



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai kar
Elektronikai Technológia Tanszék

Tudományos Diákköri Konferencia

2016/2017 I. félév

Forraszpaszták stencilnyomtatás közben mutatott reológiai tulajdonságainak vizsgálata

Készítette: Storcz Richárd (CE7GCS)

Konzulens: Dr. Krammer Olivér

Külsős konzulens: Dr. Gyarmati Benjámín Sándor

Budapest

2016

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Újraömllesztési technológia.....	4
2.1. Stencilnyomtatás	4
2.2. Beültetés	5
2.3. Forrasztás.....	6
3. Forraszpaszták reológiája	7
3.1 A forraszpaszta	7
3.2 Tixotrópia	7
3.3 Szuszpenziók viszkozitása.....	8
3.4. Falmegcsúszási jelenség.....	9
4. Forraszpaszták viszkozitásának eddigi mérései.....	10
4.1. A forraszpaszták tixotróp tulajdonságainak vizsgálata	11
4.2. A falmegcsúszási jelenség vizsgálata.....	14
4.3. Numerikus modellezés	17
4.4. Irodalmi összefoglaló	19
5. Önálló munka.....	20
5.1. Vizsgált minták.....	20
5.2. Kísérletterv	20
5.2.1. Mérési paraméterek	20
5.2.2. Mérések menete.....	21
5.3. Mérési eredmények kiértékelése	22
6. Eredmények.....	23
6.1. Type 3 típusú forraszpaszták vizsgálata	23
6.2. Type 4 típusú forraszpaszták vizsgálata	27
6.3. Type 5 típusú forraszpaszták vizsgálata	31
6.4. Viszkozitások összehasonlítása	35
7. Összefoglalás.....	37
Irodalomjegyzék.....	38
Ábrajegyzék.....	40
Táblázatjegyzék.....	42
Köszönetnyilvánítás	43

1. Bevezetés

Az újraömllesztéses forrasztási technológia gyors ütemű fejlődésével egyre kisebb és kisebb felületszerelt alkatrészeket használunk mindennapi eszközeinkben azok méretének minimalizálásáért. Ehhez szükséges a technológia legfontosabb lépésének, a stencilnyomtatás gyors ütemű fejlődése. Az elektronikai eszközök forrasztási hibáinak 60%-a a stencilnyomtatásra vezethető vissza, ezen hibák csökkentéséhez a stencilnyomtatási folyamat optimalizálására illetve annak numerikus modellezésére van szükség. Ehhez azonban nélkülözhetetlen az alkalmazott forraszpasztá reológiai tulajdonságainak, viszkozitásának pontos ismerete.

Irodalomkutatásom során olvasott cikkekben azt a közös pontot találtam, hogy a stencilnyomtatási folyamat optimalizálásánál, modellezésénél, a forraszpasztá reológiai tulajdonságait friss mintára határozták meg. Majd az így kapott eredményeket használták fel a későbbi optimalizálásokhoz illetve szimulációkhoz. Azonban a stencilnyomtatásnál a forraszpasztá tixotrópikus jellege miatt a paszta viszkozitása folyamatosan változik a nyomtatási ciklusok során. Ezáltal a friss forraszpasztá reológiai tulajdonságaival számított numerikus eredmények illetve szimulációk nem fognak megfelelni a valóságnak, és az optimalizálási folyamatok is félrevezető eredményeket adhatnak.

Ezért tűztem ki célul olyan mérési folyamat kidolgozását, mely a korábbi vizsgálatokhoz képest jobban közelíti a forraszpasztá stencilnyomtatás közben mutatott reológiai változásait, illetve tixotrópikus viselkedését.

2. Újraömllesztéses technológia

A felületi szereléstechológia (SMT – Surface Mount Technology) megjelenése lehetővé tette az alkalmazott alkatrészek fizikai méreteinek csökkenését, ezáltal a nyomtatott huzalozású lemez (NyHL) alapú áramkörök integráltsági fokának növelését [1]. Az SM technológia lényege, hogy az alkatrészeket nem furatokba ültetjük, hanem a nyomtatott huzalozású lemezek felületén rögzítjük. Az alkatrészek ilyen módon történő villamos és mechanikai rögzítésének egyik elterjedt technológiája az újraömllesztéses forrasztás.

Ennél a technológiánál a kontaktus felületekre a mechanikai és villamos kötést biztosító forraszt forraszpasztát (*solder paste*) formájában viszik fel. Ennek felvitele történhet stencilnyomtatással vagy cseppadagolással. A forraszpasztát felvitelének minőségét és mennyiségét 3D paszta ellenőrző (Solder Paste Inspection – SPI) berendezés segítségével ellenőrzik [2]. Az alkatrészeket automata (*pick & place* vagy *collect & place*) beültető gépek segítségével beültetik, majd azt automatikus optikai ellenőrző berendezéssel (Automatic Optical Inspection – AOI) ellenőrzik [1,2]. Az alkatrész kivezetése és a forrasztási felület (*pad*) közötti villamos és mechanikai kötés kialakításához a beültetett lemezt újraömllesztő kemencébe helyezik, ahol a forraszpasztát megömlik majd lehűlésekor megszilárdul [3]. A létrejött kötések több berendezés segítségével ellenőrzik. Ilyen berendezés az automatikus röntgenes ellenőrző (Automatic X-ray Inspection – AXI), áramkör bemérő (In-Circuit Test – ICT) és az elektronikus működést ellenőrző (Functional Test – FT) berendezés [2].

2.1. Stencilnyomtatás

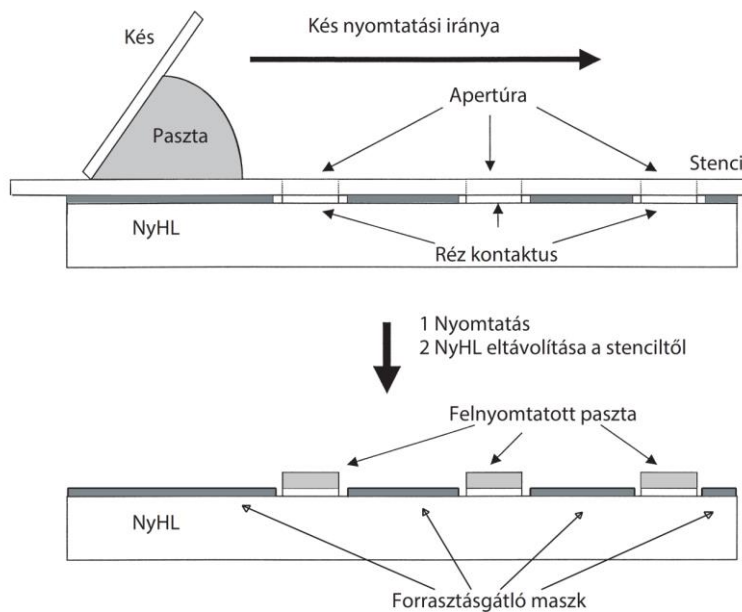
Az újraömllesztéses forrasztási technológia egyik fontos lépése a forraszpasztát felvitele megfelelő mennyiségben és minőségben az NyHL-re. Ennek legelterjedtebb módja a stencilnyomtatás.

A stencilnyomtatásnál a forraszpasztát egy stencil fólia segítségével, az azon kialakított apertúrákon keresztül viszik fel az NyHL-re. A stencilfólia általában ötvözött fémből készül [3], vastagsága átlagosan 75–200 μm [2]. A stencilfólián a megtervezett NyHL kontaktus felületeinek megfelelően alakítják ki az ablakokat, vagyis az apertúrákat. Az apertúrákat a stencilfóliába általában kémiai maratással, galvanoplasztikával vagy lézerrel alakítják ki [3,4].

A stencilnyomtatás folyamata a következő:

1. Pozícionálják a hordozót a stencilmaszkhoz.
2. A nyomtatókés végiggörgeti a forraszpasztát a stencil teljes felületén, kitöltve az apertúrákat.
3. Végül eltávolítják a felnyomtatott hordozót [2].

A stencilnyomtatás elvi rajza az 1. ábrán látható.



1. ábra. Stencilnyomtatás elvi rajza

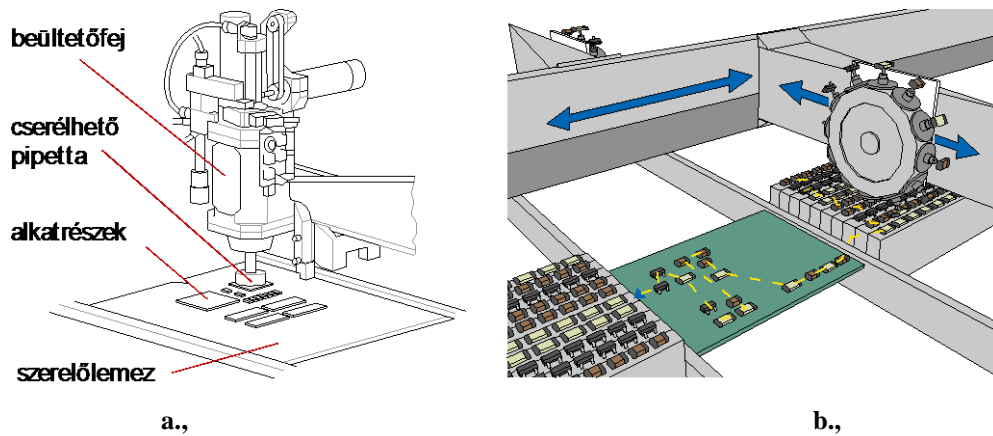
2.2. Beültetés

A forraszpaszta felvitele után az alkatrészeket automata beültetőgépek segítségével ültetik be. Ezen beültetőgépek az alkatrészeket vákuumpipetták segítségével ültetik. Ez azt jelenti, hogy az alkatrészeket a tokozásuknak (alakjuknak és fizikai méretüknek) megfelelő méretű, vákuummal működő pipetta fej emeli fel és helyezi a megfelelő pozícióba [2,4]. Az alkatrészek pozícióját a pipettán, a felvétel után, lézer és kamerák segítségével ellenőrzik és korrigálják, a beültetési koordinátákat pedig a topológiai terv alapján egy program tárolja [4].

A manapság széleskörűen alkalmazott két beültetőgép típus a „felvesz és elhelyez” típusú (*pick & place*), illetve az „összegyűjt és elhelyez” (*collect & place*) típusú [2,4]. A *pick & place* típusú beültetőgép, nevéből adódóan, egy időben egy alkatrészt tud felvenni és elhelyezni a hordozón. Ennek oka, hogy jellemzően egy pipetta fejjel rendelkeznek. Ez a beültetésmód viszonylag lassú, ~14.000 alkatrész/óra, de nagyon pontos. Így ez a beültetőgép tökéletesen alkalmas kis szériás, prototípus gyártásra, továbbá nagy beültetési pontosságot

igénylő tokozott integrált áramkörök beültetésére. A collect & place típusú beültetőgép, nevéből adódóan, összegyűjti és elhelyezi az alkatrészeket. Így egyidőben (egymás után) egyszerre több alkatrészt is el tud helyezni a hordozón. Az összegyűjthető alkatrészek mennyisége típusfüggő. Ez a beültetési mód habár gyorsabb, mint a „pick & place” típusú, ~40.000 – 90.000 alkatrész/óra, de annál pontatlanabb is [2].

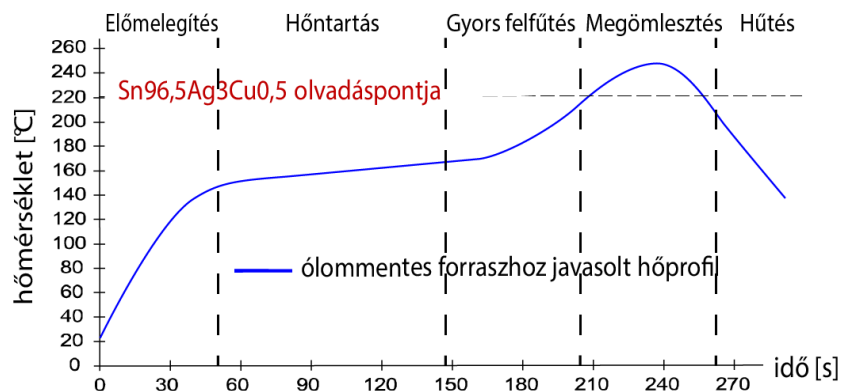
A fent említett két beültetőgép típus elvi rajza a 2. ábrán látható.



2. ábra. Beültetőgépek: a., felvesz és elhelyez; b., összegyűjt és elhelyez [2]

2.3. Forrasztás

A forraszpaszta megömlesztéséhez szükséges hőt több különböző hőközlési módszerrel is el lehet érni. Ilyen például az infrasugaras-, kényszerkonvekciós- (ezek kombinációit is gyakran alkalmazzák az iparban) vagy a gőzfázisú kemence [2]. A kemence hőmérsékletét az idő függvényében az úgynevezett hőprofil segítségével jellemzik. A hőprofil elkészítésekor figyelembe kell venni az alkalmazott forraszpaszta ötvözetét és az alkatrészek hőtűrését. A felületszerelési technológiában alkalmazott alkatrészeknek IPC szabvány szerint ki kell bírni a 250 °C-ot [2]. A hőprofil megfelelő beállításához a teljes forrasztási folyamat alatt a szerelőlemez több pontján is mérni kell annak hőmérsékletét.



3. ábra. Újraömlesztéses forrasztás hőprofil [2]

A forrasztási hőprofil szakaszai: előmelegítési szakasz; hőntartási szakasz (hőntartós hőprofil esetén); gyors felfűtési szakasz; megömlesztési szakasz és lehűtési szakasz [2]. Egy ilyen, hőntartós hőprofil látható a 3. ábrán.

3. Forraszpaszták reológiája

3.1 A forraszpaszta

A forraszpasztákat a gyártók alkalmazási területtől függően különböző viszkozitással készítik. A viszkozitásuk 80–220 Pa·s (mely egy szabványos nyírási rátán érvényes) 25 °C-on, attól függően, hogy tús adagolással (*diszpenzálás*) vagy stencil nyomtatással kerül majd felvitelre. A modern folyasztószerke környezetvédelmi okok miatt illékony szerves vegyületet (*VOC – Volatile Organic Compound*) nem tartalmaznak. Ezen felül halogénmentesek és forrasztás után nem kell letisztítani a hordozót („no-clean” paszták). A folyasztószer a forraszpaszták kb. 9...11 tömeg%-át teszik ki. A forraszpaszták egy külön típusát alkotják azok, melyeket N₂ atmoszférában lehet megömlesztetni [4].

A forraszpasztákat a bennük lévő forraszfém szemcsemérete alapján a IPC J-STD-006 szabvány szerint osztályozzák, mely az 1. táblázatban látható [5].

1. táblázat. Forraszpaszta típusok

Fémpor típusa	<0,005 %* nagyobb, mint	<1 %* nagyobb, mint	80 %* értékek között	90%* értékek között	<10%* kisebb, mint
Type 1	180 μm	150 μm	150-75 μm		20 μm
Type 2	90 μm	75 μm	75-53 μm		20 μm
Type 3	53 μm	45 μm	45-25 μm		20 μm
Type 4	45 μm	38 μm		38-20 μm	20 μm
Type 5	32 μm	25 μm		25-15 μm	15 μm
Type 6	25 μm	15 μm		15-5 μm	5 μm
Type 7	15 μm	11 μm		11-2 μm	
Type 8	11 μm	10 μm		8-2 μm	

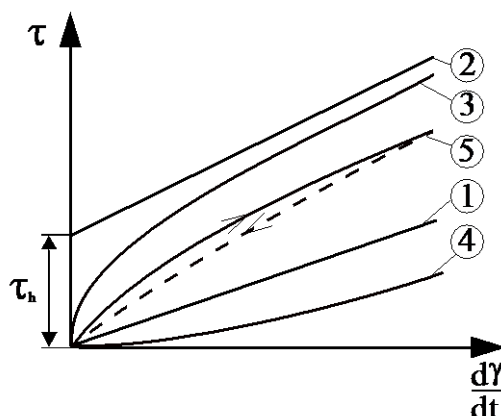
* tömegszázalék

Az osztályozásra a majdani alkalmazás miatt van szükség. Ugyanis a finom raszterosztású (*fine-pitch*) és az extra finom raszterosztású (*ultra-fine-pitch*) alkatrészekhez egyre kisebb átmérőjű forraszszemcséket tartalmazó forraszpaszta alkalmazása szükséges [2].

3.2 Tixotrópia

Mivel a forraszpaszta forraszszemcsék és folyasztószer szuszpenziója, így nem Newtoni folyadék. A folyadékok folyásgörbéjük alapján öt különböző csoportba soroljuk. Az

öt folyásgörbe a 4. ábrán látható, ahol vízszintes tengelyen a nyírési sebesség, míg a függőleges tengelyen a nyírési feszültség van ábrázolva.



4. ábra. Nem Newton-i folyadékok folyásgörbéi [9]

Az 1. görbe a Newtoni folyadékokra jellemző, míg a 2. görbe a plasztikus közegre. A 3., 4. és 5. közeg nem Newtoni folyadékokra jellemző közegek. A 3. és 4. közeg a pszeudoplasztikus illetve dilatáló közeg. Míg az 5. közeg a tixotróp közeg, a forraszpaszta is ilyen típusú nem Newtoni folyadék.

A tixotróp közegek fontos tulajdonsága, hogy a reológiai görbéik átalakulása függ a közeg megelőző deformációjától [6]. Szakirodalom által elfogadott definíció, hogy adott τ nyírési feszültség mellett fokozatosan csökkenő viszkozitás, majd ezen feszültség megszűnésével ($\tau = 0$ Pa) fokozatos szerkezeti visszaépülés következik be [7]. Ez azt is jelenti, hogy növekvő nyírési sebesség mellett csökken a közeg viszkozitása, míg csökkenő nyírési sebesség esetén, a szerkezeti visszaépülés következtében megnő a viszkozitása.

3.3 Szuszpenziók viszkozitása

Mivel a szuszpenziók kettő vagy több különböző fázisú anyag vegyületei, így viszkozitásuk tárgyalása az egyes összetevők ismereténél kezdődik. A továbbiakban tekintsünk kétkomponensű szuszpenziókat, amilyen a forraszpaszta is.

A szuszpenziók viszkozitásának meghatározásához több ismert paraméter is szükséges. Ismernünk kell az oldószer vagy diszperzáló közeg viszkozitását, az ebben lévő részecskék vagy diszperz részecskék méreteit és anyagát, illetve e kettő térfogattörtjét. Ezen adatok ismeretében a következő összefüggés segítségével (1) meghatározható a szuszpenzió viszkozitása.

$$\eta = \eta_0 \left(1 + \frac{5}{2} \varphi + O(\varphi^2) \right), \quad (1)$$

ahol η_0 az oldószer viszkozitása, φ a térfogattört és $O(x)$ a (nagy) ordó matematikai operátor. Az 5/2 – es arányszám az úgynevezett határviszkozitás – $[\eta]$ – nem deformálható szemcsék esetén. Ez az összefüggés abban az esetben igaz, ha a szuszpenzió térfogat törtje olyan kicsi, hogy az egyes szemcsék nem hatnak egymásra [8,9], továbbá a szemcsék fizikai méretei megegyeznek.

Abban az esetben, ha a diszpergáló közegben található részecskék fizikai méretei nem egyeznek meg, mint például a forraszpaszta esetén, akkor a szuszpenzió viszkozitásának meghatározására a következő képletet lehet alkalmazni [10,11].

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^{-[\eta]\varphi_m}, \quad (2)$$

ahol φ_m a maximális térfogattört. A φ/φ_m arány az úgynevezett kizárt térfogat, mely azt mondja meg, hogy az oldószerben lévő részecskék érintkezése által mekkora az azok által kizárt térfogat, melybe már más részecske nem fér be. A fenti összefüggés azt feltételezi, hogy a kezdetben tiszta oldószerbe beleszórunk valamennyi szemcsét. Majd a továbbiakban ezt tekintjük a kiindulási állapotnak, vagyis az oldószernek. Majd ebbe is szórunk más átmérőjű szemcséket és így tovább [10].

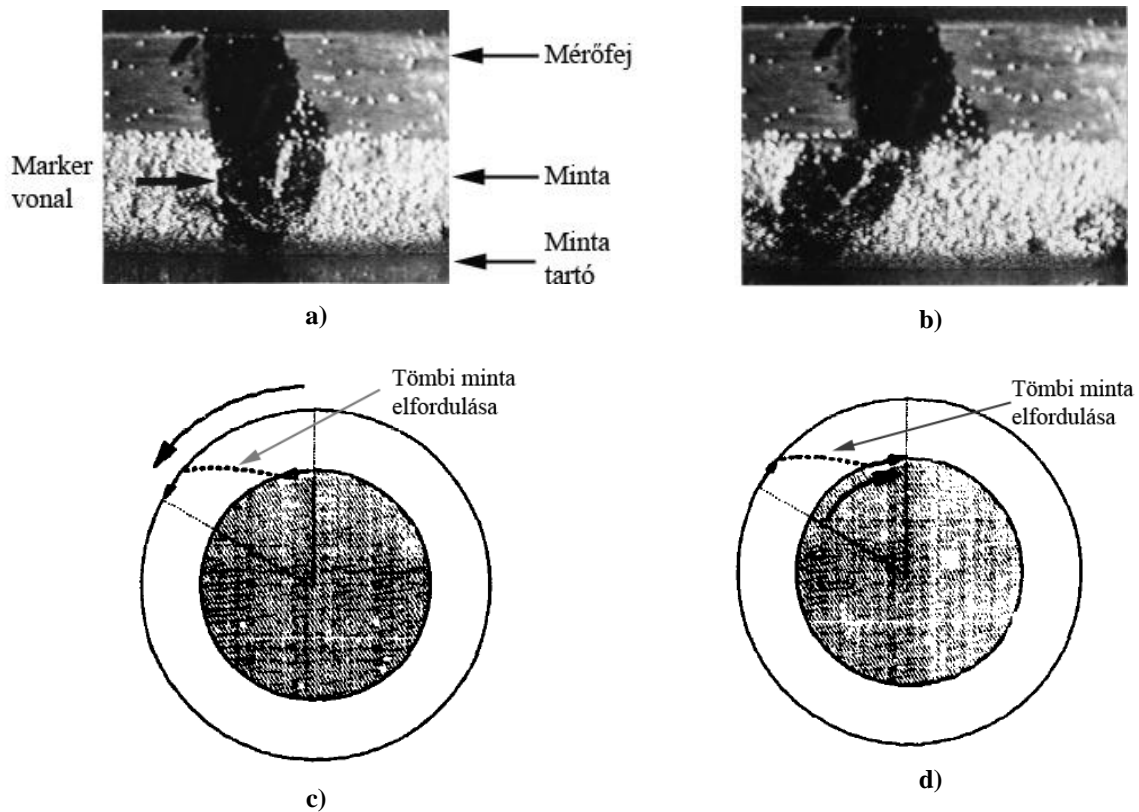
3.4. Falmegcsúszási jelenség

A falmegcsúszási jelenség (vagy helyesebben fal kimerülési jelenség) kettő illetve több fázisú szuszpenziók esetén fordul elő, viszkoziméterek vagy reométerek alkalmazásánál. Ilyenkor a diszperz fázis eltávolodik a szilárd fázistól, mely a mérőeszköz esetében a mérőfej, így létrehozva egy vékony kiürített réteget a mintában, mely viszkozitása alacsonyabb, mint a tömbi mintáé. Tehát ez a jelenség mérési hibát okoz a viszkozitás meghatározásában. Ez a jelenség a hidrodinamikai, viszkoelasztikus, kémiai és gravitációs erők jelenlétéből származik, melyek a diszperz fázis részecskéire hatnak, közvetlenül a szilárd fázis mellett. A kialakult réteg mintegy kenőanyagként funkcionál a mérőfej és a minta között, így az lényegében megcsúszik. A kiürített réteg nagyon keskeny, vastagsága 0,1 – 10 μm , mely 100-szor vagy akár 1000-szer vékonyabb, mint mérési módszer geometriájából származó réstávolság [12].

A falmegcsúszási jelenség párhuzamos lap illetve koncentrikus henger reométerek esetén az 5. ábrán figyelhető meg.

Az 5. ábra a) illetve b) képén megfigyelhető, hogy a kialakult kiürített réteg miatt a mérés megkezdése után a mintán lévő marker vonal és a mérőfejen lévő elmozdult egymástól.

Ez azt jelenti, hogy a mérőfej elfordult a mintán, így a minta egészét nem „mozgatta meg” [13]. Míg a c) illetve d) képeken a koncentrikus henger reométer esetén figyelhető meg a falmegcsúszás jelensége. Itt a minta a két marker vonal közötti távolság csak egy részén fordul el, ami szintén a kiürített réteg jelenlétét mutatja [12].



5. ábra. Falmegcsúszási effektus megjelenése mérés közben:

- a) párhuzamos lap elrendezés, mérés előtt; b) 10 másodperccel a mérés megkezdése után ($\dot{\gamma} = 0,05 \text{ s}^{-1}$); [13]
 c) koncentrikus henger reométer, külső forgó hengerrel; d) belső forgó hengerrel [12]

4. Forraszpaszták viszkozitásának eddigi mérései

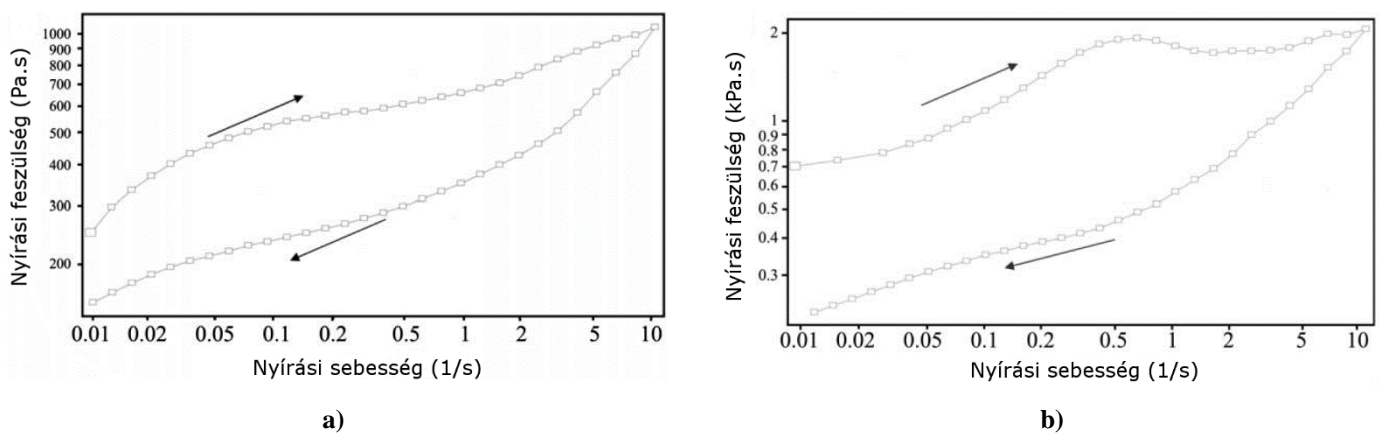
A forraszpaszták reológiai tulajdonságainak méréseire, vizsgálataira azért fektetnek nagy hangsúlyt, hogy a stencilnyomtatást optimalizálják, illetve hogy kellő mennyiségű anyagparamétert biztosítsanak a nyomtatási folyamat numerikus modellezéséhez.

Annak érdekében, hogy a stencilnyomtatási folyamatot megfelelő pontossággal tudják modellezni, a forraszpasztát különböző összeállítású és metódusú méréseknek vetik alá. Elsőként ezen eredményeket felhasználva numerikusan modellezik a forraszpaszták reológiai tulajdonságait, s következő lépésben azok segítségével a nyomtatást és annak minőségét modellezik.

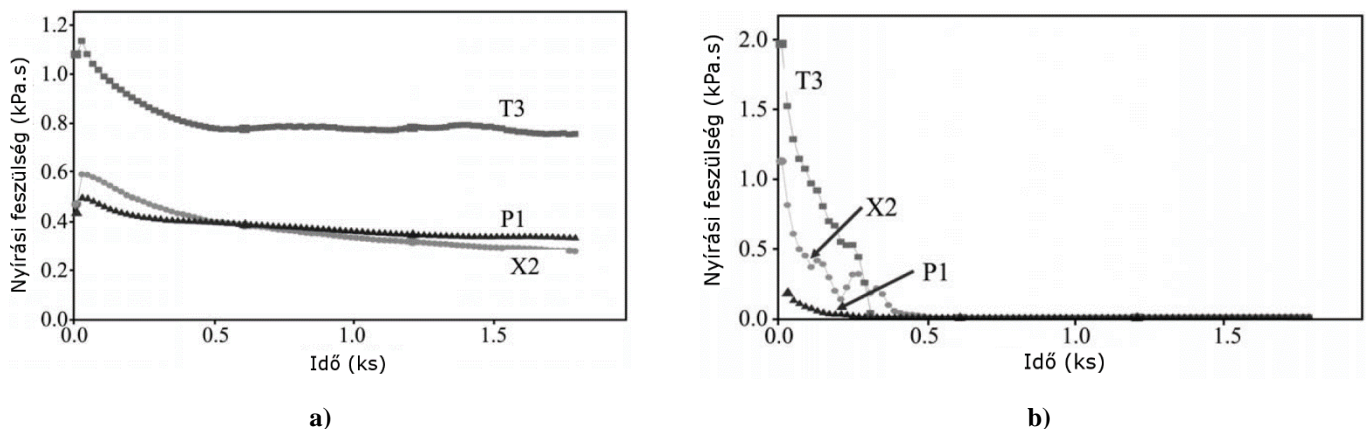
4.1. A forraszpaszta tixotróp tulajdonságainak vizsgálata

R. Durairaj és társai azt vizsgálták, hogy milyen különbséget mutatnak a különböző típusú (forraszfém szemcseátmérőjű) forraszpaszták a reológiai tesztek hatására [14].

Két különböző típusú forraszpasztát vetettek alá hiszterézis (*hysteresis loop test*) illetve nyírási feszültség (*shear stress test*) tesztnek. Az egyik típusú szemcseátmérője 5 – 15 μm , míg a másik típusúé 5 – 10 μm . A hiszterézis görbét két lépésben vették fel. Egyik lépésnél a nyírási feszültség intervallum értéke $0,01 - 10 \text{ s}^{-1}$, míg a másodok lépésnél $10 - 0,01 \text{ s}^{-1}$ (dekádonként 10 mérési ponttal). A nyírási feszültség vizsgálatnál az idő függvényében figyelték meg, hogy a két különböző nyírási sebességre a két forraszpaszta milyen tulajdonságokat mutat.



6. ábra. Nyírási feszültség a nyírási sebesség függvényében: a) Type 5 forraszpaszta; b) Type 6 forraszpaszta

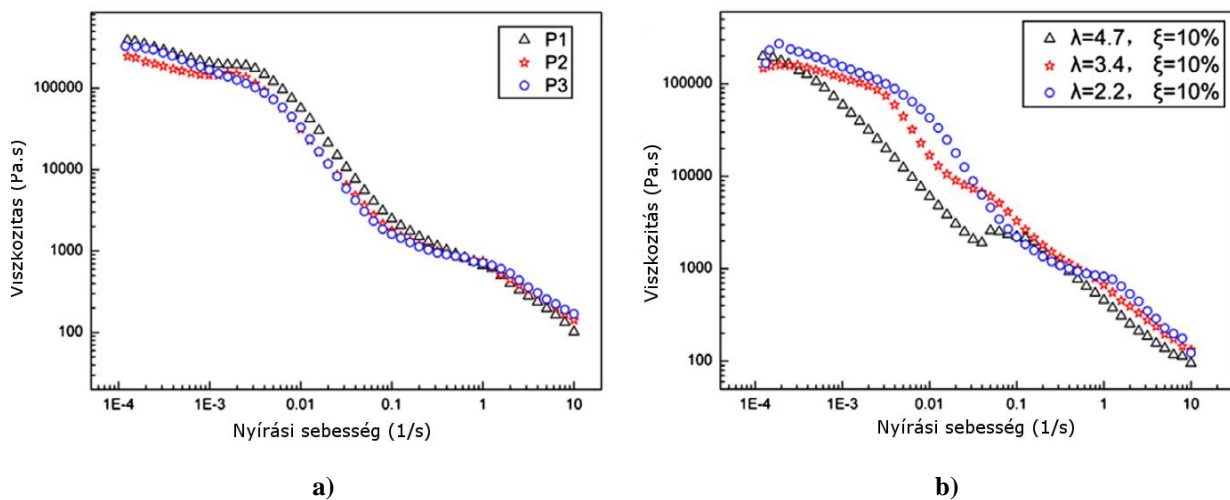


7. ábra. Nyírási feszültség az idő függvényében: a) nyírási sebesség $0,1 \text{ s}^{-1}$; b) nyírási sebesség 10 s^{-1}

A 6. ábrán a hiszterézis görbe által bezárt terület a deformáció mértékét adja meg a nyírási függvényében. Ennek mértéke a Type 6 (T3) forraszpasztánál nagyobb, mint Type 5 (X2) esetén. Míg az 7. ábra azt mutatja, hogy a Type 6 forraszpasztában hozzávetőleg kétszer akkora nyírási feszültség ébred mindkét nyírási sebesség esetén.

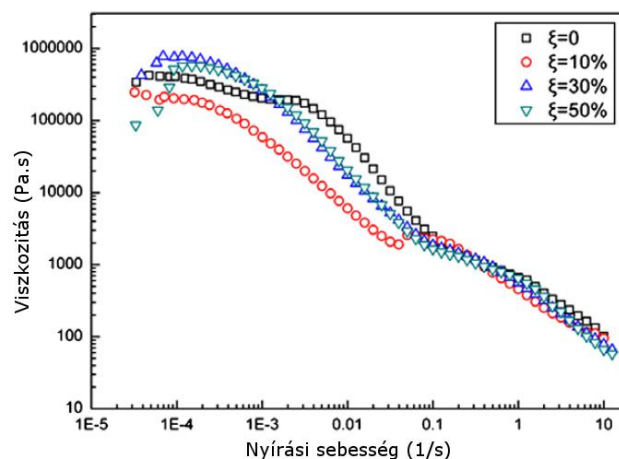
S. S. Zhang és társai azt vizsgálták kísérletükben, hogy az eredeti reológiai tulajdonságoktól milyen eltéréseket mutatnak a különböző típusú forraszpaszták, ha kisebb szemcseátmérőjű forraszpasztával keverik őket össze. Az így kapott forraszpaszták arányát tömeg%-ban adták meg [15].

A vizsgált négy forraszpaszta átlagos szemcseátmérője: 38,5 μm ; 28 μm ; 17,8 μm és 8,14 μm . Az utóbbit keverték $\xi = 0\%$; 10%; 30% és 50%-os tömegszázalék arányban a másik három forraszpasztába. A λ a szemcseátmérők arányát adja meg, mely rendre 4,7; 3,4 és 2,2. A nyírási sebesség tartománya: 10^{-4} s^{-1} -től 10 s^{-1} -ig növelték, dekadonként 10 mérési ponttal.



8. ábra. Viszkózitásgörbék: a) eredeti összetétel mellett; b) $\xi=10\%$ összetétel mellett

A viszkózitásban alacsony nyírási sebesség és a $\lambda=4,7$ -es arányszám és $\xi=10\%$ mellett jelentkezett jelentősebb eltérés. Ennek részletesebb vizsgálata a következő ábrán látható.

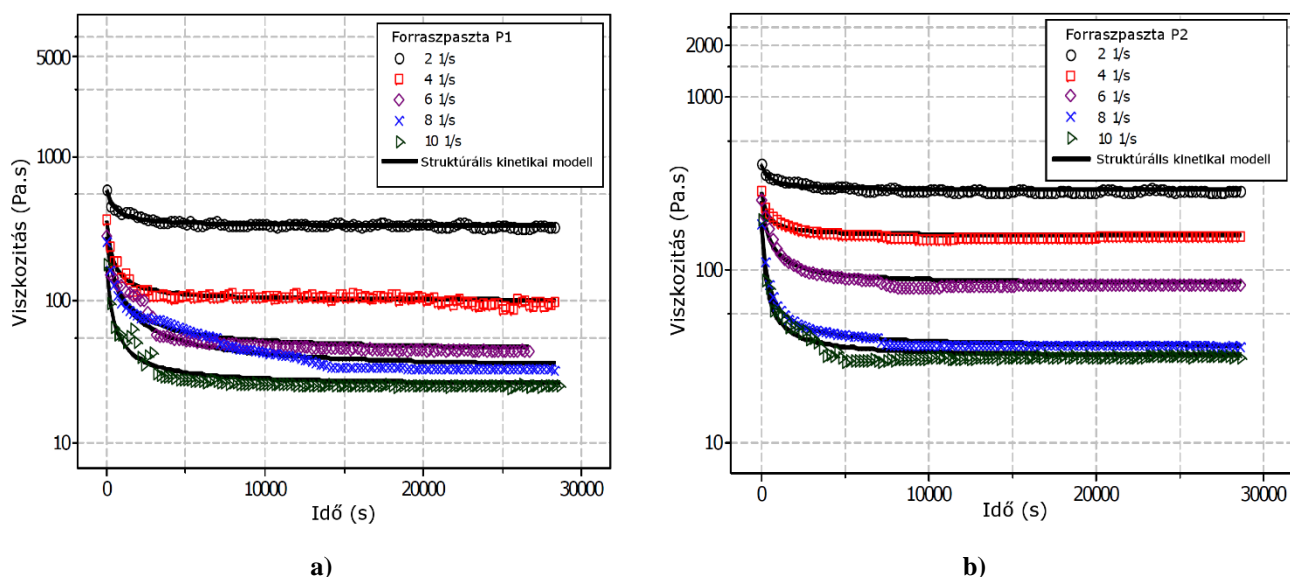


9. ábra. $\lambda=4,7$ -es arányú keverék változó ξ [%] összetétel vizsgálata

Tehát megállapítható, hogy a finomabb szemcseméretű forraszpaszta jelentősebben a nagyobb szemcseméretűeket befolyásolja alacsony nyírási sebességek mellett. Azonban egy bizonyos ξ érték felett már nem lehet jelentős változást tapasztalni.

S. Mallik és társai kísérletükben azt vizsgálták, hogy a különböző típusú (forraszfém szemcseátmérőjű) és különböző folyasztószer rendszerrel rendelkező forraszpaszták viszkozitása milyen időfüggést mutat [16].

Kísérletükben négy különböző forraszpasztát vizsgáltak, két különböző folyasztószer rendszerrel. Mindkét folyasztószer rendszer esetén a két típusú forraszpaszták szemcseátmérője: 20 – 45 μm és 20 – 38 μm . Az időfüggő vizsgálatot 8 órán keresztül végezték el öt különböző konstans nyírási sebesség mellett; melyek a 2 s^{-1} ; 4 s^{-1} ; 6 s^{-1} ; 8 s^{-1} és a 10 s^{-1} . A mérési pontokra az eredmények alapján strukturális kinetikai modellt illesztettek. Ezzel bizonyítva a forraszpaszták időfüggő tulajdonságát. A mérési eredmények a 10. ábrán láthatók, melyen a mérés teljes időtartama látható.



10. ábra. Forraszpaszták viszkozitásának időfüggése: a) P1 forraszpaszták; b) P2 forraszpaszták

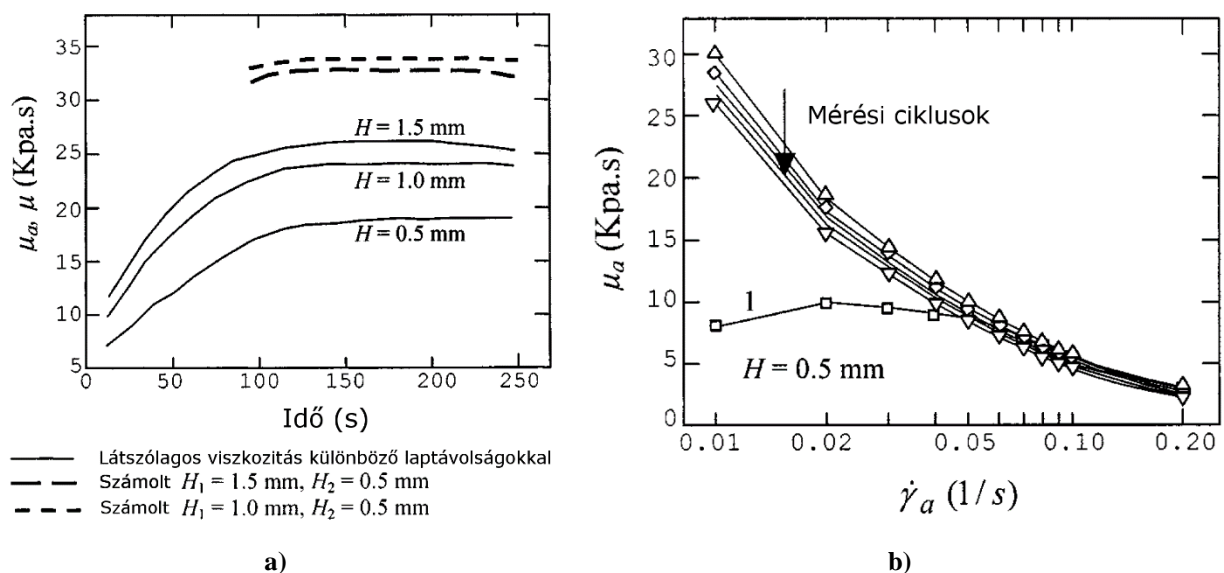
A 10. ábrán látható két forraszpaszták minták folyasztószer rendszere megegyezik. A másik folyasztószer rendszerrel rendelkező forraszpaszták minták viszkozitás menete illetve jellege ezzel megegyező volt, így azt a szerzők nem közölték.

A mérési eredmények alapján a forraszpaszták viszkozitásának időfüggését bizonyították. Továbbá a mérési görbék alapján az is megfigyelhető, hogy a forraszpaszták viszkozitása az első néhány órában változik jelentősen. Illetve, hogy ez a változás a nyírási sebesség növelésével egyre nagyobb. Ezen kívül az eredmények alapján belátható, a forraszpaszták azon időfüggő tulajdonsága, miszerint a forraszpaszták reológiai tulajdonságai az idő múlásával terhelés, használat hatására visszafordíthatatlanul megváltoznak. Ezt bizonyította a szerzők által a mérési eredmények alapján illesztett strukturális kinetikai modell is.

4.2. A falmegcsúszási jelenség vizsgálata

N. N. Ekere és társai egy matematikai modellt állítottak fel, mellyel becsülhető a forraszpaszta különböző mérőfejekkel mért látszólagos viszkozitása. A modell helytállóságát mérésekkel igazolták [17].

A kísérletek során a felhasznált forraszpaszta szemcseátmérője $25 - 45 \mu\text{m}$, átlagos szemcseméret $31 \mu\text{m}$, míg annak szórása $2,5 \mu\text{m}$ volt. A forraszpaszta 89 tömeg%-os illetve térfogattörtje $\varphi = 0,5$. A mérések során használt mérőfej sugara $R = 20 \text{ mm}$. A három lap – lap távolság a mérések során $0,5 \text{ mm}$; 1 mm és $1,5 \text{ mm}$. Két különböző mérést végeztek, az egyik állandó nyírási sebesség mellett az időfüggés, míg a másik változó nyírási sebesség mellett a mérési ciklusok számától való függés. Előbbi mérés esetén a két állandó nyírási sebesség $0,02 \text{ s}^{-1}$ és $0,1 \text{ s}^{-1}$. Míg utóbbi esetén a nyírási sebesség tartománya $0,01 \text{ s}^{-1}$ –től $0,2 \text{ s}^{-1}$ –ig nőtt $0,01 \text{ s}^{-1}$ –es lépésközzel. A mérési eredmények a 11. ábrán láthatók.



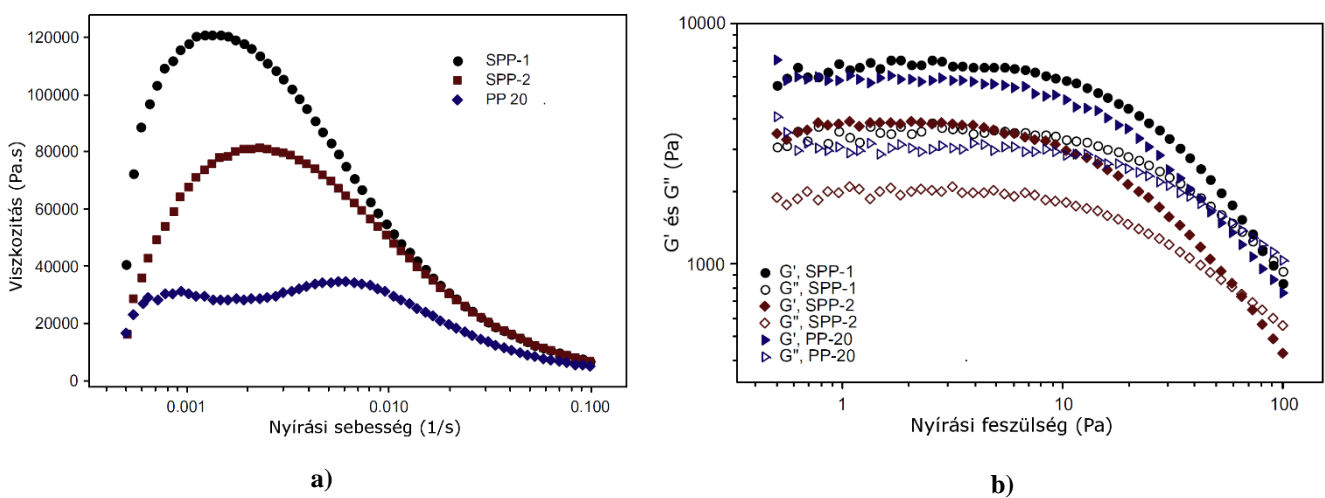
11. ábra. Falmegcsúszási jelenség kiküszöbölése matematikai modell alapján:

a) Különböző laptávolságokkal a valódi viszkozitás kiszámítása; b) Ciklusszám hatása a viszkozításra

A 11. a) ábra alapján látható, hogy a modell segítségével számolt viszkozitás magasabb viszkozitási értéket kaptak, mint a mérések alapján. Ezen kívül megfigyelhető, hogy a $H_1 = 0,5 \text{ mm}$ és $H_2 = 1 \text{ mm}$ mérési eredményekkel számolt valódi viszkozitás $\sim 4-5\%$ -kal magasabb, mint a $H_1 = 0,5 \text{ mm}$ és $H_2 = 1,5 \text{ mm}$ mérési eredményekkel számolt valódi viszkozitás. Ezen kívül megfigyelhető, hogy a viszkozitás a mérés elején növekvő tendenciát mutat. A 11. b) ábrán szintén megfigyelhető, hogy az első mérési ciklusnál a minta viszkozitása alacsonyabb volt, mint a további 5 mérés során.

S. Mallik és társai kísérleteikben azt vizsgálták meg, hogy miként befolyásolja a forraszpaszta viszkozitásának értékét kis nyírási sebességek mellett a mérőfej érdessége [18].

Méréseik során három különböző mérőfejet használtak. A PP20-as sima mérőfej; az SPP-1 érdessége 13,7 μm , míg az SPP-2 érdessége 22,8 μm . A mérésekhez három különböző forraszpasztát használtak, különböző folyasztószer rendszerrel. Ezek szemcseméretei LF1 25–45 μm ; LF2 20–38 μm és LF3 25–45 μm . Két típusú mérést végeztek. Az egyik a viszkozitás a nyírási sebesség függvényében, míg a másik egy oszcillációs mérés. A nyírási sebesség tartománya: 0,0005 s^{-1} –től 0,1 s^{-1} –ig. Míg az oszcillációs mérésnél 1 Hz-en a nyírási feszültség tartománya: 0,5 Pa –tól 500 Pa –ig.



12. ábra. Viszkozitás függése a mérőfej érdességétől (LF1 forraszpaszta):

a) Viszkozitás a nyírási sebesség függvényében; b) Oszcillációs mérés

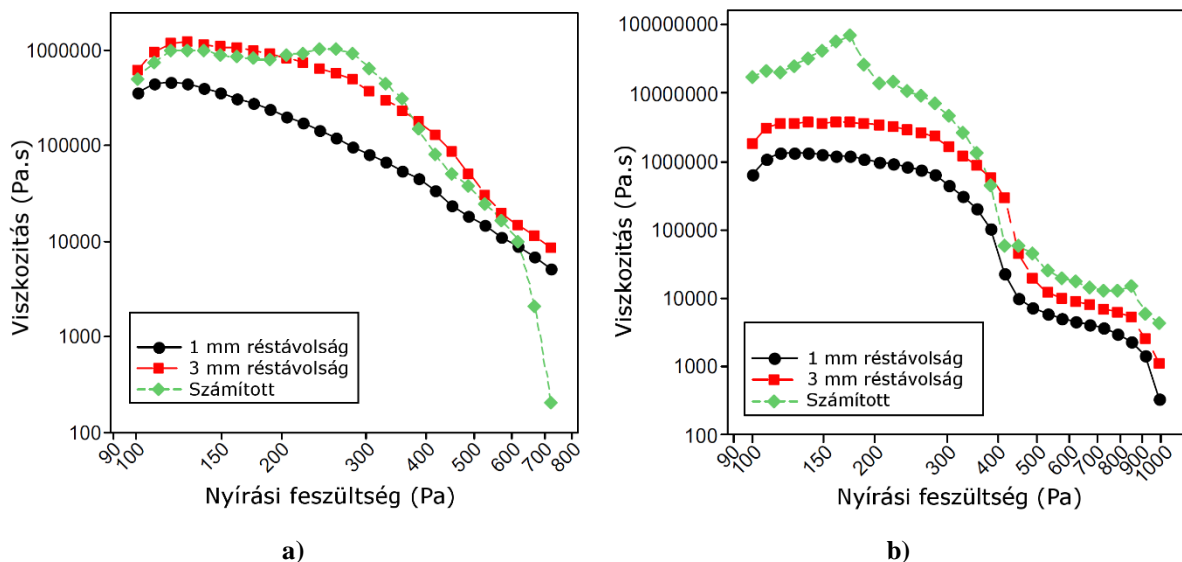
A kísérletek bizonyították, hogy a várttal ellentétben az Ra indexet egy határon túl nem szabad tovább növelni. Ha az Ra nagysága összemérhető a tömbi minta szemcseméretével, akkor a mérőfej érdessége nem meggátolja a kiürített réteg kialakulását, hanem elősegíti. A 12. a) ábrán megfigyelhető az említett jelenség. Habár az SPP-2-es mérőfejjel mért viszkozitás nem annyira kicsi, mint a sima mérőfejjel mért érték, azonban még így is kb. 40 $\text{kPa} \cdot \text{s}$ -mal eltér a valósnak feltételezett értéktől.

A 12. b) ábrán hasonló jelenség figyelhető meg. Tárolási (G') illetve a veszteségi (G'') modulus keresztezési pontja is függ a mérőfej érdességétől. A keresztezési pont PP20 mérőfej esetén 52,5 Pa; SPP-2 mérőfej esetén 65 Pa, míg SPP-1 mérőfej esetén 94,7 Pa.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a mérőfej érdessége nem csak csökkentheti a falmegcsúszási jelenség kialakulását, de elő is segítheti. Így az érdesség megválasztásánál körültekintően kell eljárni.

R. Durairaj és társai cikkükben azt vizsgálták, hogy milyen mértékben tér el két különböző forraszpasztta esetén a falmegcsúszási jelenség mértéke, illetve, hogy ezen eredmények milyen módon korrelálnak a nyomtathatósággal [19].

Méréseik során két különböző típusú forraszpasztával végezték el. Az egyik forraszpasztta (P1) szemcseátmérője 5 – 15 μm , míg a másik forraszpasztta (P2) szemcseátmérője 5 – 8 μm . A mérések során párhuzamos lap elrendezést alkalmaztak, melynél a felső mérőfej érdessége $R_a = 0,00173 \mu\text{m}$. A mérések során két különböző réstávolságot használtak. Az egyik 1 mm, míg a másik 3 mm volt. A viszkozitási görbét a nyírési feszültség függvényében vették fel, melynek tartománya: 1 Pa-tól 1000 Pa-ig. A mért viszkozitásokból matematikai úton meghatározták a vélt valódi viszkozitást. Az eredmények a 13. ábrán láthatók.



13. ábra. Mért és korrigált viszkozitási görbék:

a) P1 forraszpasztta esetén; b) P2 forraszpasztta esetén

Az eredményekből arra következtettek, hogy a P1-es forraszpasztta érzékenyebb a falmegcsúszási jelenségre, mint a P2-es. Nagyobb a megcsúszási sebesség a mérés közben a kiürített réteg miatt.

A nyomtathatósági vizsgálat eredményei jól korreláltak a reológiai mérési eredményekkel. A vizsgálatok során arra jutottak, hogy a P1-es forraszpasztta könnyebben távozik az apertúrából, mint a P2-es forraszpasztta. Ennek oka, hogy a P1-es forraszpasztta nagyobb hajlandóságot mutat arra, hogy kialakuljon a kiürített réteg. Ez a vékony réteg a forraszszemcsék és az apertúra fal között alakul ki, mely elősegíti a forraszpasztta távozását az apertúrából a stencilfólia elválásakor. Tehát, megállapítható, hogy a forraszfém szemcsemérete befolyásolja a forraszpasztta viszkozitását, s ezáltal nyomtatás minőségét is.

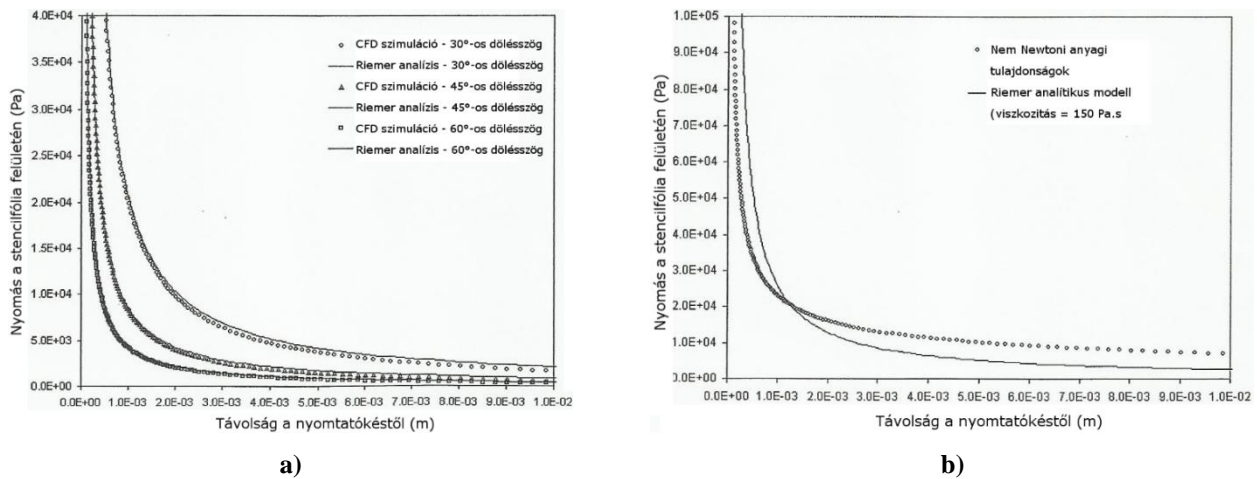
4.3. Numerikus modellezés

G. P. Glinski és társai tanulmányukban a stencilnyomtatás analitikus modellezésének eredményeit hasonlították össze a CFD (Computational Fluid Dynamics) szimulációs eredményeivel Newtoni és nem Newtoni paszták esetén [20].

Tanulmányukban a stencilnyomtatás folyamatának numerikus vizsgálatát végezték el. Megvizsgálták a stencilnyomtatás közben a stencil fólia és a paszta érintkezésénél kialakuló nyomást három különböző nyomtatókés dőlésszögre. Szimulációs vizsgálatot végeztek a nyomtatás közben a pasztában kialakuló sebességtérre és a sebesség vektorok irányaira. Ezen vizsgálatokat elvégezték Newtoni és nem Newtoni tulajdonságú pasztákra is. Analitikus modellezésnél a Riemer összefüggést alkalmazták a számítások elvégzésére. A nem Newtoni folyadékok jellemzésére a Cross modellt (3) használták:

$$\eta_a = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (K\dot{\gamma})^m} \quad (3)$$

ahol η_a a látszólagos viszkozitás, $\dot{\gamma}$ a nyírási sebesség, η_0 nulla nyírási sebességnél mutatott viszkozitás, η_∞ végtelen nyírási sebességnél mutatott viszkozitás, K idő együttható, és m hatványkitevő. A paszta reológiai jellemzőit korábbi eredmények alapján adták meg. Az analitikus modell illetve a szimuláció eredményeinek összehasonlítása a 14. ábrán látható.



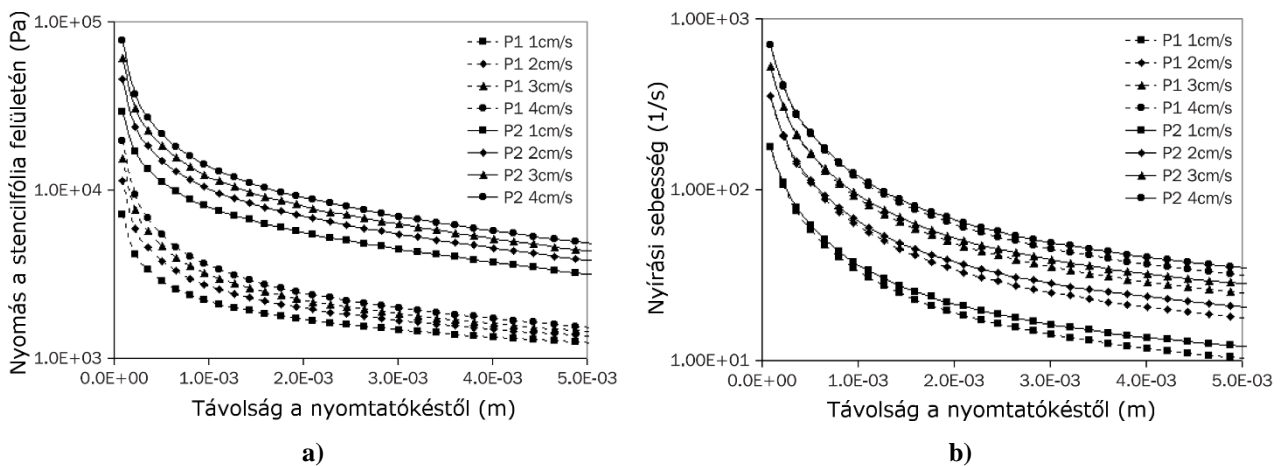
14. ábra. Analitikus modell és szimuláció összehasonlítása:

a) Newtoni paszta; b) nem Newtoni paszta

A 14. a) ábrán megfigyelhető, hogy Newtoni paszta esetén az analitikus modellel kapott eredmények egybevágóak szimulációs eredményekkel. Azonban a b) ábrán megfigyelhető, hogy a nem Newtoni paszta esetén az előbbi nem igaz. Az analitikus eredmény szignifikánsan eltér a szimulációs eredménytől. Tehát nem Newtoni pasztákat szimulációval kell vizsgálni ahhoz, hogy megfelelő numerikus eredményeket kapjunk.

R. Durairaj és társai kísérletükben azt vizsgálták, hogy hogyan változik stencilnyomatás közben a stencilfólián kialakuló nyomás különböző nyomtatási sebességek esetén [21].

A mérések során két különböző forraszpasztta reológiai tulajdonságait vizsgálták meg, melyek alapján végezték el a CFD szimulációt. Az egyik forraszpasztta (P1) ólmos (Sn63Pb37), míg a másik (P2) ólommentes (Sn95,5Ag3,8Cu0,7) volt. Mindkét forraszpasztában a forraszfém szemcseátmérő 5–15 μm volt. A mérések során a minta magassága 0,5 mm volt, míg a nyírási sebesség tartománya 0,1–20 s^{-1} . Az eredményekből szintén a Cross modell segítségével határozták meg a szimulációhoz szükséges reológiai paramétereket. A szimuláció eredményei a 15. ábrán láthatók.



15. ábra. Szimulációs eredmények:

a) nyomás a stencilfólia felületén különböző nyomtatási sebességek esetén;

b) nyírási sebesség különböző nyomtatási sebességek esetén

A szimulációs eredmények alapján azt figyelték meg, hogy az ólmos illetve az ólommentes forraszpasztta esetén a stencilen kialakuló nyomásban van szignifikáns eltérés (15. a) ábra). Ólommentes forraszpasztta esetén közel egy nagyságrendi különbség figyelhető meg a kialakuló nyomásban az ólmossal szemben. A kialakuló nyírási sebesség esetén szintén megfigyelhető a különbség, azonban nem annyira jelentős, mint a nyomás esetén (15. b) ábra).

A két forraszpasztta tömegszázaléka illetve szemcseátmérője megegyezett, de a folyasztószer összetétele nem. Tehát a folyasztószer összetétele jelentősen képes befolyásolni a forraszpasztta reológiai tulajdonságait.

4.4. Irodalmi összefoglaló

A szakirodalmi cikkek mérési folyamataiban és eredményeiben azt a közös pontot találtam, hogy mindegyik mérésnél a felhasznált forraszpasztta minta friss volt, illetve a friss minták méréséből kapott eredményekre illesztették a numerikus modelleket. Ezen eredmények alapján következtettek például a stencilnyomtatási közben lejátszódó tulajdonságváltozásokra. Ugyanakkor stencilnyomtatás közben az egyes nyomtatási ciklusok között nem cserélik le a forraszpasztát, a forraszpasztta viszkozitása a nyomtatások során folyamatosan csökken, így friss mintával nem lehet teljes körűen vizsgálni a lejátszódó tulajdonságváltozásokat. Ezen változások pedig nagy szerepet játsznak a nyomtatás során az apertúrák kitöltésében illetve az elválasztás utána a pasztalenyomat minőségében.

Ezért tűztem ki célul olyan mérési folyamat kidolgozását, mely a korábbi vizsgálatokhoz képest jobban közelíti a forraszpasztta stencilnyomtatás közben mutatott reológiai tulajdonságait, illetve tixotrópikus viselkedését.

5. Önálló munka

5.1. Vizsgált minták

A méréseimhez három különböző típusú (forraszcsepeztő) ólommentes forraszpasztát használtam, melyek ötvözetek egyaránt SAC305 (96,5Sn/3Ag/0,5Cu). Ezen forraszpasztákban található folyasztószer típusa mindegyiknél azonos, hogy a mérési eredményeket a folyasztószer típusa ne tudja befolyásolni. Mindhárom forraszpasztát KOKI gyártmányú, melyek típusszámát a 2. táblázat foglalja magában.

2. táblázat. Felhasznált forraszpaszták

Megnevezés	Folyasztószer típus	Forraszpaszták típusa	Szemcseátmérő [μm]
S3X48-M500	M500	Type 3	20 – 45
S3X58-M500	M500	Type 4	20 – 38
S3X70-M500	M500	Type 5	10 – 25

5.2. Kísérletterv

5.2.1. Mérési paraméterek

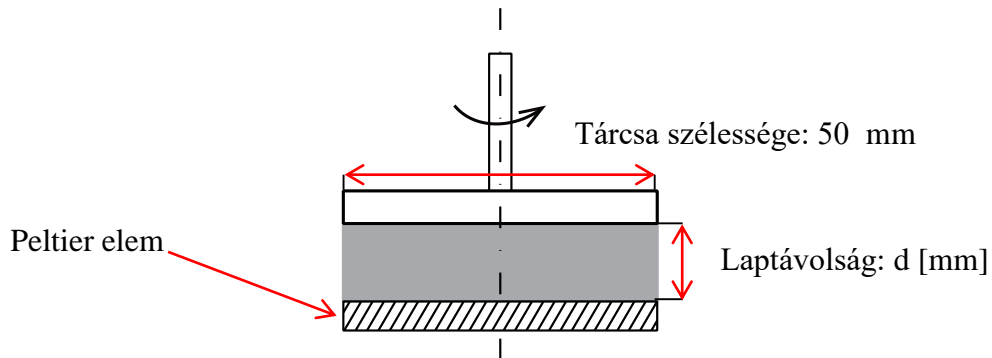
A forraszpaszták reológiai tulajdonságainak vizsgálatát, a Vegyészmérnöki és Biomérnöki kar, Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszékén az Anton Paar Physica MCR 301 típusú rotációs viszkoziméterrel végeztem el.

A viszkoziméter néhány főbb specifikációja, melyek fontosak a méréseim szempontjából:

- Minimális forgatónyomaték: $0,01 \mu\text{N}\cdot\text{m}$ illetve $0,05 \mu\text{N}\cdot\text{m}$, attól függően, hogy rotációs vagy oszcillációs mérést végzünk. Míg a maximális forgatónyomaték: $200 \text{ mN}\cdot\text{m}$. Lépésköz: $0,1 \text{ nN}\cdot\text{m}$
- Szögeltérés tartománya: $0,1 - \infty \mu\text{rad}$. Lépésköz: $0,01 \mu\text{rad}$
- Nyírási sebesség: $10^{-3} - 100 \text{ s}^{-1}$
- Minimális körfrekvencia: $10^{-5} \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$. Maximális körfrekvencia: $628 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$
- Normál erőtartomány: $0,01 - 50 \text{ N}$. Lépésköz: $0,002 \text{ N}$

A minta állandó hőmérsékletét egy, a minta alatt található Peltier elem biztosította. Ezen kívül egy védőburkolatnak köszönhetően a mintát állandó páratartalomban vizsgálhattam, mely szükség esetén lehetőséget ad védőgáz befúvatására is.

A méréseket a következő elrendezésben végeztem el:



16. ábra. Reológiai mérés elrendezés

A méréseimhez a PP50/S 50 mm átmérőjű érdesített mérőfejet használtam. A PP50/S mérőfej Ra indexe 4–7 μm . Ennek a mérőfejnek segítségével ki tudtam küszöbölni a falmegcsúszási jelenség hatásait, s így valós viszkozitási eredményeket tudtam kapni. A minta magasságát, vagyis a laptávolságot irodalmi megfontolások alapján a minta átlagosan legnagyobb szemcse átmérőjének a 10-szeresére választottam. Ez a Type 3 típusú forraszpasztá esetén ~0,5 mm, Type 4 esetén ~0,4 mm, míg Type 5 esetén ~0,3 mm.

A mérések során a minták viszkozitását vizsgáltam a nyírási sebesség függvényében. A mérés célja az volt, hogy megvizsgáljam a minták stacionárius állapotba lépésének idejét, illetve az ott mutatott viszkozitását. Az egymást követő mérések között a mintát különböző ideig pihenni hagytam. Ezzel jól lehet modellezni a stencilnyomtatás során, az egyes nyomtatások között eltelt idő hatását a forraszpasztára.

5.2.2. Mérések menete

A viszkozitási mérések során a nyírási sebességet 10^{-3} s^{-1} –től egészen 100 s^{-1} –ig növeltem. Az egyes mérések között a mintát 15 s, 30 s illetve 60 s időre pihenni hagytam, mely megfelel a szokásos stencilnyomtatások közötti állási időnek. A mérési programot úgy állítottam össze, hogy az közbeavatkozás nélkül, automatikusan végezze el az adott mintán a mérést.

A stacionárius állapotbéli mérés menete a következő volt. A készülék a program alapján a mérési pontokat úgy vette fel, hogy minden dekádon tíz mérési pontot határozott meg. Tehát a $\dot{\gamma}$ mérési tartományt 51, nem egyenlő részre bontotta fel. Az egyes mérési pontok között a mérési időtartamot 1 másodpercre határoztam meg, ekkor a mérés söprésnek (*sweep*) tekinthető, így a mérési pontok közötti átmenet folytonosnak tekinthető. Amikor a viszkoziméter elérte a maximális nyírási sebességet, akkor a mintát pihenni hagytam a fent megadott idő egyikéig. Az idő leteltével a mérés automatikusan újratekintődött. Amikor a minta

már biztosan stacionárius állapotba lépett, akkor elvégeztem egy oszcillációs mérést. A forraszpaszta stacionárius állapotba jutásához átlagosan 5-6 mérési ciklus volt szükséges, azonban a méréseim során minden mintán nyolc mérési ciklust hajtottam végre.

Ezeket a méréseket mind a három mintára és mind a három pihentetési időre háromszor végeztem el, mely ismétlést elegendőnek találtam, mert a kapott mérési eredmények relatív terjedelme kevesebb, mint 5% volt.

5.3. Mérési eredmények kiértékelése

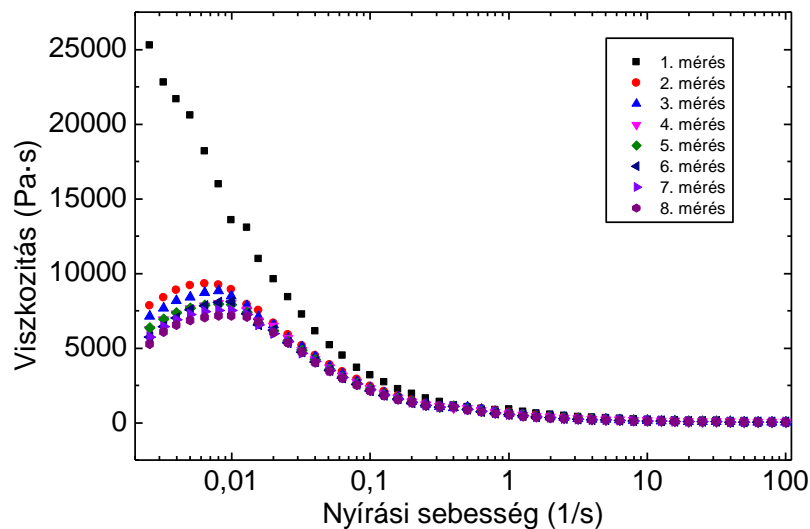
A mérési eredményeket göbeillesztéssel értékeltem ki. A kapott görbékre a Cross-modell (3) alapján matematikai görbét illesztettem. A görbeillesztéssel meg tudtam határozni a forraszpaszta kezdeti (η_0) illetve végtelenben (η_∞) értelmezett viszkozitását. A görbe illesztésének pontosságát hiba% számításával ellenőriztem, melynek értékét minden esetben minimalizáltam. Az így kapott eredmények alapján hasonlítottam össze a forraszpaszta reológiai tulajdonságait.

6. Eredmények

A viszkozitási mérés során kapott összes viszkozitási görbére a Cross modell segítségével görbét illeszttem, melynek paramétereivel jellemeztem a forraszpaszta egyes mérések során mutatott viszkozitási értékeit.

6.1. Type 3 típusú forraszpaszta vizsgálata

A Type 3 forraszpaszta stacionárius mérése 15 másodperces pihentetési idővel a 17. ábrán látható.



17. ábra. A Type 3 forraszpaszta stacionárius mérése 15 másodperces várakozással

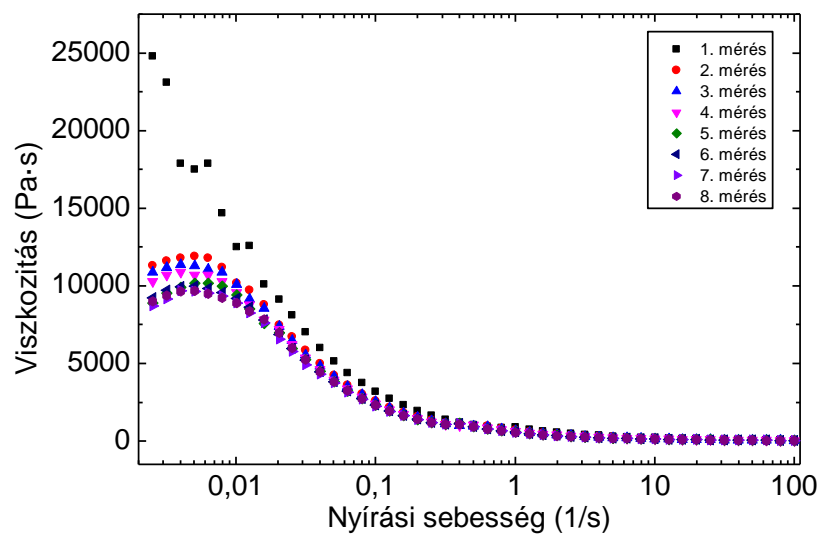
Ahogy az a 17. ábrán is megfigyelhető, a forraszpaszta a 6. mérésnél elért egy stacionárius állapotot, mely után már jelentősen nem változott a viszkozitása. A mérésre illesztett görbe paramétereit a 3. táblázat tartalmazza, ahol az illesztési tartomány: $\dot{\gamma} = [0,1;100] s^{-1}$.

3. táblázat. A Type 3 stacionárius állapot modell paraméterek 15 másodperces pihentetéssel

	η_0 [Pa·s]	η_∞ [Pa·s]	K [s]	m	hiba [%]
1. mérés	47000	30	502,7	0,65	7,2
2. mérés	37000	30	502,7	0,65	4,8
3. mérés	34000	30	502,7	0,65	4,34
4. mérés	32000	30	502,7	0,65	3,93
5. mérés	30000	30	417,6	0,67	5,1
6. mérés	29000	30	382,1	0,68	3,38
7. mérés	29000	30	382,1	0,68	3,89
8. mérés	29000	30	382,1	0,68	3,73

Megfigyelhető, hogy az η_0 viszkozitás stacionárius állapotban az első mérés során kapott értéknek kicsivel több, mint 2/3-ára csökkent le. Az η_∞ a mérések során közel változatlan maradt, mely a görbeillesztés során egy állandó, 30 Pa·s-os értéket eredményezett. Továbbá megfigyelhető, hogy az egyes mérésekre illesztett görbe paraméterei közül a K [382;503] közötti vett fel, ezzel szemben az m értéke csak minimálisan változott. Stacionárius állapotban nem figyelhető meg szignifikáns különbség az egyes hibarátákban azonos görbe paraméterek mellett (6., 7. és 8. mérés).

A Type 3 forraszpaszta stacionárius mérése 30 másodperces pihentetési idővel a 18. ábrán látható.



18. ábra. A Type 3 forraszpaszta stacionárius mérése 30 másodperces várakozással

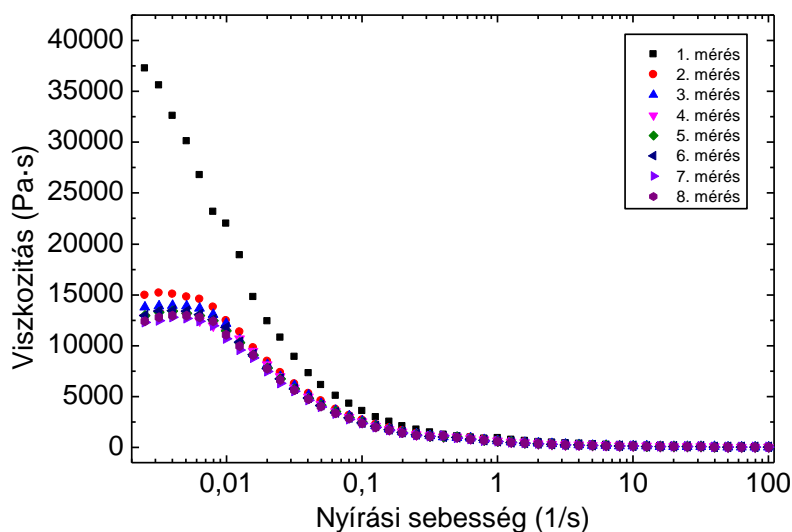
A 18. ábrán megfigyelhető, hogy, a forraszpaszta ennél a pihentetési időnél is a 6. mérésnél elért egy stacionárius állapotot, mely után már jelentősen nem változott a viszkozitása. A mérésre illesztett görbe paramétereit a 4. táblázat tartalmazza, ahol az illesztési tartomány:

$$\dot{\gamma} = [0,1;100] s^{-1}.$$

4. táblázat. A Type 3 stacionárius állapot modell paraméterek 30 másodperces pihentetéssel

	η_0 [Pa·s]	η_∞ [Pa·s]	K [s]	m	hiba [%]
1. mérés	45000	30	489,2	0,65	7,63
2. mérés	37000	30	445,4	0,66	5,2
3. mérés	35000	30	406,7	0,67	4,6
4. mérés	33500	30	406,7	0,67	4,62
5. mérés	31500	30	372,3	0,68	4,7
6. mérés	30500	30	372,3	0,68	4,26
7. mérés	30500	30	341,7	0,69	4,11
8. mérés	30500	30	341,7	0,69	4,36

Megfigyelhető, hogy az η_0 viszkozitás stacionárius állapotban az első mérés során kapott értéknek a 2/3-ára csökkent le, mely érték minimálisan, de magasabb, mint a 15 másodperces pihentetési mérésnél. Az η_∞ a mérések során itt is közel változatlan maradt, mely a görbeillesztés során egy állandó, 30 Pa·s-os értéket eredményezett. Továbbá ennél a mérési sorozatnál is megfigyelhető, hogy az egyes mérési göbökre illesztett görbe paraméterei közül a K [341;490] közötti vett fel, ezzel szemben az m értéke csak minimálisan változott. Stacionárius állapotban itt sem figyelhető meg szignifikáns különbség a hibarátákban azonos modell paraméterek mellett (6., 7. és 8. mérés). A Type 3 forraszpaszta stacionárius mérése 60 másodperces pihentetési idővel a 19. ábrán látható.



19. ábra. A Type 3 forraszpaszta stacionárius mérése 60 másodperces várakozással

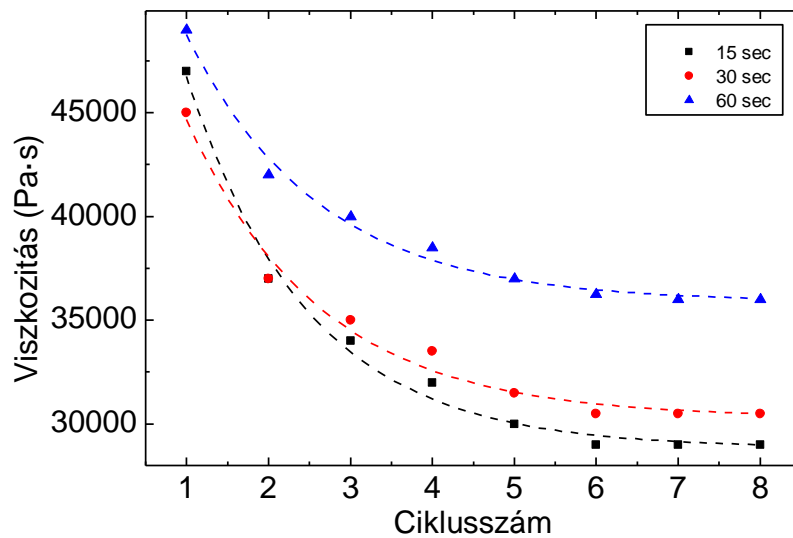
A 19. ábrán megfigyelhető hogy, a forraszpaszta ennél a pihentetési időnél is a 6. mérésnél elért egy stacionárius állapotot, mely után már jelentősen nem változott a viszkozitása. A mérésre illesztett görbe paramétereit az 5. táblázat tartalmazza, ahol az illesztési tartomány: $\dot{\gamma} = [0,1;100] s^{-1}$.

5. táblázat. A Type 3 stacionárius állapot modell paraméterek 60 másodperces pihentetéssel

	η_0 [Pa·s]	η_∞ [Pa·s]	K [s]	m	hiba [%]
1. mérés	49000	30	572,2	0,65	9,3
2. mérés	42000	30	473,4	0,67	6,1
3. mérés	40000	30	432,4	0,68	5,85
4. mérés	38500	30	432,4	0,68	5,84
5. mérés	37000	30	396	0,69	5
6. mérés	36250	30	363,5	0,7	5,48
7. mérés	36250	30	363,5	0,7	5,96
8. mérés	36250	30	363,5	0,7	5,42

Megfigyelhető, hogy az η_0 viszkozitás stacionárius állapotban az első mérés során kapott értéknek közel a 2/3-ára csökkent le, mely már jelentősen magasabb, mint a 15 illetve 30 másodperces pihentetési mérésnél. Az η_∞ a mérések során itt is közel változatlan maradt, mely a görbeillesztés során egy állandó, 30 Pa·s-os értéket eredményezett. Továbbá ennél a mérési sorozatnál is megfigyelhető, hogy az egyes mérési göbökre illesztett görbe paramétereinek közül a K [363;573] közötti vett fel, ezzel szemben az m értéke csak minimálisan változott. Stacionárius állapotban itt sem figyelhető meg szignifikáns különbség a hibatérben azonos modell paraméterek mellett (6., 7. és 8. mérés).

Az 20. ábrán a három különböző pihentetési idő mellett görbeillesztéssel meghatározott η_0 viszkozitás figyelhető meg a ciklusszám függvényében.

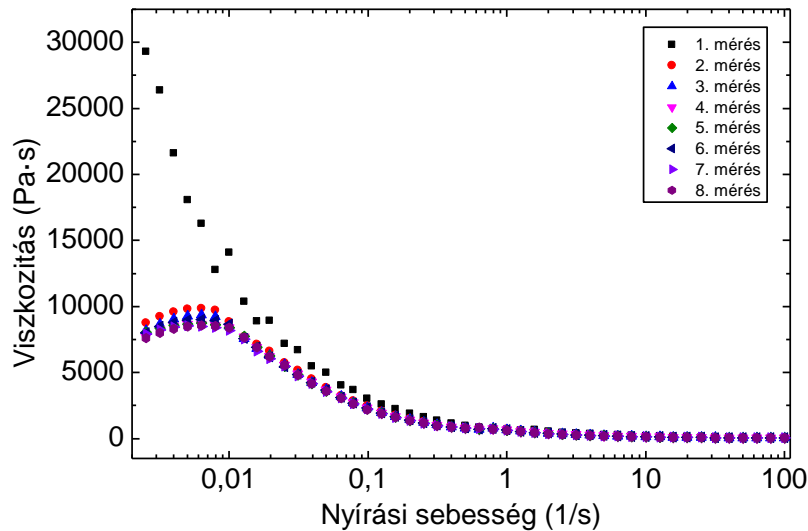


20. ábra. A Type 3 típusú forraszpaszta η_0 viszkozitás különböző pihentetési idők mellett

Mint ahogy a 20. ábrán is megfigyelhető, a hosszabb pihentetési idő stacionárius állapotban magasabb viszkozitás értéket eredményezett.

6.2. Type 4 típusú forraszpaszta vizsgálata

A Type 4 forraszpaszta stacionárius mérése 15 másodperces pihentetési idővel a 21. ábrán látható.



21. ábra. A Type 4 forraszpaszta stacionárius mérése 15 másodperces várakozással

Ahogy a 21. ábrán megfigyelhető a forraszpaszta ennél a pihentetési időnél a 6. mérésnél elért egy stacionárius állapotot, mely után már jelentősen nem változott a viszkozitása. A mérésre illesztett görbe paramétereit a 7. táblázat tartalmazza, ahol az illesztési tartomány:

$$\dot{\gamma} = [0,1;100] s^{-1}.$$

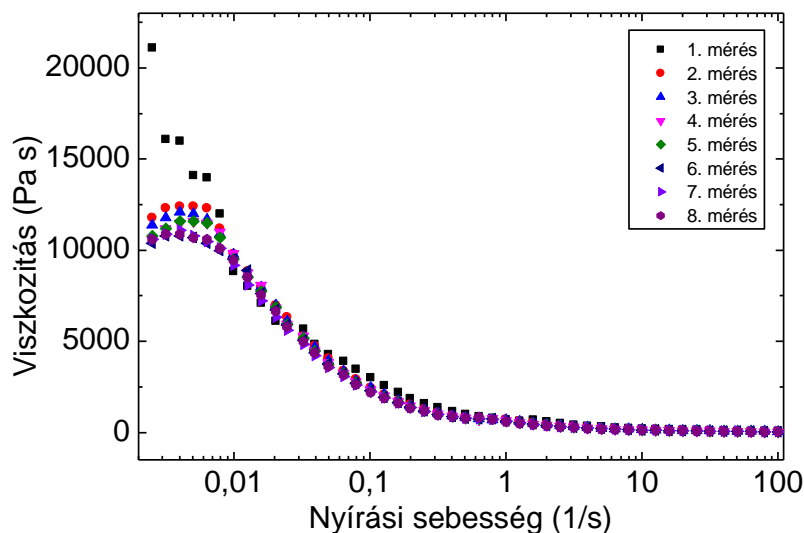
6. táblázat. Type 4 stacionárius állapot modell paraméterek 15 másodperces pihentetéssel

	η_0 [Pa·s]	η_∞ [Pa·s]	K [s]	m	hiba [%]
1. mérés	46500	30	600,3	0,64	6,3
2. mérés	37500	30	664,5	0,63	5,5
3. mérés	36000	30	664,5	0,63	5,24
4. mérés	35000	30	600,3	0,64	4,88
5. mérés	34000	30	544	0,65	5,1
6. mérés	33750	30	544	0,65	5,49
7. mérés	33750	30	544	0,65	4,95
8. mérés	33750	30	494,5	0,66	4,82

Megfigyelhető, hogy az η_0 viszkozitás stacionárius állapotban az első mérés során kapott értéknek közel 2/3-ára csökkent le. Az η_∞ a mérések során közel változatlan maradt, mely a görbeillesztés során egy állandó, 30 Pa·s-os értéket eredményezett. Továbbá megfigyelhető, hogy az egyes mérésekre illesztett görbe paramétereit közül a K [494;601] közötti vett fel, ezzel szemben az m értéke csak minimálisan változott. Ahogy korábban sem, ennél a mérési

sorozatnál és forraszpasztánál sem figyelhető meg szignifikáns különbség a hibarátákban stacionárius állapotban azonos görbe paraméterek mellett (6., 7. és 8. mérés).

A Type 4 forraszpaszta stacionárius mérése 30 másodperces pihentetési idővel a 22. ábrán látható.



22. ábra. A Type 4 forraszpaszta stacionárius mérése 30 másodperces várakozással

A 22. ábrán megfigyelhető hogy, a forraszpaszta ennél a pihentetési időnél is a 6. mérésnél elért egy stacionárius állapotot, mely után már jelentősen nem változott a viszkozitása. A mérésre illesztett görbe paramétereit a 7. táblázat tartalmazza, ahol az illesztési tartomány:

$$\dot{\gamma} = [0,1;100] s^{-1}.$$

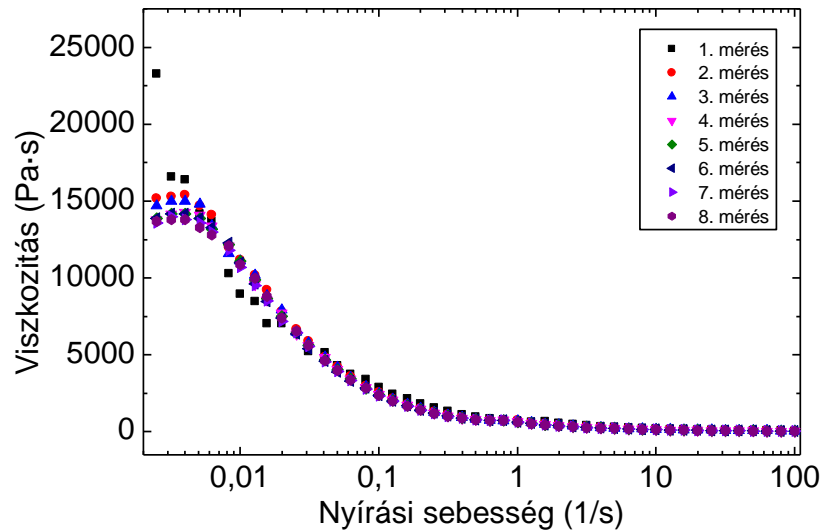
7. táblázat. A Type 4 stacionárius állapot modell paraméterek 30 másodperces pihentetéssel

	η_0 [Pa·s]	η_∞ [Pa·s]	K [s]	m	hiba [%]
1. mérés	44500	30	844,8	0,61	5,9
2. mérés	40000	30	682,1	0,63	6,5
3. mérés	38000	30	616	0,64	5,92
4. mérés	37000	30	558	0,65	5,92
5. mérés	35500	30	507	0,66	5,5
6. mérés	34500	30	507	0,66	5,44
7. mérés	34500	30	462	0,67	5,06
8. mérés	34500	30	422,2	0,68	5,48

Megfigyelhető, hogy az η_0 viszkozitás stacionárius állapotban az első mérés során kapott érték kevesebb, mint a 2/3-ára csökkent le, mely érték minimálisan, de magasabb, mint a 15 másodperces pihentetési mérésnél. Az η_∞ a mérések során itt is közel változatlan maradt, mely a görbeillesztés során egy állandó, 30 Pa·s-os értéket eredményezett. Továbbá ennél a mérési sorozatnál is megfigyelhető, hogy az egyes mérési görbékre illesztett görbe paramétereit

közül a K [422;845] közötti vett fel, ezzel szemben az m értéke csak minimálisan változott. Stacionárius állapotban itt sem figyelhető meg szignifikáns különbség a hibarátákban azonos modell paraméterek mellett (6., 7. és 8. mérés).

A Type 4 forraszpaszta stacionárius mérése 60 másodperces pihentetési idővel a 23. ábrán látható.



23. ábra. A Type 4 forraszpaszta stacionárius mérése 60 másodperces várakozással

A 23. ábrán megfigyelhető hogy, a forraszpaszta ennél pihentetési időnél is a 6. mérésnél elért egy stacionárius állapotot, mely után már jelentősen nem változott a viszkozitása. A mérésre illesztett görbe paramétereit az 8. táblázat tartalmazza, ahol az illesztési tartomány:

$$\dot{\gamma} = [0,1;100] s^{-1}.$$

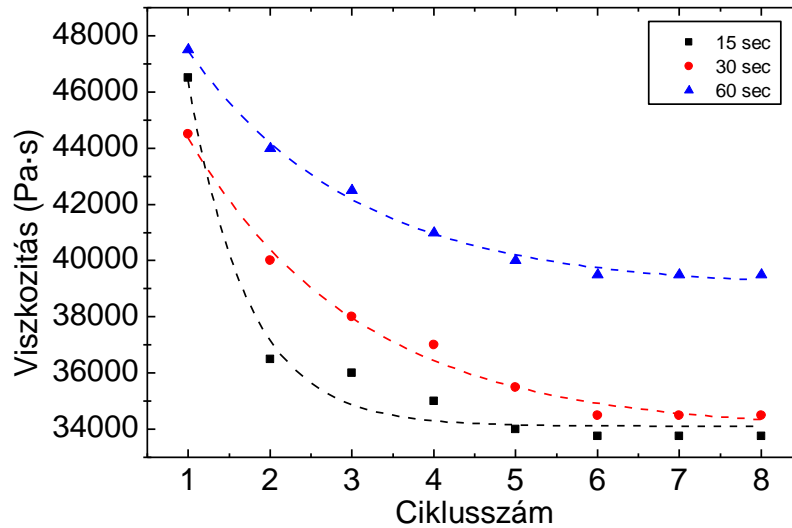
8. táblázat. A Type 4 stacionárius állapot modell paraméterek 60 másodperces pihentetéssel

	η_0 [Pa·s]	η_∞ [Pa·s]	K [s]	m	hiba [%]
1. mérés	47500	30	985,3	0,61	5,2
2. mérés	44000	30	713,3	0,64	7
3. mérés	42500	30	644,7	0,65	6,67
4. mérés	41000	30	584,5	0,66	6,38
5. mérés	40000	30	531,5	0,67	6,3
6. mérés	39500	30	584,5	0,66	6,3
7. mérés	39500	30	467,4	0,684	6,06
8. mérés	39500	30	443,1	0,69	6

Megfigyelhető, hogy az η_0 viszkozitás stacionárius állapotban az első mérés során kapott érték kevesebb, mint 20%-kával csökkent le. Az η_∞ a mérések során itt is közel változatlan maradt, mely a görbeillesztés során egy állandó, 30 Pa·s-os értéket eredményezett. Továbbá ennél a mérési sorozatnál is megfigyelhető, hogy az egyes mérési görbékre illesztett

görbe paramétereit közül a K [443;986] közötti vett fel, ezzel szemben az m értéke csak minimálisan változott. Stacionárius állapotban itt sem figyelhető meg szignifikáns különbség a hibatérakban azonos modell paraméterek mellett (6., 7. és 8. mérés).

Az 24. ábrán a három különböző pihentetési idő mellett görbeillesztéssel meghatározott η_0 viszkozitás figyelhető meg a ciklusszám függvényében.

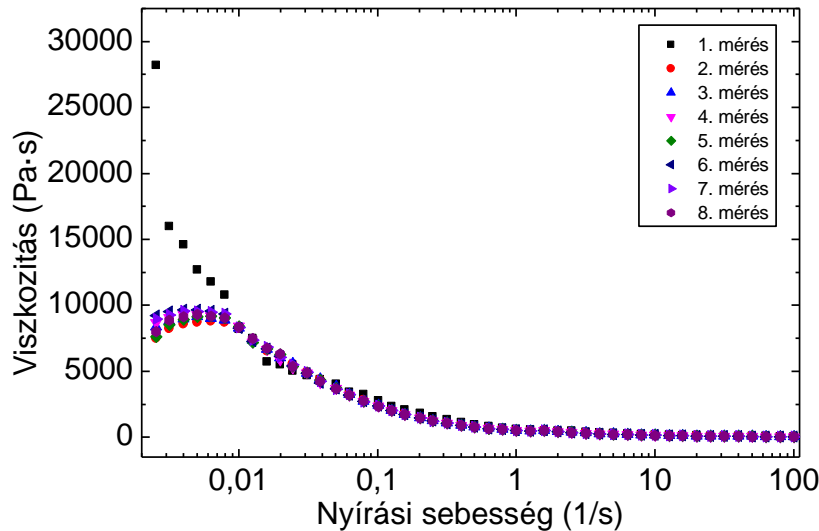


24. ábra. A Type 4 típusú forraszpasztatt η_0 viszkozitás különböző pihentetési idők mellett

Mint ahogy a 24. ábrán is megfigyelhető, a hosszabb pihentetési idő stacionárius állapotban magasabb viszkozitás értéket eredményezett.

6.3. Type 5 típusú forraszpaszta vizsgálata

A Type 5 forraszpaszta stacionárius mérése 15 másodperces pihentetési idővel a 25. ábrán látható.



25. ábra. A Type 5 forraszpaszta stacionárius mérése 15 másodperces várakozással

Ahogy az a 25. ábrán is megfigyelhető, a forraszpaszta a 6. mérésnél elért egy stacionárius állapotot, mely után már jelentősen nem változott a viszkozitása. A mérésre illesztett görbe paramétereit a 9. táblázat tartalmazza, ahol az illesztési tartomány: $\dot{\gamma} = [0,1;100] s^{-1}$.

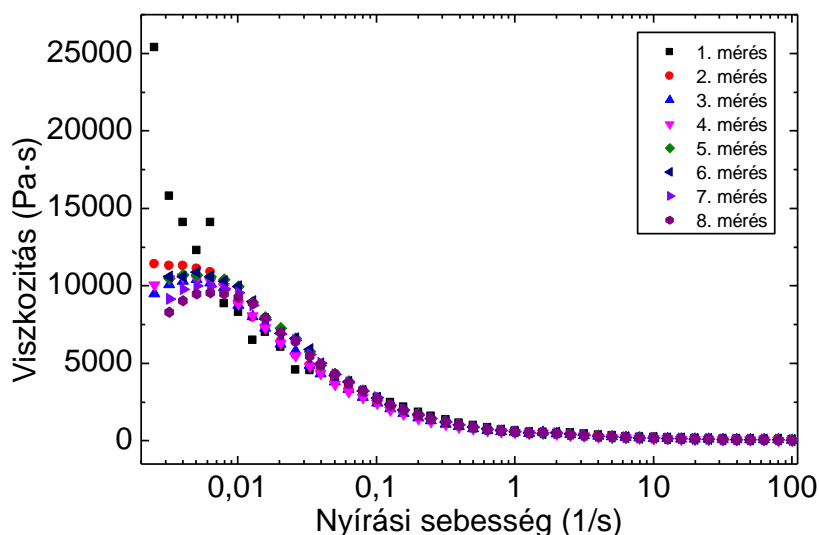
9. táblázat. A Type 5 stacionárius állapot modell paraméterek 15 másodperces pihentetéssel

	η_0 [Pa·s]	η_∞ [Pa·s]	K [s]	m	hiba [%]
1. mérés	47500	30	1217,4	0,6	5,9
2. mérés	44250	30	968,1	0,62	5,6
3. mérés	43000	30	968,1	0,62	5,04
4. mérés	42500	30	968,1	0,62	4,93
5. mérés	42000	30	868	0,63	5,2
6. mérés	41500	30	868	0,63	4,92
7. mérés	41500	30	868	0,63	4,83
8. mérés	41500	30	868	0,63	4,77

Megfigyelhető, hogy az η_0 viszkozitás stacionárius állapotban az első mérés során kapott értéknek 11%-ával csökkent le. Az η_∞ a mérések során közel változatlan maradt, mely a görbeillesztés során egy állandó, 30 Pa·s-os értéket eredményezett. Továbbá megfigyelhető, hogy az egyes mérésekre illesztett görbe paramétereit közül a K [868;1218] közötti vett fel, ezzel szemben az m értéke csak minimálisan változott. Ahogy korábban sem, ennél a mérési

sorozatnál és forraszpasztánál sem figyelhető meg szignifikáns különbség a hibarátákban stacionárius állapotban azonos görbe paraméterek mellett (6., 7. és 8. mérés).

A Type 5 forraszpaszta stacionárius mérése 30 másodperces pihentetési idővel a 26. ábrán látható.



26. ábra. A Type 5 forraszpaszta stacionárius mérése 30 másodperces várakozással

A 26. ábrán megfigyelhető hogy, a forraszpaszta ennél a pihentetési időnél is a 6. mérésnél elért egy stacionárius állapotot, mely után már jelentősen nem változott a viszkozitása. A mérésre illesztett görbe paramétereit a 10. táblázat tartalmazza, ahol az illesztési tartomány:

$$\dot{\gamma} = [0,1;100] s^{-1}.$$

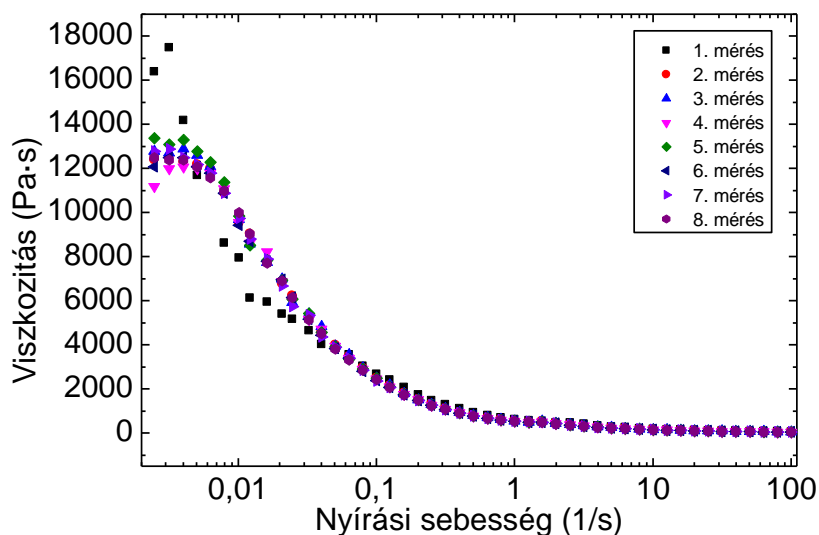
10. táblázat. A Type 5 stacionárius állapot modell paraméterek 30 másodperces pihentetéssel

	η_0 [Pa·s]	η_∞ [Pa·s]	K [s]	m	hiba [%]
1. mérés	49000	30	1439,4	0,59	6,8
2. mérés	47000	30	1012,4	0,62	5,8
3. mérés	45000	30	957,9	0,625	5,54
4. mérés	44000	30	907,1	0,63	5,52
5. mérés	43500	30	815,5	0,64	5,8
6. mérés	42750	30	815,5	0,64	5,46
7. mérés	42750	30	815,5	0,64	5,53
8. mérés	42750	25	815,5	0,64	5,17

Megfigyelhető, hogy az η_0 viszkozitás stacionárius állapotban az első mérés során kapott értéknek 13%-ával csökkent le. Az így elért viszkozitás minimálisan, de magasabb, mint a 15 másodperces pihentetési mérésnél. Az η_∞ a mérések során itt is közel változatlan maradt, mely a görbeillesztés során egy állandó, 30 Pa·s-os értéket eredményezett. Továbbá ennél a mérési sorozatnál is megfigyelhető, hogy az egyes mérési görbékre illesztett görbe paramétereit

közül a K [815;1440] közötti vett fel, ezzel szemben az m értéke csak minimálisan változott. Stacionárius állapotban itt sem figyelhető meg szignifikáns különbség a hibarátákban azonos modell paraméterek mellett (6., 7. és 8. mérés).

A Type 5 forraszpaszta stacionárius mérése 60 másodperces pihentetési idővel a 27. ábrán látható.



27. ábra. A Type 5 forraszpaszta stacionárius mérése 60 másodperces várakozással

A 27. ábrán megfigyelhető hogy, a forraszpaszta ennél a pihentetési időnél is a 6. mérésnél elért egy stacionárius állapotot, mely után már jelentősen nem változott a viszkozitása. A mérésre illesztett görbe paramétereit az 11. táblázat tartalmazza, ahol az illesztési tartomány: $\dot{\gamma} = [0,1;100] s^{-1}$.

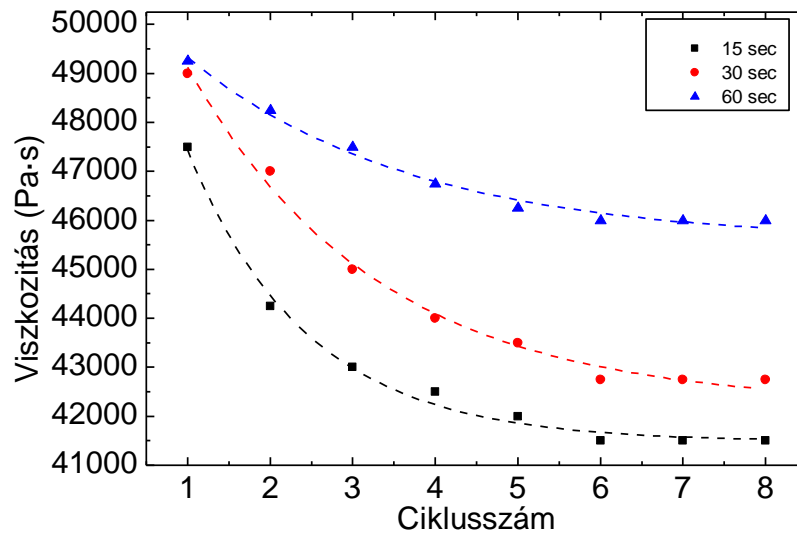
11. táblázat. A Type 5 stacionárius állapot modell paraméterek 60 másodperces pihentetéssel

	η_0 [Pa·s]	η_∞ [Pa·s]	K [s]	m	hiba [%]
1. mérés	49250	30	1393,6	0,6	5,9
2. mérés	48250	30	987,3	0,63	6,2
3. mérés	47500	30	935,1	0,635	6
4. mérés	46750	30	886,4	0,64	5,83
5. mérés	46250	30	841	0,645	5,9
6. mérés	46000	30	798,5	0,65	5,54
7. mérés	46000	30	798,5	0,65	5,57
8. mérés	46000	30	721,6	0,66	5,53

Megfigyelhető, hogy az η_0 viszkozitás stacionárius állapotban az első mérés során kapott érték kevesebb, mint 8%-ával csökkent le. Az η_∞ a mérések során itt is közel változatlan maradt, mely a görbeillesztés során egy állandó, 30 Pa·s-os értéket eredményezett. Továbbá ennél a mérési sorozatnál is megfigyelhető, hogy az egyes mérési göbökre illesztett

görbe paramétereit közül a K [721;1394] közötti vett fel, ezzel szemben az m értéke csak minimálisan változott. Stacionárius állapotban itt sem figyelhető meg szignifikáns különbség a hibatávokban azonos modell paraméterek mellett (6., 7. és 8. mérés).

Az 28. ábrán a három különböző pihentetési idő mellett görbeillesztéssel meghatározott η_0 viszkozitás figyelhető meg a ciklusszám függvényében.

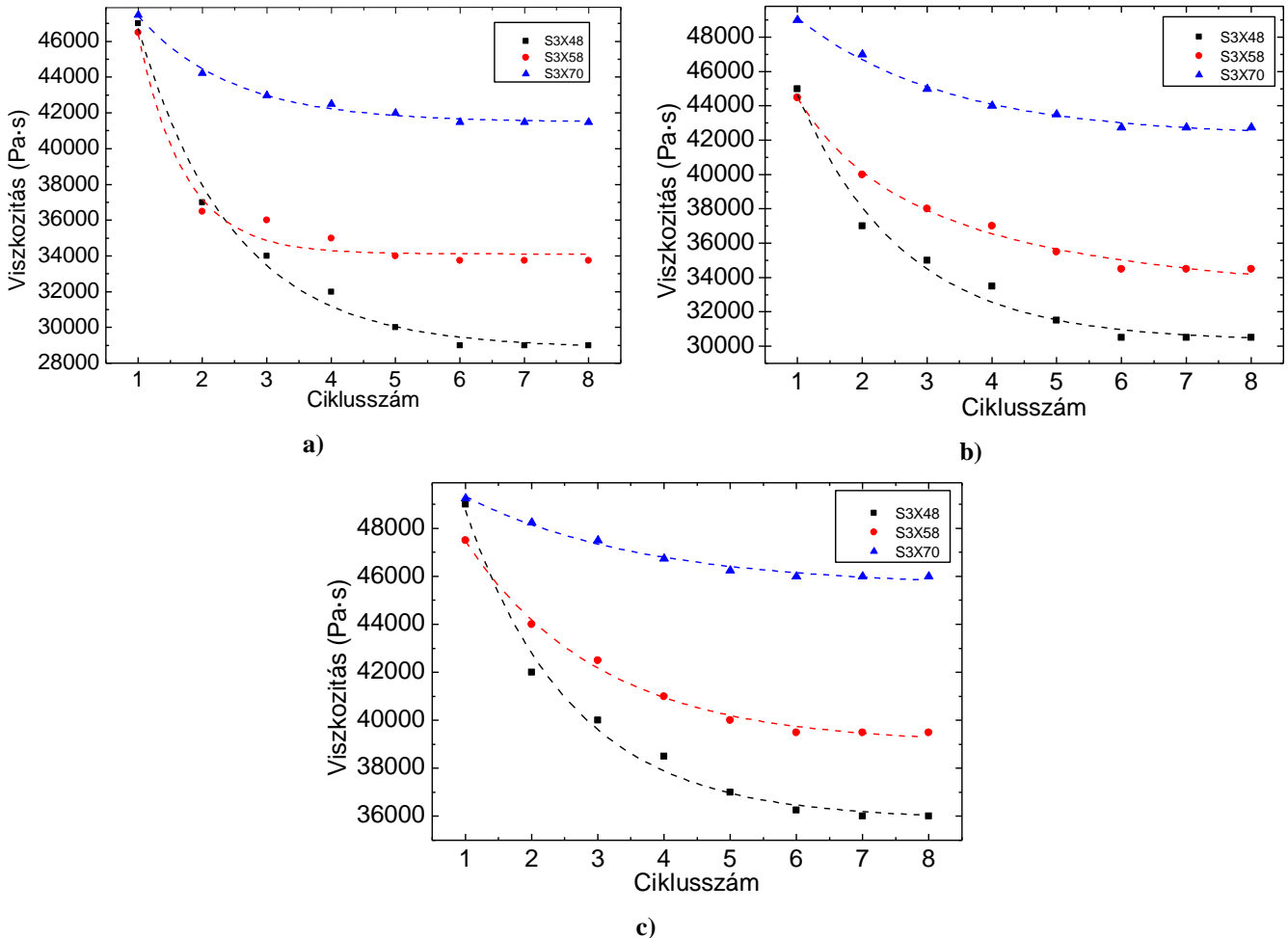


28. ábra. A Type 5 típusú forraszpasztott η_0 viszkozitás különböző pihentetési idők mellett

Mint ahogy a 28. ábrán is megfigyelhető, a hosszabb pihentetési idő stacionárius állapotban magasabb viszkozitás értéket eredményezett.

6.4. Viszkózitások összehasonlítása

A 29. ábrán a három különböző forraszpasztta 15, 30 illetve 60 másodperces állási időnél mért és görbeillesztéssel meghatározott η_0 viszkózitásai látszanak.



29. ábra. Görbeillesztéssel meghatározott η_0 viszkózitások:

a) 15 másodperces pihentetés; b) 30 másodperces pihentetés; c) 60 másodperces pihentetés

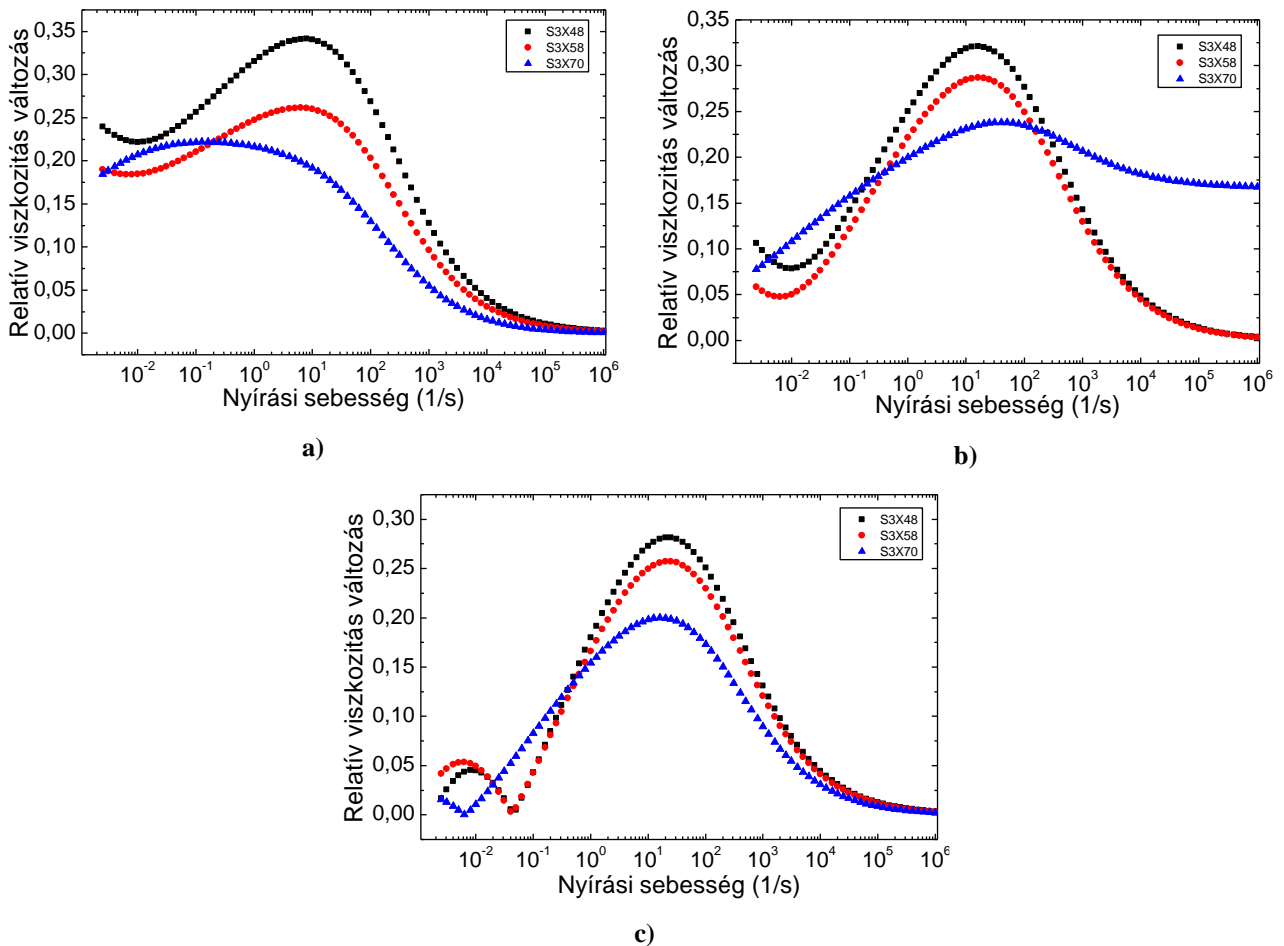
A 29. ábrán megfigyelhető, hogy habár az első mérés során mért viszkózitási értékek mindhárom esetben közel azonosnak tekinthetők, addig stacionárius állapotban az egyes forraszpasztta típusok esetén nagyon eltérnek. Egyértelműen megfigyelhető, hogy ahogy csökken a forraszpasztában a forraszfém szemcsemérete, úgy növekszik stacionárius állapotban a viszkózitása.

Az értékeket a 12. összefoglaló táblázat tartalmazza.

12. táblázat. Stacionárius állapotban a viszkózitások összehasonlítása forraszpasztta típusonként

		15 másodperc	30 másodperc	60 másodperc
η_0 [Pa·s]	Type 3	29000	30500	36250
	Type 4	33750	34500	39500
	Type 5	41500	42750	46000

A 30. ábrán a három különböző forraszpasztta 1. és 8. mérésre illesztett görbék relatív viszkozitás változása látható a három állási idő mellett. A viszkozitások a korábban meghatározott Cross modell paramétereivel $[10^{-3};10^6] \text{ s}^{-1}$ nyírési sebességen határoztam meg.



30. ábra. Relatív viszkozitás változás:

a) 15 másodperc állási idő; b) 30 másodperc állási idő; c) 60 másodperc állási idő

A 30. ábra alapján megállapítható, hogy a relatív viszkozitás változás a nyomtatási tartományon, $[10^{-1};10^3] \text{ s}^{-1}$ nyírési sebesség, mindhárom állási idő mellett a Type 5 forraszpasztánál a legkisebb. Ezen diagramok alapján is jól elkülönül a három különböző forraszpasztta reológiai tulajdonságai.

7. Összefoglalás

Méréseim során arra kerestem a választ, hogy miként függ a forraszpasztá viszkozitása az egyes mérési ciklusok között eltelt állási időtől, illetve hogy ez milyen hatással van a stacionárius állapotbéli viszkozitására.

A mérések során kapott adatokat feldolgozva és elemezve arra jutottam, hogy a forraszpasztá viszkozitása kezdetben (első mérési ciklus), figyelembe véve a nagy viszkozitási értékeket, csak minimálisan függ a forraszfém szemcseátmérőjétől. Ezen értékbéli eltérések adódhatnak a felhelyezett forraszpasztá szerkezeti inhomogenitásából, mely már a második mérés után, mint az a viszkozitási görbékből is látszik, homogenizálódik.

A mérési eredményekből egyértelműen meghatározható, hogy a mérési ciklusok közti pihentetési idő növelésével a forraszpasztá viszkozitása magasabb értéket vesz fel stacionárius állapotban. Tovább arra jöttem rá, hogy stacionárius állapotban nem csak a pihentetési idő növelésével nő a forraszpasztá viszkozitása, de a forraszfém szemcseátmérőjének csökkenésével is növekszik. Tehát, stacionárius állapotban a forraszpasztá viszkozitása függ a forraszfém szemcseátmérőjétől. Mindemellett az összes típusnál a viszkozitás nagymértékű változása figyelhető meg, amely változás elhanyagolása alapvetően befolyásolja a stencilnyomtatás optimalizálását, illetve a folyamat numerikus modellezésével kapott eredményeket.

Ezért az általam kidolgozott mérési folyamat használata javasolt a forraszpaszták stacionárius viszkozitásának meghatározására az optimalizálás és numerikus modellezés előtt.

Irodalomjegyzék

1. Tsung-Nan Tsai: „Modelling and optimization of stencil printing operations: A Comparison study”; *Computers and Industrial Engineering* 54; 374-389.o., (2008)
2. Harsányi Gábor: „Elektronikai Technológia”; *BME Viking ZRt.*, Budapest, Azonosító: VI202-010, 2013
3. Rudolf Strauss: „SMT Soldering Handbook ”, Második kiadás; *Newness*, Oxford, (1998)
4. Pinkola János: „Elektronikai Technológia Laboratórium: Pin-In-Paste laboratórium segédlet”; *BME Viking ZRt.*, Budapest, Azonosító: 55082-01, (2010)
5. IPC ANSI/J-STD-006, Joint Industry Standard; American National Standard, (1995)
6. Lajos Tamás: „Az áramlástan alapjai”, 4. átdolgozott és bővített kiadás; *Műegyetemi Kiadó*, Budapest; (2008)
7. H. A. Barnes; J. F. Hutton; K. Walters: „Bevezetés a reológiába”, 3. utánnomtatás; *Veszprémi Egyetemi Kiadó*, Veszprém; 23-66.o., (1993)
8. Jim W. Goodwin; Roy W. Hughes: „Rheology for Chemists”, *RSC Publishing*, 2. kiadás, 72–79. o.; (2006)
9. Suresh G. Advani: „Flow and Rheology in Polymer Composites Manufacturing”, *Elsevier*, 10. kötet, 9–45. o., (1994)
10. R. Durairaj; N. N. Ekere; T. A. Nguty: „Critical factors affecting paste flow during the stencil printing of solder paste””; *Soldering of Surface Mount Technology* 13/2; 30-34.o., (2001)
11. Bálint András: „Műszaki áramlástan”; *Veszprémi Egyetemi Kiadó*, Veszprém; (2002)
12. Howard A. Barnes: „A review of the slip (wall depletion) polymer solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers: its cause, character, and cure”, *J. Non-Newtonian Mech.*, 56., 221–251. o., (1995)
13. Venkata Giri Kolli; Francis Gadala-Maria; Ruth Anderson: „Rheological Characterization of Solder Pastes for Surface Mount Applications” *IEEE Transactions on Components, Packaging, And Manufacturing Technology – Part B*, 20/4; (1997)
14. R. Durairaj; N. N. Ekere; B. Salam: „Thixotropy flow behaviour of solder and conductive adhesive paste”; *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 15; 677-683.o., (2004)
15. S. S. Zhang; Y. J. Zhang; H. W. Wang: „Effect of particle distributions on the rheology of Sn/Ag/Cu lead-free solder paste”; *Materials and Design* 31; 594-598; (2010)
16. S. Mallik, N. N. Ekere, A. E. Marks, A. Seman, R. Durairaj: „Modelling of the Time-dependent Flow Behaviour of Lead-Free Solder Pastes used for Flip-Chip Assembly Applications”; *2nd Electronics System Integration Technology Conference, Greenwich, United Kingdom*; 1219-1224.o., (2008)

17. N. N. Ekere; D. He; L. Cai: „The Influence of Wall Slip in the Measurement of Solder Paste Viscosity” *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 24/3; 468–473. o., (2001)
18. S. Mallik, N. N. Ekere, R. Durairaj, A. E. Marks, A. Seman: „Wall-slip Effects in SnAgCu Solder Pastes Used in Electronics Assembly Applications” *Material and Design*, 30., 4502–4506. o., (2009)
19. R. Durairaj; Lam Wai Man; N. N. Ekere; S. Mallik: „The effect of wall-slip formation on the rheological behaviour of lead-free solder pastes”; *Materials and Design* 31., 1056-1062.o., (2010)
20. G. P. Glinski; C. Bailey; K. A. Pericleous: „A non-Newtonian computational fluid dynamics study of the stencil printing process”; *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 215/C., 437–446.o., (2001)
21. R. Durairaj, G. J. Jackson, N. Ekere, G. Glinski, C. Bailey: „Correlation of solder paste rheology with computational simulation of the stencil printing”, *Soldering and Surface Mount Technology* 14/1., 11–17o., (2002)

Ábrajegyzék

1. ábra. Stencilnyomtatás elvi rajza	5
2. ábra. Beültetőgépek: a., felvesz és elhelyez; b., összegyűjt és elhelyez	6
3. ábra. Újraömllesztés forrasztás hőprofil	6
4. ábra. Nem Newton-i folyadékok folyásgörbéi	8
5. ábra. Falmegcsúszási effektus megjelenése mérés közben:	10
a) párhuzamos lap elrendezés, mérés előtt;	
b) 10 másodperccel a mérés megkezdése után ($\dot{\gamma} = 0,05 \text{ s}^{-1}$);	10
c) koncentrikus henger reométer, külső forgó hengerrel; d) belső forgó hengerrel	10
6. ábra. Nyírási feszültség a nyírási sebesség függvényében: a) Type 5 forraszpasztta;	
b) Type 6 forraszpasztta.....	11
7. ábra. Nyírási feszültség az idő függvényében: a) nyírási sebesség $0,1 \text{ s}^{-1}$;	
b) nyírási sebesség 10 s^{-1}	11
8. ábra. Viszkozitásgörbék: a) eredetű összetétel mellett; b) $\xi=10\%$ összetétel mellett	12
9. ábra. $\lambda=4,7$ -es arányú keverék változó ξ [%] összetétel vizsgálata	12
10. ábra. Forraszpasztta viszkozitásának időfüggése: a) P1 forraszpasztta; b) P2 forraszpasztta	13
11. ábra. Falmegcsúszási jelenség kiküszöbölése matematikai modell alapján:.....	14
a) Különböző laptávolságokkal a valódi viszkozitás kiszámítása;	
b) Ciklusszám hatása a viszkozításra	14
12. ábra. Viszkozitás függése a mérőfej érdességétől (LF1 forraszpasztta):	
a) Viszkozitás a nyírási sebesség függvényében; b) Oszcillációs mérés	15
13. ábra. Mért és korrigált viszkozitási görbék: a) P1 forraszpasztta esetén;	
b) P2 forraszpasztta esetén.....	16
14. ábra. Analitikus modell és szimuláció összehasonlítása: a) Newtoni paszta;	
b) nem Newtoni paszta.....	17
15. ábra. Szimulációs eredmények: a) nyomás a stencilfóli felületén különböző nyomtatási	
sebességek esetén; b) nyírási sebesség különböző nyomtatási sebességek esetén.....	18
16. ábra. Reológiai mérés elrendezés.....	21
17. ábra. A Type 3 forraszpasztta stacionárius mérése 15 másodperces várakozással	23
18. ábra. A Type 3 forraszpasztta stacionárius mérése 30 másodperces várakozással	24
19. ábra. A Type 3 forraszpasztta stacionárius mérése 60 másodperces várakozással	25
20. ábra. A Type 3 típusú forraszpasztta η_0 viszkozitás különböző pihentetési idők mellett.....	26
21. ábra. A Type 4 forraszpasztta stacionárius mérése 15 másodperces várakozással	27
22. ábra. A Type 4 forraszpasztta stacionárius mérése 30 másodperces várakozással	28
23. ábra. A Type 4 forraszpasztta stacionárius mérése 60 másodperces várakozással	29
24. ábra. A Type 4 típusú forraszpasztta η_0 viszkozitás különböző pihentetési idők mellett	30
25. ábra. A Type 5 forraszpasztta stacionárius mérése 15 másodperces várakozással	31

26. ábra. A Type 5 forraszpasztta stacionárius mérése 30 másodperces várakozással	32
27. ábra. A Type 5 forraszpasztta stacionárius mérése 60 másodperces várakozással	33
28. ábra. A Type 5 típusú forraszpasztatt η_0 viszkozitás különböző pihentetési idők mellett	34
29. ábra. Görbeillesztéssel meghatározott η_0 viszkozitások:.....	35
a) 15 másodperces pihentetés; b) 30 másodperces pihentetés;	
c) 60 másodperces pihentetés.....	35
30. ábra. Relatív viszkozitás változás:	36
a) 15 másodperc állási idő; b) 30 másodperc állási idő; c) 60 másodperc állási idő	36

Táblázatjegyzék

1. táblázat. Forraszpaszták típusok	7
2. táblázat. Felhasznált forraszpaszták	20
3. táblázat. A Type 3 stacionárius állapot modell paraméterek 15 másodperces pihentetéssel	23
4. táblázat. A Type 3 stacionárius állapot modell paraméterek 30 másodperces pihentetéssel	24
5. táblázat. A Type 3 stacionárius állapot modell paraméterek 60 másodperces pihentetéssel	25
6. táblázat. Type 4 stacionárius állapot modell paraméterek 15 másodperces pihentetéssel	27
7. táblázat. A Type 4 stacionárius állapot modell paraméterek 30 másodperces pihentetéssel	28
8. táblázat. A Type 4 stacionárius állapot modell paraméterek 60 másodperces pihentetéssel	29
9. táblázat. A Type 5 stacionárius állapot modell paraméterek 15 másodperces pihentetéssel	31
10. táblázat. A Type 5 stacionárius állapot modell paraméterek 30 másodperces pihentetéssel	32
11. táblázat. A Type 5 stacionárius állapot modell paraméterek 60 másodperces pihentetéssel	33
12. táblázat. Stacionárius állapotban a viszkozitások összehasonlítása forraszpaszták típusonként	35

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani a Koki Europe A/S Hungarian –nek a számomra biztosított forraszpasztákért.

Köszönöm Dr. Gyarmati Benjáminnak, a Vegyész- és Biomérnöki kar, Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék munkatársának a szakmai segítségét és a mérőberendezés használatának lehetőségét.