revize 2009-02-18 [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: <http://wiki.lfp-studium.cz/index.php/Viskozita>
- [13] BESHAIJOVÁ PELIKÁNOVÁ, Ivana. The influence of Viscosity of Thick Fil Pastes on Quality of Printed Structures. In *19th Electronic Devices and Systems Conference 2012*, Brno, červen 2012, pp. 283–288, ISBN 978-80-214-4539-0

- [14] JANALÍK, Jaroslav. *Viskozita tekutin a její měření* [online]. Ostrava, 2010, s. 17 - 45 [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/TEXTviskozitaPDF.pdf>. Vysoká škola Báňská - technická univerzita Ostrava.
- [15] ČSN EN ISO 3219. *Plasty: Polymery/pryskyřice v kapalném nebo emulgovaném nebo dispergovaném stavu. Stanovení viskozity rotačním viskozimetrem s definovanou smykovou rychlostí*. Praha: Český normalizační institut, 1996.
- [16] *BROOKFIELD DIAL VISCOMETER: Operating Instructions Manual No. M/85-150-0899* [online]. 11 Commerce Boulevard, Middleboro, MA 02346-1031 USA: BROOKFIELD ENGINEERING LABORATORIES, INC. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.viscometers.org/PDF/Manuals/laboratory/DIAL.PDF>
- [17] RV/HA/HB Spindles. *Brookfield AMETEK* [online]. Middleboro, Massachusetts: Brookfield AMETEK, c2005-2016 [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: [http://www.brookfieldengineering.com/products/accessories/spindles/rv\\_ha\\_hb\\_spindles.asp](http://www.brookfieldengineering.com/products/accessories/spindles/rv_ha_hb_spindles.asp)

## 12 Seznam použitých obrázků

Obrázek 1 – Provedení sítotisku .....	15
Obrázek 2 - Rozdělení rychlostí v příčném řezu proudící tekutinou.....	18
Obrázek 3 – Provedení kapilárních viskozimetrů .....	21
Obrázek 4 – Náskres provedení rotačních viskozimetrů.....	23
Obrázek 5 – Řez rotačním viskozimetrem .....	24
Obrázek 6 – Graf závislosti viskozity na otáčkách za minutu pro pastu Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE TYPE 818.....	29
Obrázek 7 – Graf závislosti viskozity na otáčkách za minutu pro pastu ED 8010.....	30
Obrázek 8 – Graf závislosti viskozity na otáčkách za minutu pro pastu ED 7100.....	30
Obrázek 9 – Graf závislosti viskozity na otáčkách za minutu pro pastu ECO SOLDER PASTE M705-GRN360-K2-V .....	31
Obrázek 10 – Graf závislosti viskozity na otáčkách za minutu pro pastu SPARKLE PASTE OZ 63-330F-40-10.....	32
Obrázek 11 – Graf závislosti viskozity na otáčkách za minutu.....	32
Obrázek 12 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE TYPE 818 .....	33
Obrázek 13 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu ED 8010 .....	34
Obrázek 14 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu ED 7100 .....	35
Obrázek 15 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu POLYMERNÍ GRAFITOVÁ PASTA CSP-3225.....	35
Obrázek 16 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu POLYMERNÍ AG PASTA CSP-3110 D .....	36
Obrázek 17 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu KESTER SOLDER PASTE EM907.....	37
Obrázek 18 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu ECO SOLDER PASTE M705-GRN360-K2-V .....	38
Obrázek 19 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu SPARKLE PASTE OZ 63-330F-40-10.....	38
Obrázek 20 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE. TYPE: 670 .....	39
Obrázek 21 – Graf závislosti viskozity na rychlostním gradientu pro pastu ECO SOLDER PASTE L20-SSG-010-42-10.....	40
Obrázek 22 – Graf závislosti viskozity na teplotě pro pastu ED 7100.....	41
Obrázek 23 – Graf závislosti viskozity na teplotě pro pastu ECOSOLDER PASTE M705-GRN360-K2-V .....	42
Obrázek 24 – Graf závislosti viskozity na teplotě pro pastu KESTER SOLDER PASTE EM907.....	43

## 13 Seznam použitých tabulek

Tabulka 1 – Seznam použitých vzorků a údaje udávané výrobcem .....	28
Tabulka 2 – Naměřené hodnoty pro pastu Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE TYPE 818 závěsným systémem .....	29
Tabulka 3 – Naměřené hodnoty pro pastu ED 8010 závěsným systémem .....	29
Tabulka 4 – Naměřené hodnoty pro pastu ED 7100 závěsným systémem .....	30
Tabulka 5 – Naměřené hodnoty pro pastu ECO SOLDER PASTE M705-GRN360-K2-V závěsným systémem .....	31
Tabulka 6 – Naměřené hodnoty pro pastu SPARKLE PASTE OZ 63-330F-40-10 závěsným systémem .....	32
Tabulka 7 – Naměřené hodnoty pro pastu Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE TYPE 818 systémem kužel-deska .....	33
Tabulka 8 – Naměřené hodnoty pro pastu ED 8010 systémem kužel-deska .....	34
Tabulka 9 – Naměřené hodnoty pro pastu ED 7100 systémem kužel-deska .....	34
Tabulka 10 – Naměřené hodnoty pro pastu POLYMERNÍ GRAFITOVÁ PASTA CSP-3225 systémem kužel-deska .....	35
Tabulka 11 – Naměřené hodnoty pro pastu POLYMERNÍ AG PASTA CSP-3110 D systémem kužel-deska .....	36
Tabulka 12 – Naměřené hodnoty pro pastu KESTER SOLDER PASTE EM907 systémem kužel-deska .....	36
Tabulka 13 – Naměřené hodnoty pro pastu ECO SOLDER PASTE M705-GRN360-K2-V systémem kužel-deska .....	37
Tabulka 14 – Naměřené hodnoty pro pastu SPARKLE PASTE OZ 63-330F-40-10 systémem kužel-deska .....	38
Tabulka 15 – Naměřené hodnoty pro pastu Qualitek NO CLEAN SOLDER PASTE. TYPE: 670 systémem kužel-deska .....	39
Tabulka 16 – Naměřené hodnoty pro pastu ECO SOLDER PASTE L20- SSG-010-42-10 systémem kužel-deska .....	39
Tabulka 17 – Naměřené hodnoty teplotní závislosti viskozity pro pastu ED 7100 .....	41
Tabulka 18 – Naměřené hodnoty teplotní závislosti viskozity pro pastu ECO SOLDER PASTE M705-GRN360-K2-V .....	42
Tabulka 19 – Naměřené hodnoty teplotní závislosti viskozity pro pastu KESTER SOLDER PASTE EM907 .....	43