VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

SMÁČIVOST PINŮ S ROZDÍLNÝMI POVRCHOVÝMI ÚPRAVAMI

WETTABILITY OF PINS WITH DIFFERENT SURFACE TREATMENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Marcel Fabiánek

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Jiří Starý, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2024

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Marcel Fabiánek ***ID:*** 220864

Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Smáčivost pinů s rozdílnými povrchovými úpravami

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Teoreticky nastudujte pájecí proces s důrazem na smáčivost a vytváření intermetalických vrstev. Navrhněte a vypracujte metodiku měření smáčivosti. Proveďte praktická měření a vyhodnocení smáčivosti povrchových úprav Cu pinů s mezivrstvou Ni a povrchovou úpravou Sn a In. Použijte tavidlo podle doporučení vedoucího práce. Diskutujte dosažené výsledky.

Spolupráce s firmou KYOCERA AVX Components s.r.o. - Bzenec.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Literatura dle doporučení vedoucího práce

Termín zadání: 5.2.2024 ***Termín odevzdání:*** 22.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce se věnuje problematice smáčení vývodových součástek. Je zde nastíněna problematika pájení, tvorby pájeného spoje. Nahlíží se na oblast smáčení vývodu, jež bude testována metodou smáčecích vah tak na tvorbu intermetalické vrstvy na pomezí pájka vývod. Tvorba intermetalických vrstev bude pozorována na měděných kontaktech galvanicky pokrytých jiným kovem.

Klíčová slova

Pájecí proces, smáčivost, metoda smáčecích vah

Abstract

The master thesis is devoted to the problem of wetting of lead components. It outlines the problems of soldering, solder joint formation. It looks at the area of pin wetting, which will be tested by the method of wetting scales and the formation of an intermetallic layer at the solder-pin interface. The formation of intermetallic layers will be observed on copper contacts electroplated with another metal.

Keywords

Soldering process, wettability, wetting balance method

Bibliografická citace

FABIÁNEK, Marcel. Smáčivost pinů s rozdílnými povrchovými úpravami [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160347. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Jiří Starý.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	*Bc. Marcel Fabiánek*
VUT ID studenta:	*220864*
Typ práce:	*Diplomová práce*
Akademický rok:	*2023/24*
Téma závěrečné práce:	Smáčivost pinů s rozdílnými povrchovými úpravami

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.
V Brně dne: 22. května 2024 ----------

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 22. května 2024 ----------

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ **8**

SEZNAM TABULEK **10**

ÚVOD **11**

1. PROCES PÁJENÍ **12**

1.1 TVORBA PÁJENÉHO SPOJE 12
1.1.1 Smáčení *12*
1.1.2 Formování *12*
1.1.3 Tuhnutí *13*
1.2 POŽADAVKY NA PÁJENÝ SPOJ 13
1.3 SMÁČIVOST 13
1.3.1 Smáčecí úhel *14*
1.4 TVORBA INTERMETALICKÝCH VRSTEV 15

2. SKENOVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE **17**

2.1 KONSTRUKCE MIKROSKOPU 17
2.2 SNÍMÁNÍ OBRAZU 18
2.2.1 Sekundární elektrony *19*
2.2.2 Zpětně odražený elektron *19*
2.2.3 Rentgenové záření *20*
2.3 ZDROJ ELEKTRONŮ 20
2.4 SROVNÁNÍ S OPTICKÝMI MIKROSKOPY 21
2.5 PŘÍPRAVA VZORKU NA POZOROVÁNÍ 22
2.5.1 Zapouzdření vzorku *22*
2.5.2 Mikrovýbrus *22*

3. METODIKA TESTOVÁNÍ SMÁČIVOSTI **23**

3.1 METODA SMÁČECÍCH VAH 23
3.2 VYHODNOCENÍ SMÁČECÍCH CHARAKTERISTIK 25

4. PRAKTICKÁ ČÁST **27**

4.1 TEST S OLOVNATOU PÁJKOU 27
4.2 TEST S BEZOLOVNATOU PÁJKOU SAC305 29
4.3 TEST S BEZOLOVNATOU PÁJKOU SN100C 33
4.4 TEST ODVODU TEPLA ZE VZORKU DO KONSTRUKCE MENISKOGRAFU 38
4.5 TEST SMÁČIVOSTI PŘI ROZDÍLNÉ TLOUŠŤCE POVRCHOVÉ ÚPRAVY 39
4.5.1 Smáčení s pájkou SAC305 ..... *40*
4.5.2 Smáčení s pájkou SN100C *43*
4.6 TEST PÁJITELNOSTI VÝVODŮ 45

5. ZÁVĚR **52**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **57**

SEZNAM PŘÍLOH **58**

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1 Formování pájeného spoje [1] 12
1.2 Závislost smáčení na kontaktním úhlu [1] 14
1.3 Smáčecí úhel [3] 14
1.4 Rozdělení smáčecích úhlů podle kvality vytvořeného spoje [3] 15
1.5 Intermetalická vrstva cínu na niklovém povrchu [8] 16
2.1 Skenování vzorku [9] 17
2.2 Skenovací elektronový mikroskop [10] 18
2.3 Průstřel vzorku [12] 19
2.4 Sekundární elektrony [12] 19
2.5 Zpětně odražené elektrony [12] 20
2.6 Rentgenové záření [12] 20
2.7 Zdroj elektronů [13] 21
2.8 Naznačení procesu ubírání materiálu při mikrovýbrusu 22
3.1 Metoda smáčecích vah [15] 23
3.2 Smáčecí charakteristiky [3] 25
3.3 Parametry kvalitního smočení dle normy MIL-STD-883 [16] 25
4.1 Testovací aparatura METRONELEC Menisco ST88 27
4.2 Testované piny 9612 před a po měření 28
4.3 Smáčecí charakteristika 1 pinu 28
4.4 Testované piny 9364, 9545 a 9612 po měření 31
4.5 Testované piny 9624Big a 9624press po měření 31
4.6 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9364 32
4.7 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9545 32
4.8 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9612 32
4.9 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9624big 33
4.10 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9624press 33
4.11 Testované piny 9364, 9545 a 9612 po měření 35
4.12 Testované piny 9624Big a 9624press po měření 36
4.13 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9364 36
4.14 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9545 37
4.15 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9612 37
4.16 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9624big 37
4.17 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9624press 38
4.18 Doplnění izolační vrstvy na hliníkovou hlavici 38
4.19 Smáčecí charakteristiky vzorku 9612 s doplněnou kaptonovou vrstvou 39
4.20 Srovnání průměrných smáčecích charakteristik vzorků B, D, E, F 41
4.21 Srovnání průměrných smáčecích charakteristik vzorků A, C 41
4.22 Srovnání průměrných smáčecích charakteristik všech testovaných vzorků 42
4.23 Testované vzorky A a C 42
4.24 Testované vzorky B, D, E, F 42
4.25 Srovnání průměrných smáčecích charakteristik vzorků B, D, E, F 44
4.26 Srovnání průměrných smáčecích charakteristik vzorků A, C 44
4.27 Srovnání průměrných smáčecích charakteristik všech testovaných vzorků 44
4.28 Testované vzorky A a C 45
4.29 Testované vzorky B, D, E, F 45
4.30 Pájecí stanice a použitý hrot 46

4.31 Vzorky B TOP (horní)a B BOT (spodní) SAC305 46
4.32 Vzorky D TOP (horní) a D BOT (spodní) SAC305....47
4.33 Vzorky E TOP (horní) a E BOT (spodní) SAC305 47
4.34 Vzorky F TOP (horní) a F BOT (spodní) SAC305....48
4.35 Mikrovýbrus vzorku F SAC305....48
4.36 Vzorky B TOP (horní) a B BOT (spodní) SN100C 49
4.37 Vzorky D TOP (horní) a D BOT (spodní) SN100C....49
4.38 Vzorky E TOP (horní) a E BOT (spodní) SN100C 50
4.39 Vzorky F TOP (horní) a F BOT (spodní) SN100C....50
4.40 Mikrovýbrus vzorku F SN100C....51

SEZNAM TABULEK

Tabulka 3.1 Pájecí třídy normy A-89-400 26
Tabulka 4.1 Výsledky smáčecích charakteristik – Olovo 28
Tabulka 4.2 Přehled rozměrů a povrchových úprav testovaných vzorků 29
Tabulka 4.3 Naměřené časy podmínek norem 29
Tabulka 4.4 Hodnoty smáčecího úhlu 30
Tabulka 4.5 Vyhodnocení vzorků vůči jednotlivým normám 30
Tabulka 4.6 Přehled rozměrů a povrchových úprav testovaných vzorků 34
Tabulka 4.7 Naměřené časy podmínek norem 34
Tabulka 4.8 Hodnoty smáčecího úhlu 34
Tabulka 4.9 Vyhodnocení vzorků vůči jednotlivým normám 35
Tabulka 4.10 Srovnání vzorků 9612 s tepelnou izolací a bez tepelné izolace 39
Tabulka 4.11 Doplňující údaje o testovaných vzorcích 40
Tabulka 4.12 Smáčecí úhel v pájce SAC305 v čase t = 5 s 40
Tabulka 4.13 Maximální dosažená smáčecí síla 40
Tabulka 4.14 Čas průchodu nulou 40
Tabulka 4.15 Čas potřebný k dosažení 2/3 maximální smáčecí síly 41
Tabulka 4.16 Smáčecí úhel v pájce SN100C v čase t = 5 s 43
Tabulka 4.17 Maximální dosažená smáčecí síla 43
Tabulka 4.18 Čas průchodu nulou 43
Tabulka 4.19 Čas potřebný k dosažení 2/3 maximální smáčecí síly 43

ÚVOD

Vzhledem k dnešním trendům směrem k elektromobilitě a celkovému vyššímu využití elektrické energie je pájení opět aktuální téma. Je to zapříčiněno kvalitnějším elektrickým spojením s dlouhodobějšími vlastnostmi oproti pressfit variantě.

Pájení je jedním z nejdůležitějších prvků nejen v elektrotechnice. Kvalita jeto části ovlivňuje celou sestavu a její výsledné vlastnosti. Proto je potřeba znát jednotlivé části tvorby pájeného spoje a čím jsou ovlivněny.

Jedním ze zásadních faktorů je smáčivost. Zde je možné pozorovat některé rysy kvalitního smočení i pouhým okem další je potřeba podrobit bližšímu přezkoumání. Pomocí analýzy povrchu, aby byly odhaleny interakce jednotlivých atomů a jejich pronikání navzájem.

1. PROCES PÁJENÍ

Pájení je fyzikálně chemický proces spojování kovových částí. Spojení jednotlivých dílčích částí začíná ohřevem na teplotu blízkou teplotě tavení příslušné pájky. Následuje dodání pájky, jež slouží jako materiál k propojení. Velmi žádoucí je přidání tavidla, jež podporuje kvalitní smočení pájených ploch. Průběh formování pájeného spoje se dá rozdělit do několika dílčích částí. [1][2]

1.1 Tvorba pájeného spoje

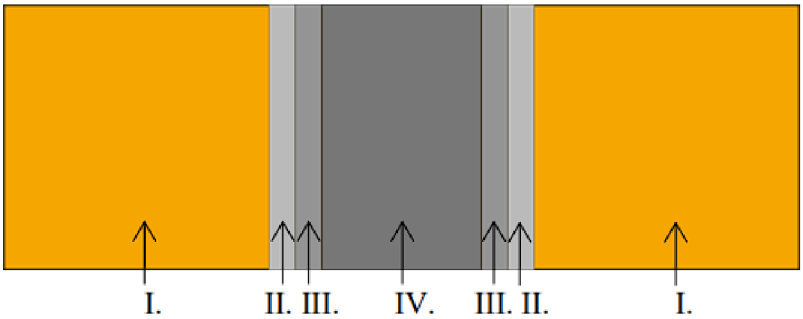
Tvorbu pájeného spoje může ovlivnit velké množství faktorů které vplývají na základní tři fáze tvorby pájeného spoje. Je-li jedna z nich narušena vede to k vytvoření nekvalitního pájeného spoje. [2]

1.1.1 Smáčení

Jedná se o první etapu tvorby pájeného spoje. V této fázi dochází k rozlévání roztavené pájky na povrch spojovaných materiálů. Pájka se řídí fyzikálními zákony, a tak vytváří obrazec odpovídající minimální povrchové energii. Jednotlivé atomy pájky a substrátu se dostávají do těsné blízkosti a vytváří fyzikální vazby. Toto adhezivní spojení dvou kovů není však dostatečně pevné. [2]

1.1.2 Formování

Následující fáze je formování pájeného spoje zde dochází k přechodu z čistě adhezivních sil do kombinace adhezivních a kohezních sil. Za působení tepla, které výrazně mění rychlost a míru tvorby meziatomárních vrstev. Meziatomární vrstvy vznikají difuzí atomů pájky do materiálu substrátu a materiálu substrátu do pájky. Na přechodu tak vznikají dvě různé intermetalické sloučeniny. Tento proces snižuje povrchovou energii systému. Při výměně jednotlivých atomů dochází k vytvoření kovové vazby díky propojení valenčních elektronů dílčích prvků. [2]



Obrázek 1.1 Formování pájeného spoje [1]

Oblast I. je materiál substrátu, II je první intermetalická vrstva s vyšším obsahem materiálu základního kovu, III je druhá intermetalická vrstva s vyšším obsahem kovu pájecí slitiny, IV je pájecí slitina.

1.1.3 Tuhnutí

Poslední fází tvorby pájeného spoje je jeho ochlazení. V průběhu chlazení dochází ke krystalizaci pájky. Pájka začíná vytvářet zárodky krystalů ve svém objemu. Tyto zárodky jsou silně ovlivněny rychlostí chlazení. Čím pomalejší je chladnutí pájky tím větší zárodky se tvoří a tím méně kvalitní se spoj vytvoří. [2]

1.2 Požadavky na pájený spoj

Pro kvalitní spojení jednotlivých dílčích částí je potřeba aby spoj vykazoval dostatečně vhodné elektrické mechanické a tepelné vlastnosti. Při dosažení vhodné kombinace všech těchto faktorů je spoj kvalitní. Není-li některá z podmínek splněna spoj dříve či později vykáže chybu a může neblahým způsobem poškodit celou sestavu v níž je vytvořen. [2]

Mechanické vlastnosti:

- Odpovídající pevnost a tažnost pájeného spoje
- Správný tvar menisku
- Minimální výskyt voidů
- Vhodný konstrukční návrh

Elektrické a tepelné vlastnosti:

- Odpovídající přechodový odpor
- Odpovídající vodivost
- Odpovídající ohřev průchodem proudu

Stabilita a odolnost:

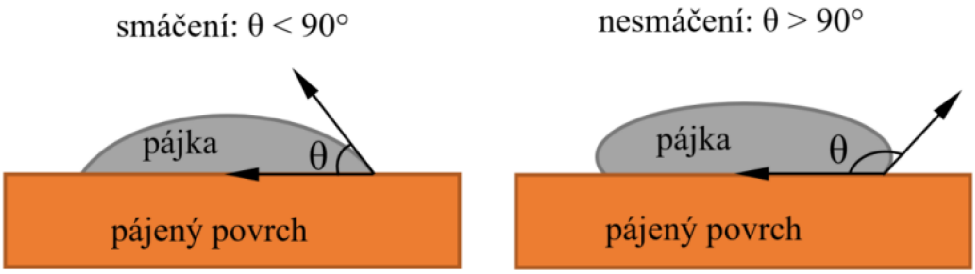
- Odolnost vůči korozi
- Odolnost vůči oxidaci
- [3]

1.3 Smáčivost

Je jedním ze zásadních parametrů, který nejvíce ovlivňuje tvorbu defektů. Smáčivost je určována pomocí smáčecích charakteristik, jež vyplývají z vektorových veličin povrchového napětí.

V základu se dá hovořit o smáčivém a nesmáčivém povrchu. Smáčivý povrch je takový, na jehož povrchu dochází k rovnoměrnému a okamžitému rozšíření pájky.

Takovýto povrch vykazuje smáčecí úhel v rozmezí 0° až 90°. Pokud se jedná o povrch nesmáčivý pájecí slitina se neroztéká po povrchu. Smáčecí nebo také kontaktní úhel překračuje 90°. [1][4]



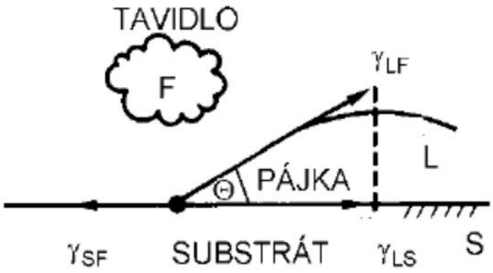
Obrázek 1.2 Závislost smáčení na kontaktním úhlu [1]

1.3.1 Smáčecí úhel

Jedná se o úhel svírající se mezi pájkou a substrátem. Jeho výpočet vychází z Youngova modelu. Princip spočívá v rozdílu vektorů povrchového napětí na přechodech pájka/substrát a pájka/tavidlo podělené vektorem povrchového napětí na pomezí pájky a tavidla. Tento model však uvažuje nad dokonale hladkým nezoxidovaným a jinak neznečištěným povrchem.

Čím vyšší jsou hodnoty povrchového napětí rozhraní pájky/tavidlo a pájka/substrát a čím nižší jsou hodnoty přechodu substrát/tavidlo tím nižší je výsledný smáčecí úhel, a tedy i kvalitnější spoj. [6]

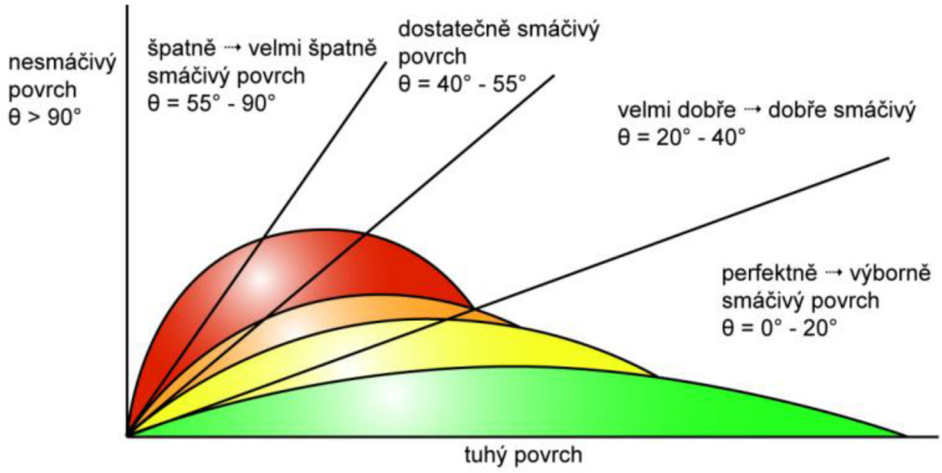
$$\frac{\gamma_{SF}-\gamma_{LS}}{\gamma_{LF}} = \cos\theta \qquad 1.1$$



Obrázek 1.3 Smáčecí úhel [3]

U smáčivého povrchu se dá definovat kvalita smáčivosti. Obecným pravidlem je čím nižší

smáčecí úhel tím kvalitnější spoj. Smáčecí úhel lze tedy rozdělit do určitých kategorii kdy je proces navržený vhodným a kdy již nevhodným způsobem. Smáčecí úhel jsem žádoucí udržovat na nízkých hodnotách, ale to sebou přináší i ovlivnění dalších faktorů pro vytvoření kvalitního pájeného spoje. [3]



Obrázek 1.4 Rozdělení smáčecích úhlů podle kvality vytvořeného spoje [3]

Odsmáčení je nežádoucí proces který může u smáčení nastat. Roztavená pájka v první fázi nejprve pokryje pájený povrch, ale poté ustoupí. Tento ústup zapříčiní vytvoření nepravidelných kapiček pájky na povrchu dříve smočeného substrátu. Povrch odkud došlo k ústupu pájky zůstává pouze tenká vrstvička pájky. Tento efekt je možné zvrátit použitím agresivnějšího tavidla. [5][6]

Nejčastějšími příčinami vzniku odsmáčení je:

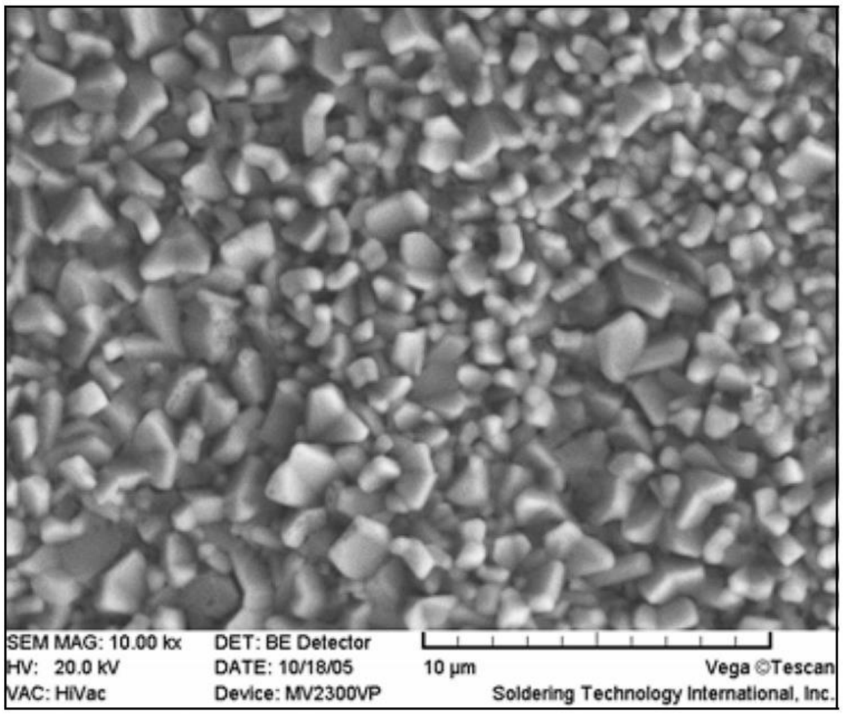
- Kontaminace povrchu DPS
- Nedostatečně agresivní tavidlo
- Překročení maximální teploty tavení
- Překročení doby pájení

1.4 Tvorba intermetalických vrstev

Intermetalická vrstva je tenká vrstva na rozmezí pájky a pájeného prvku. Vzniká difuzí atomů substrátu do pájky a zpětně. Této proces probíhá, když je pájecí slitina v tekutém stavu a pokračuje i po zpětném ztuhnutí pájky. Rychlost růstu intermetalické vrstvy je ovlivněna teplotu, časem a objemem pájky. Pokud dochází ke smočení povrchu pájkou vždy dochází k vytvoření intermetalické vrstvy. Tato vrstva je žádoucí, jelikož kompenzuje rozdílnou úroveň tepelné roztažnosti a vytváří pevné a vodivé spojení dvou kovů. Současně však částečně bere spoji jeho pevnost a pružnost. Proto je potřeba sledovat a regulovat míru tvorby intermetalické vrstvy ve vytvářeném spoji. [2][7][8]

Kvalitu smočení povrchu pájeného spoje je možné definovat právě tloušťkou

intermetalické vrstvy. Při přechodu měď cín je kvalitní smočení při dosažení intermetalické vrstvy v rozmezí 1 µm až 2,5 µm. Pokud je povrchu měděného vývodu pokryt vrstvou niklu je tato tloušťka nižší a to 0,4 µm až 0,8 µm. V případě překročení, nebo naopak výrazně nižšímu výskytu intermetalické vrstvy dochází k tvorbě špatného spoje. Vysvětlením mohou být nedodržení procesů, jejich špatné nastavení, nedodržení skladování spojené s tvorbou oxidů atd. [8]

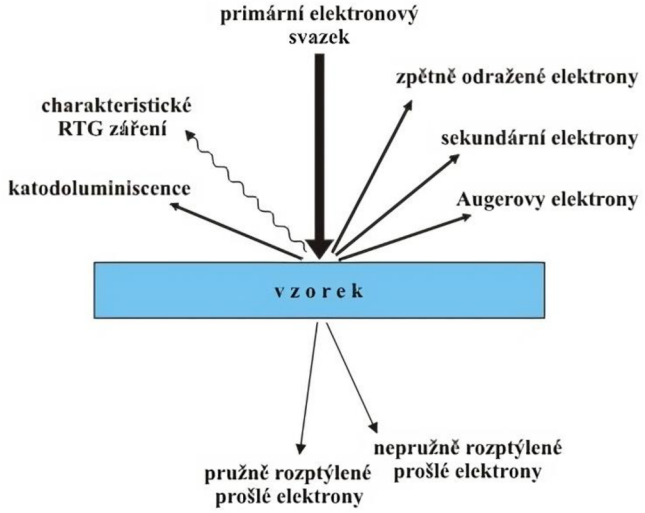


Obrázek 1.5 Intermetalická vrstva cínu na niklovém povrchu [8]

2. SKENOVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE

Skenovací elektronová mikroskopie nebo také řádková využívá elektronového svazku fokusovaného na pozorovaný objekt. Jelikož se nevyužívá světla je potřeba aby celý vnitřní prostor mikroskopu byl ve vakuu. Vakům je zde velmi zásadní, jelikož pokud by v prostoru kudy putuje elektronový svazek byly atomy nebo molekuly docházelo by při průchodu elektronového svazku ke srážkám. Tyto srážky by jednak pohltily tyto elektrony a hrozilo by zde poškození katody. Sledované veličiny by také byly utlumeny a tím by došlo k rozostření obrazu. Dalším rozdílem jsou čočky, které fokusují elektronový paprsek kdy běžně se používá broušené sklo, ale zde je využito elektromagnetických čoček.

Velikost skenovaného objektu je dána velikostí vakuové komory. Skenovaný objekt však musí být vodivý. Nevodivé materiály musí být předpřipraveny, a to pomocí naprášení kovového prášku. Využívá se pro analýzu povrchu, jelikož obraz vzniká interakcí elektronů ze svazku s materiálnem, na nějž dopadají. V důsledku dopadu dochází k uvolnění sekundárních elektronů, rentgenového záření či zpětně odražených elektronů. Mikroskop je vybaven sadou detektorů, jenž sledují tyto jevy. Toto vše poskytuje informace o tvar, krystalografické uspořádání, čí chemické složení.[9][10]



Obrázek 2.1 Skenování vzorku [9]

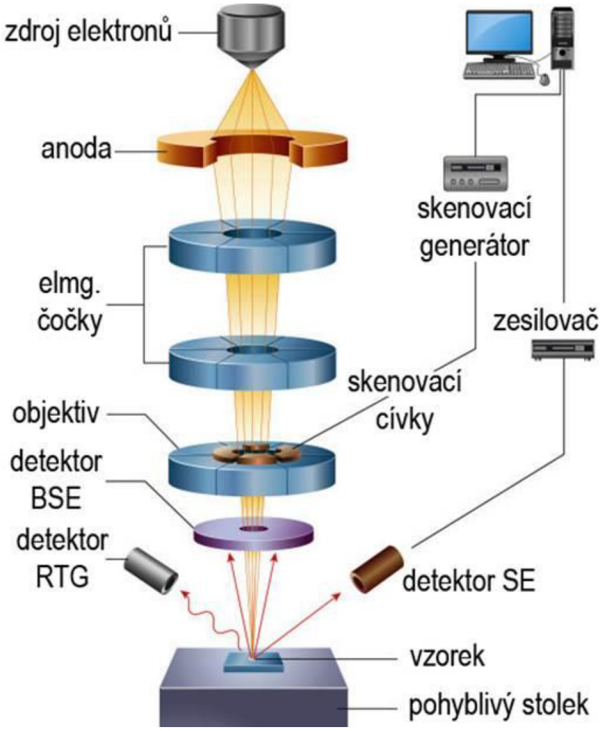
2.1 Konstrukce mikroskopu

Elektronový svazek je emitován ze zdroje elektronů, jenž je připojen na záporné napětí. Vypuzené elektrony jsou dále urychleny anodou, která je na kladném potenciálu. Průchodem anodou je elektronový svazek lehce vychýlen. Následuje elektronová optika, která soustřeďuje elektronový svazek na co nejmenší plochu zkoumaného vzorku.[10]

Elektronové optiky jsou dvojího druhu:

1. Elektrostatická čočka formuje elektronový svazek již ve zdroji elektronového svazku. Jedná se v podstatě o kovové desky s kruhovými otvory s různými potenciály. Uspořádání jednotlivých desek s rozdílnými velikostmi otvorů a potenciálu dochází k za fokusování svazku.[10]
2. Elektromagnetická čočka využívá nehomogenního magnetického pole, které je generované z odstíněného feromagnetického pláště. V tomto plášti je vyseparovaný otvor, který ovlivňuje směr elektronů.[11]

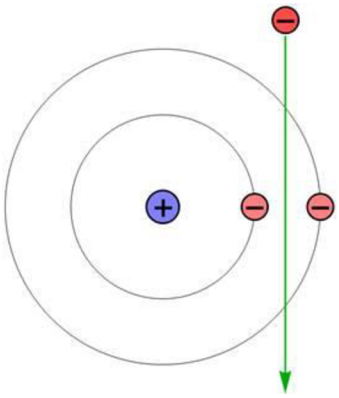
Výsledný obraz je tvořen detekcí signálů generovaných dopadem elektronů na povrch vzorku. Tyto signály jsou zpracovány počítačem a graficky vykreslí obraz zkoumaného vzorku.



Obrázek 2.2 Skenovací elektronový mikroskop [10]

2.2 Snímání obrazu

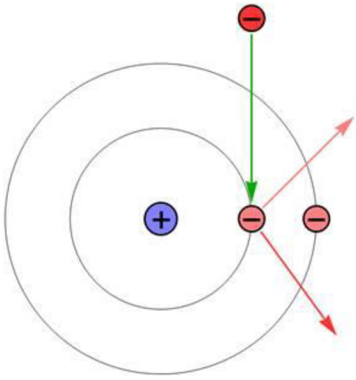
Skládání obrazu vzorku je tvořeno jednotlivými interakcemi elektronového svazku se vzorkem. Jednou z prvních interakcí je, když elektrony ze svazku žádným způsobem neinteragují s elektrony obalu jádra a jsou zachyceny detektorem pod vzorkem.[12]



Obrázek 2.3 Průstřel vzorku [12]

2.2.1 Sekundární elektrony

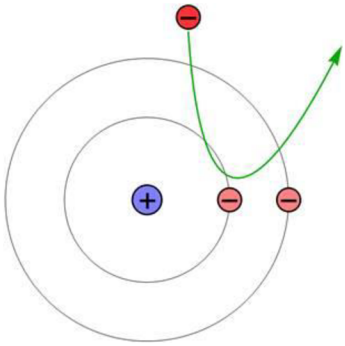
Sekundární elektrony SE jsou elektrony, jež jsou excitovány z atomu vzorku vlivem dopadu primárních atomů svazku. Jelikož pronikají do nižších hloubek, než BSE nesou informaci pouze o povrchu vzorku. Pomocí sledování úhlu dopadu sekundárních elektronů na detektor dochází k vykreslení plastického povrchu [9][12]



Obrázek 2.4 Sekundární elektrony [12]

2.2.2 Zpětně odražený elektron

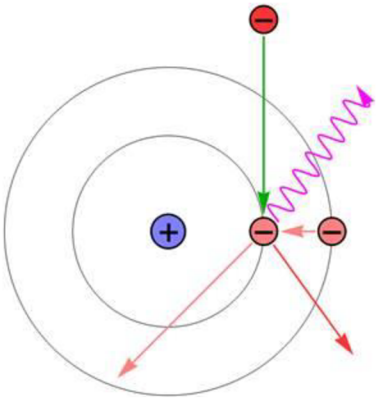
Další interakcí elektronů se vzorkem je BSE neboli zpětně odražené elektrony. Zde na základě elektrostatické síly je primární elektron odražen pryč od vzorku vlivem interakce s dalším elektronem. Tyto odrazy mohou být způsobovány až do hloubky desítek nanometrů. Díky tomu je možno sledovat nejen povrch vzorku ale i jeho vnitřní uspořádání. Jsou vhodné pro rozlišení právě přechodu kovů, jelikož na základě rozdílu atomárního čísla vytváří kontrast obrazu. [9][12]



Obrázek 2.5 Zpětně odražené elektrony [12]

2.2.3 Rentgenové záření

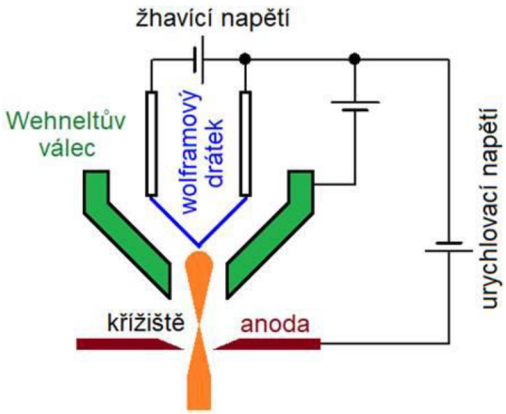
Rentgenové záření RTG vzniká srážkou primárního elektronu a elektronu z elektronového obalu. Primární elektron poskytne dostatek energie k přechodu elektronu do vyšší energetické hladiny. Při zpětném přechodu elektronu na nižší energetickou hladinu dochází k emitaci záření. Na základě velikosti rozdílu energetických hladin může vznikat záření všech frekvencí i rentgenové. Jelikož tento efekt se uplatňuje do hloubky jednotek mikrometrů poskytuje informace o chemickém složení materiálu.[9][12]



Obrázek 2.6 Rentgenové záření [12]

2.3 Zdroj elektronů

Nejčastěji je využito wolframového drátku, který je zářiván na teplotu okolo 2800 K. Po dosažení takovéto teploty je elektronům wolframu dodáno dostatek energie a ta tak překročí energii výstupní práce. Uvolněné elektrony urychlovány anodou mají různou rychlost, směr a současně dochází k jejich odpuzování mezi sebou. Je tak potřeba okamžitě formovat svazek do požadovaného tvaru. To zajišťuje Wehneltův válec. [13]



Obrázek 2.7 Zdroj elektronů [13]

Požadavky na zdroj elektronů:

- Co nejmenší zdroj elektronů k dosažení co nejmenšího průměru elektronového svazku.
- Velký počet elektronů ve svazku.
- Ideálně identická energie uvolněných elektronů zajištující minimální rozptyl. [13]

2.4 Srovnání s optickými mikroskopy

Optické mikroskopy potřebují pro vizualizaci pozorovaného vzorku externí zdroj světla. Světlo může procházet skrz umožnuje-li to vzorek nebo světlo odrážet od jeho povrchu. Elektronový mikroskop využívá pro vizualizaci tok elektronů, které svým dopadem na povrch předávají informace o vzhledu tvaru nebo struktuře vzorku. U optického mikroskopu dochází k limitaci velikosti pozorované plochy lidským okem, elektronový mikroskop obraz interpretuje pomocí senzorů a vytváří digitální obraz. Obecně platí, že optické mikroskopy dokáží pracovat do minimální vzdálenosti 200 nm. Pro pozorování menších objektů jak 200 nm je potřeba využití elektronového mikroskopu. Optické mikroskopy nedokáží pozorovateli předat informace o chemickém složení pozorovaného vzorku oproti elektronovému mikroskopu využívající prvkové analýzy. Optické mikroskopy jsou levnější nežli elektronové mikroskopy. [17]

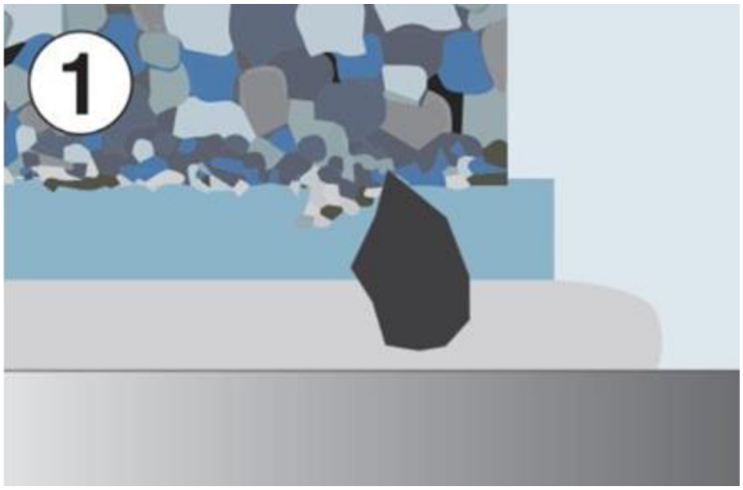
2.5 Příprava vzorku na pozorování

2.5.1 Zapouzdření vzorku

Pro zapouzdření vzorku se v elektrotechnice využívá metylmetakrylátová pryskyřice, která tepelně neovlivní zalévané vzorky. Zalévací hmota se skládá z práškového plnidla a tekuté složky v podobě tvrdidla. Směs je nutno dobře homogenizovat pro zajištění rovnoměrného vytvrzení. Pozorované část DPS se umístí do formy a zalije se před chystanou směsí. Je vhodné formu vymazat pro snažíš vyjmutí vzorku po vytvrzení. Takto připravené vzorky jsou připraveny na broušení a leštění. U pozorování pod optickým mikroskopem může být využita jakákoli směs. Při pozorování pod elektronovým mikroskopem je potřeba využít jiné zalévací směsi, aby nedocházelo k jejímu nabíjení elektrony čímž znemožňuje pozorování vzorku.

2.5.2 Mikrovýbrus

Jedná se o proces, kdy pro odkrytí vnitřní části vzorku je využito broušení svrchních vrstev krycího materiálu. Broušení se provádí pomocí brusných papírů s různou hodnotu drsnosti adhezivních částic. Míra drsnosti je volena dle účelu. Pro rychlejší postup materiálem je vhodné využití vyšší drsnosti. Vždy je však potřeba požadovanou vrstvu vyleštit pomocí velmi jemných adhezivních částic. Pokud by nedošlo k tomuto vyleštění byly na vzorku pozorovány vrypy z broušení a znemožnily by tak pozorování vzorku. Další faktory, jež vplývají na rychlost odběru materiálu jsou síla přítlaku a rychlost otáčení brusného papíru.



Obrázek 2.8 Naznačení procesu ubírání materiálu při mikrovýbrusu

3. METODIKA TESTOVÁNÍ SMÁČIVOSTI

3.1 Metoda smáčecích vah

Metoda smáčecích vah pracuje na principu sledování vztlakové síly F_{VZ} a smáčecí síly F_{SM} působící na těleso ponořené do roztavené pájky Z rozdílu těchto sil je sestrojena smáčecí charakteristika daného vzorku. Pro výpočet vztlakové síly je potřeba znát objem vytlačené pájky ten se však rovná ponořené části vzorku jež je možné dopočíst dále hustotu pájky a gravitační zrychlení. Smáčecí síla je dána povrchovým napětím tavidla, obvodem vzorku a kosinem smáčecího úhlu.

Při samotném smáčení je na testovanou komponentu naneseno tavidlo v požadované tloušťce a typu. Takto připravený vzorek je zavěšen do jemného ústrojí siloměru smáčecích vah. Samotný vzorek nevykonává pohyb nýbrž nádoba s roztavenou pájkou. Ještě před tím, než dochází k zvednutí nádoby s pájkou jsou z povrchu odstraněny oxidy. Tyto oxidy jsou pouze setřeny kovovou těrkou pryč z oblasti měření. Pro snížení oxidace je možno využít inertní atmosféry. Nádoba je pomalu kontinuálně zvedána krokovým motorem, než dojde k ponoření testovaného vzorku do požadované hloubky. [14]

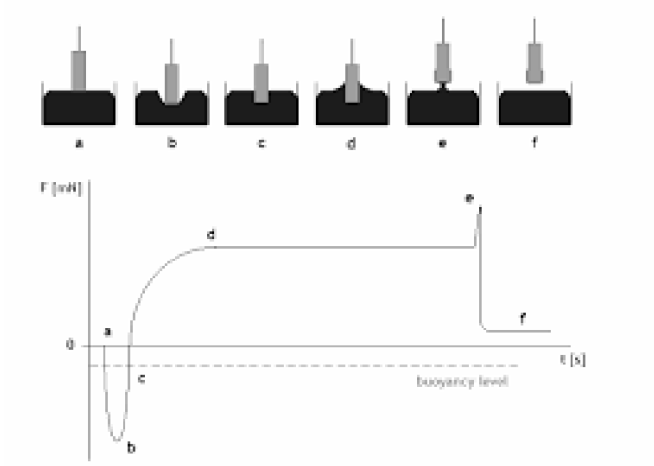
$$F_{MĚŘ} = F_{SM} - F_{VZ} \qquad 3.1$$

$$F_{SM} = \gamma_{LV} \cdot p \cdot \cos\theta \qquad 3.2$$

$$F_{VZ} = V \cdot \rho \cdot g \qquad 3.3$$

Proces smáčení vzorku

Jednotlivé etapy procesu smáčení jsou popsány níže. Demonstrovaný graf smáčivosti je pro válcovou součástku.



Obrázek 3.1 Metoda smáčecích vah [15]

Etapa A – Začátek měření jedná se o první bod kontaktu vzorku s roztavenou pájkou.

Etapa AB – Proces vtlačování vzorku do roztavené pájky do požadované hloubky. Vzorky s vyšší tepelnou kapacitou nebo se špatnou smáčivostí se v této oblasti nesmáčí, a naopak je odpuzován. Vzorky s nízkým teplotním koeficientem se mohou začít smáčet již během procesu vsouvání do pájky. Současně je tvar této oblasti dán rychlostí ponoru.

Etapa B - Bod kde se již všechny vzorky začínají smáčet. Současně jde o oblast, kdy dochází k aktivaci tavidla. Velikost smáčecího úhlu klesá a společně s tím se zmenšuje síla působící proti směru ponoření vzorku.

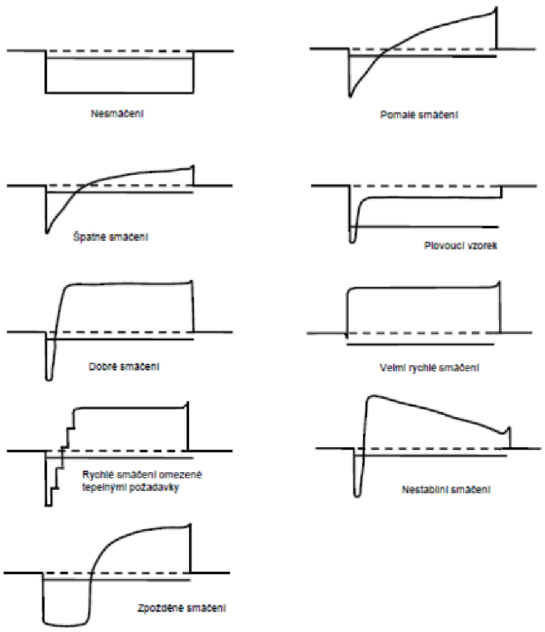
Etapa C – Jedná se o fázi, kdy kontaktní úhel mezi pájkou a vzorkem je roven 90° tedy je kolmý. Díky tomu na vzorek již nepůsobí povrchové napětí pájky ve vertikálním směru. Setrvává zde vztlaková síla působící stále v horizontálním směru a má za následek na vzlínání pájky na povrch vzorku. Zde již dochází k překračování kontaktního úhlu přes 90°.

Etapa D – Bod maximálního smočení vzorku, kdy pájka na vzlíná do určité výšky H nad úroveň hladiny. Kontaktní úhel poklesl na svou nejnižší úroveň a dochází k plnému vyrovnání teplot mezi pájkou a kontaktem.

Etapa E – Jedná se o oblast již nezajímavou z pohledu měření. Nejvyšší bod na křivce je vytvořen mechanickým oddělováním vzorku od lázně.

Etapa F – Oblast beze změn, jelikož již vzorek není v žádném kontaktu s pájkou. Hodnota měřené síly není nulová z důvodu nabalení určitého množství pájky na vzorek čímž došlo k navýšení hmotnosti vzorku od počátku měření.

Etapa 7 – Jedná se o oblast, kdy dochází k postupnému odsmáčení navzlínané pájky na povrch vzorku. Dochází k zpětnému navyšování kontaktního úhlu.
[2][3]



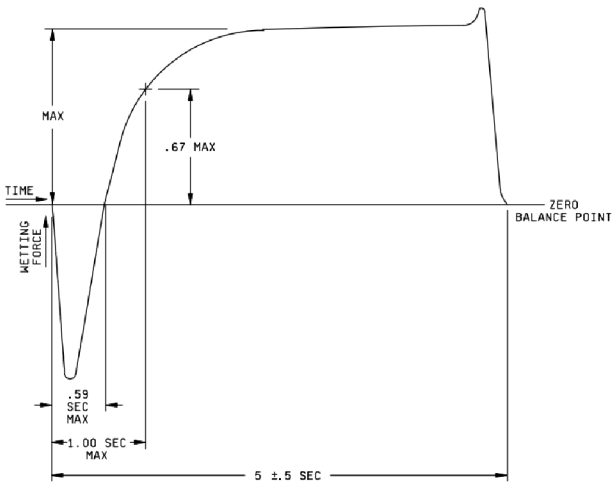
Obrázek 3.2 Smáčecí charakteristiky [3]

3.2 Vyhodnocení smáčecích charakteristik

Jsou různé metody vyhodnocení smáčecí charakteristiky a různé normy zaujímají rozdílné postoje.

MIL-STD-883 Revision K změna 3, metoda 2022.3 z roku 2018

- Měřená křivka musí projít korigovanou nulou nejpozději v čase 0,59 s od počátku měření.
- Měřená křivka musí dosáhnout dvou třetin své maximální hodnoty do doby 1 s nebo kratší. [16]



Obrázek 3.3 Parametry kvalitního smočení dle normy MIL-STD-883 [16]

ANSI/J-STD-002 z roku 1992 (IPC-1-002149 z roku 1992)

- *průchod korigovanou nulovou osou (okamžik vyrovnání vztlakové a smáčecí síly) v čase do 1 s od začátku měření*
- *dosažení hodnoty smáčecí síly F200 (síla mající hodnotu 200 mN na každý 1 mm obvodu vývodu) v čase do 2,5 s od začátku měření*
- *smáčecí síla zůstane nad hodnotou síly z předcházejícího ustanovení alespoň 4,5 s od začátku měření*

IPC-S-805

- *změna znaménka smáčecí síly v čase nejpozději 0,6 s od začátku měření*
- *dosažení 3/4 maximální smáčecí síly v čase nejpozději 2 s od začátku měření*

IEC 68-2-54 z roku 1985

- *Tento standard nepředepisuje konkrétní údaje o časech a silách ve fázi počátečního smáčení vzorku. Pájitelnost se hodnotí poměrem síly těsně před vytažením k maximální dosažené smáčecí síle v průběhu jednoho měření. Tento poměr nesmí klesnou pod 0,8.*[15]

A-89-400

- Teplota pájecí lázně 235 °C
- Tavidlo: 32 g kalafuny, 96 g 2-propanolu a 0,499 g diethylamine chorhydrat
- Doba ponoření vzorku do pájky 3 s
- Počet opakování měření 10x

Tabulka 3.1 Pájecí třídy normy A-89-400

Pájecí třída	Smáčecí úhel
1	$\Theta \leq 30$
2	$\Theta \leq 40$
3	$\Theta \leq 55$
4	$\Theta > 55$
Θ smáčecí úhel každého vzorku	

- Pokud se jedno z měření odchýlí z kategorie musí být provedeno opravné měření na 5 vzorcích.
- Odsmáčení v 8 sekundě měření musí být smáčecí síla větší nebo rovna smáčecí síle odpovídající hodnotě ve 3sekundě měření
- Rychlost ponoru 20–30 mm/s
- Hloubka ponoru 4 nebo 2 mm

IEC 68-2-69

- Za jednu sekundu musí křivka dosáhnout 2/3 svého maxima od průchodu nulou.
- Dosáhnutí minimální síly v čase 2 a 5 s.

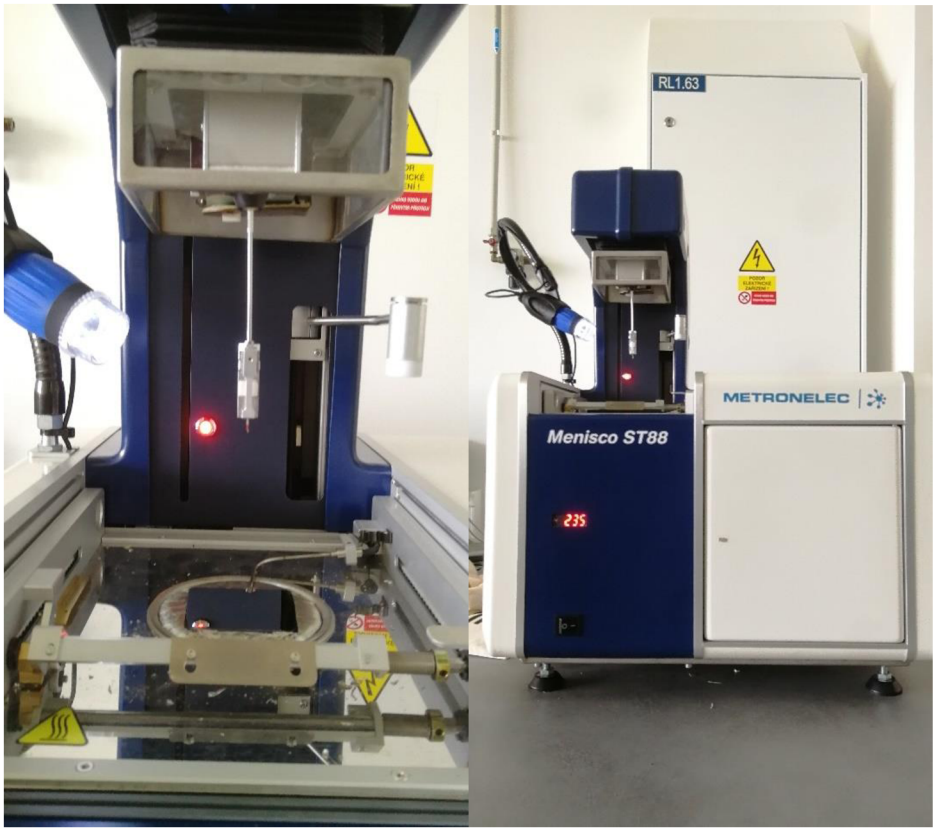
IPC/ANSI/J-STD-002/3

- Průchod korigovanou nulu do 1 s.
- Za jednu sekundu musí křivka dosáhnout 2/3 svého maxima od průchodu nulou.
- Dosáhnutí minimální síly v čase 2 a 5 s.

4. PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 Test s olovnatou pájkou

Testy byly prováděny na automatickém testeru pájitelnosti METRONELEC Menisco ST88. Teplota pájky byla nastavena na 235 °C. Doba ponoru byla nastavena na 5 s s rychlostí ponoru 10 mm/s a rychlostí vynoření 10 mm/s.



Obrázek 4.1 Testovací aparatura METRONELEC Menisco ST88

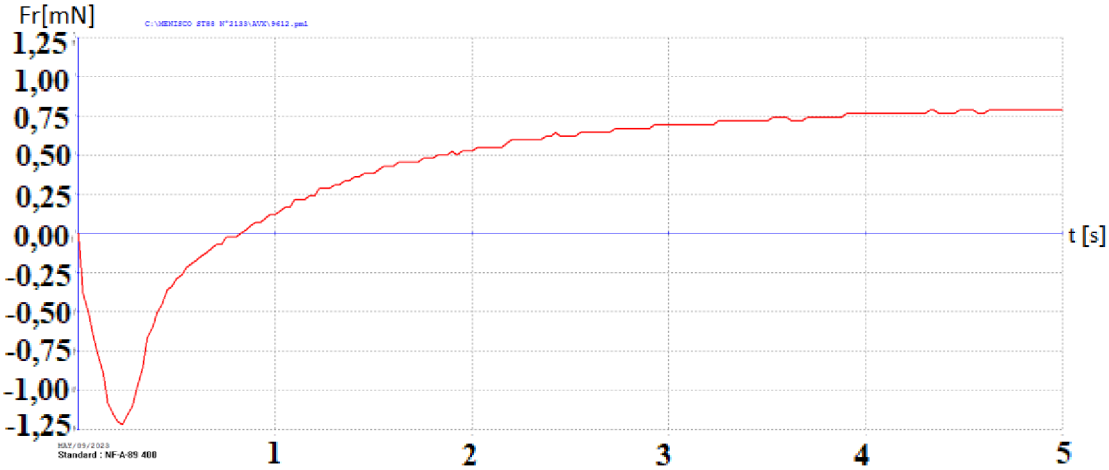
Byly testovány vzorky s kódovým označením 9612. Použité tavidlo bylo vytvořeno podle normy A89-400. Přírodní pryskyřice 32 g, izopropylalkohol 96 g a 0,499 g dietylaminu. Použitá pájka byla olovnatá s poměrem 60 % cínu a 40 % olova. Rozměry vzorku byly 7,5 mm na 7,7 mm s hloubkou ponoru 3 mm.

Obrázek 4.2 Testované piny 9612 před a po měření

Byly provedeny testy smáčivosti pomocí metody smáčecích vah na 5 pinech testovaného vzorku 9612. Výsledné smáčecí charakteristiky jsou uvedeny v přílohách.

Tabulka 4.1 Výsledky smáčecích charakteristik – Olovo

	F_W [mN]	F_A [mN]	F_{MAX} [mN]	t_0 [s]	$t_{2/3}$ [s]
1	1,2	13,85	0,79	0,8	1,9
2	1,19	13,85	0,79	0,8	2,1
3	1,31	13,85	0,71	1,1	1,9
4	1,29	13,85	0,7	1	2,2
5	1,27	13,85	0,59	1,1	2,3



Obrázek 4.3 Smáčecí charakteristika 1 pinu

4.2 Test s bezolovnatou pájkou SAC305

Nastavení meniskografu:

Teplota pájky 245 °C
Doba měření 20 s
Krok 25 ms
Hloubka ponoru 2 mm
Rychlost ponoru 21 mm/s
Rychlost vynoření vzorku 21 mm/s
Povrchové napětí tavidla 415 mN/m

Tabulka 4.2 Přehled rozměrů a povrchových úprav testovaných vzorků

Vzorek	Šířka [mm]	Hloubka [mm]	Délka [mm]	Povrchová úprava
9364	0,79	0,75	26,00	SnPb 95/5
9545	0,60	0,59	35,80	SnPb 95/5
9612	0,76	0,74	10,80	Sn
9624Big	1,40	0,59	12,65	In
9624Press	0,58	0,57	13,23	In

Tabulka 4.3 Naměřené časy podmínek norem

Vzorek	Průchod korigovanou nulou do 1 s					Dosažení 2/3 Fmax do 1 s				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
9364	0,625	0,55	0,55	0,525	0,6	0,21	0,28	0,42	0,34	0,36
9545	0,525	0,45	0,5	0,5	0,425	0,47	0,31	0,43	0,32	0,25
9612	0,825	0,9	0,875	0,8	0,775	0,67	2,5	0,89	0,81	0,68
9624big	0,675	0,7	0,675	0,7	0,675	1,22	0,71	0,64	0,42	0,67
9624press	0,525	0,35	0,375	0,4	0,5	0,24	0,14	0,15	0,14	0,21
Vzorek	Průchod nulou do 0,6 s					Dosažení 2/3 Fmax do 2 s				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
9364	0,625	0,55	0,55	0,525	0,6	0,21	0,28	0,42	0,34	0,36
9545	0,525	0,45	0,5	0,5	0,425	0,47	0,31	0,43	0,32	0,25
9612	0,825	0,9	0,875	0,8	0,775	0,67	2,5	0,89	0,81	0,68
9624big	0,675	0,7	0,675	0,7	0,675	1,22	0,71	0,64	0,42	0,67
9624press	0,525	0,35	0,375	0,4	0,5	0,24	0,14	0,15	0,14	0,21

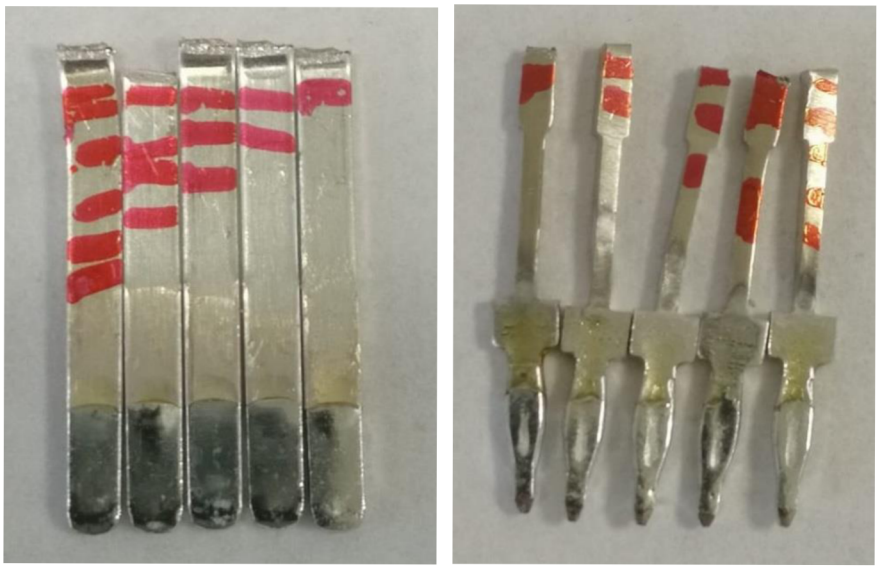
Tabulka 4.4 Hodnoty smáčecího úhlu

	Smáčecí úhel				
	1	2	3	4	5
9364	0	0	0	0	0
9545	17	14	13	13	9
9612	27	47	30	33	23
9624big	44	42	42	39	43
9624press	0	0	0	0	0

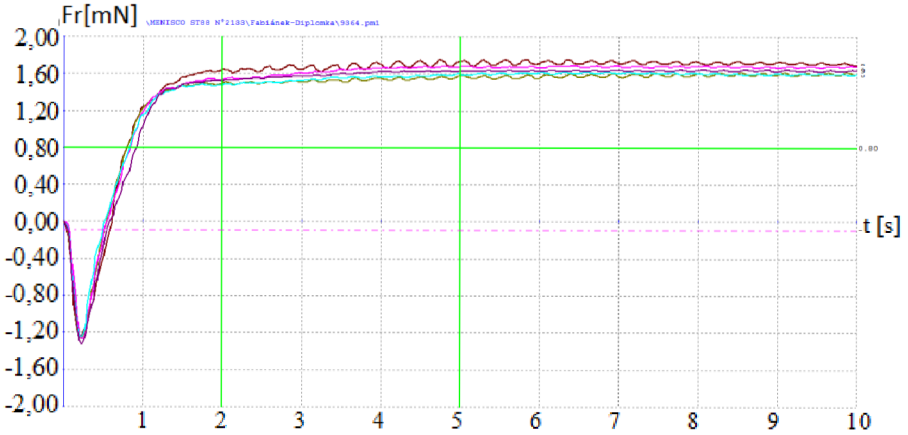
Tabulka 4.5 Vyhodnocení vzorků vůči jednotlivým normám

Normy	9364					9545				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
MIL-STD-883C	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
A-89-400	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1	1	1	1	1
IPC-S-805	Fail	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
IPC-STD-002/3	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Normy	9612					9624Big				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
MIL-STD-883C	Pass	Fail	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
A-89-400	1	3	1	2	3	3	3	3	2	3
IPC-S-805	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail
IPC-STD-002/3	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail
Normy	9624press									
	1	2	3	4	5					
MIL-STD-883C	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass					
A-89-400	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A					
IPC-S-805	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass					
IPC-STD-002/3	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass					

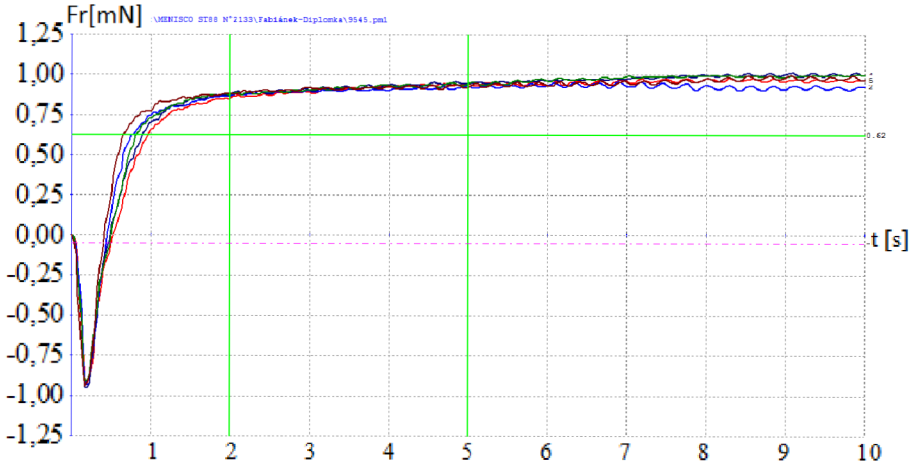
Obrázek 4.4 Testované piny 9364, 9545 a 9612 po měření



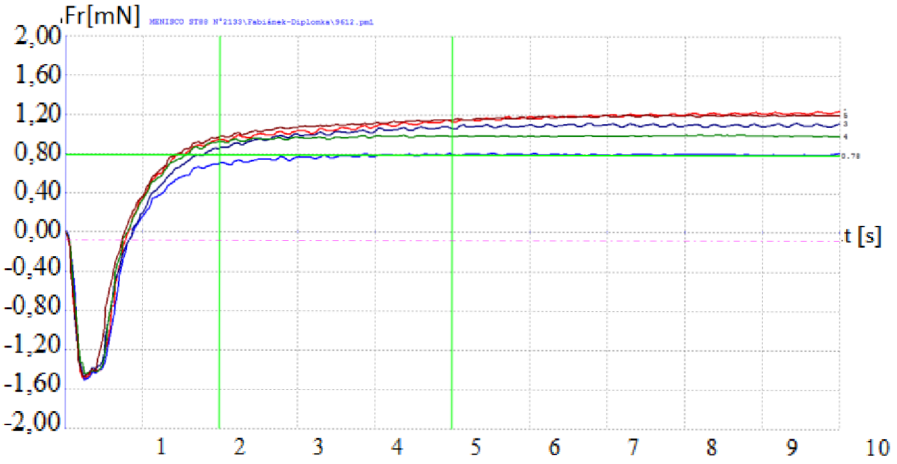
Obrázek 4.5 Testované piny 9624Big a 9624press po měření



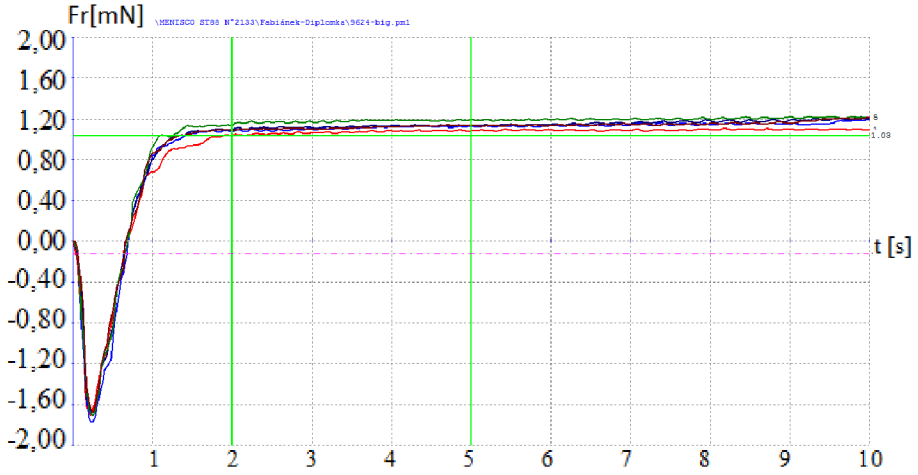
Obrázek 4.6 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9364



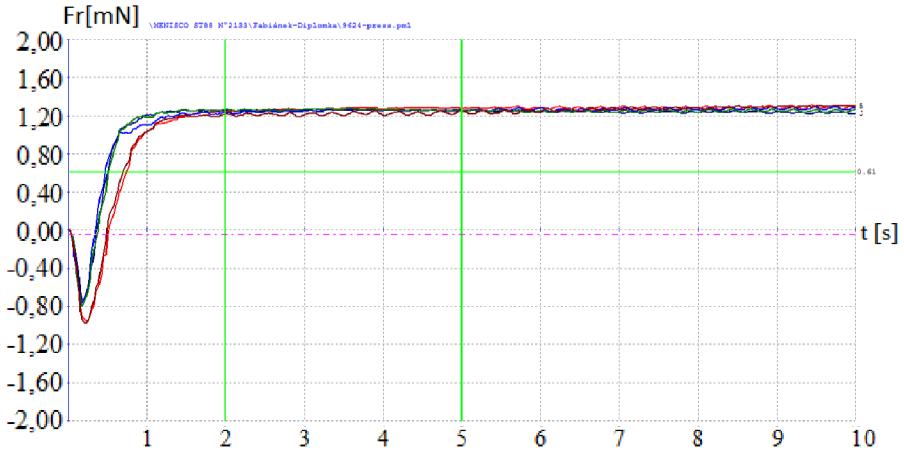
Obrázek 4.7 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9545



Obrázek 4.8 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9612



Obrázek 4.9 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9624big



Obrázek 4.10 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9624press

4.3 Test s bezolovnatou pájkou SN100C

Nastavení meniskografu:

Teplota pájky 245 °C
Doba měření 20 s
Krok 25 ms
Hloubka ponoru 2 mm
Rychlost ponoru 21 mm/s
Rychlost vynoření vzorku 21 mm/s
Povrchové napětí tavidla 415 mN/m

Tabulka 4.6 Přehled rozměrů a povrchových úprav testovaných vzorků

Vzorek	Šířka [mm]	Hloubka [mm]	Délka [mm]	Povrchová úprava
9364	0,79	0,75	26,00	SnPb 95/5
9545	0,60	0,59	35,80	SnPb 95/5
9612	0,76	0,74	10,80	Sn
9624Big	1,40	0,59	12,65	In
9624Press	0,58	0,57	13,23	In

Tabulka 4.7 Naměřené časy podmínek norem

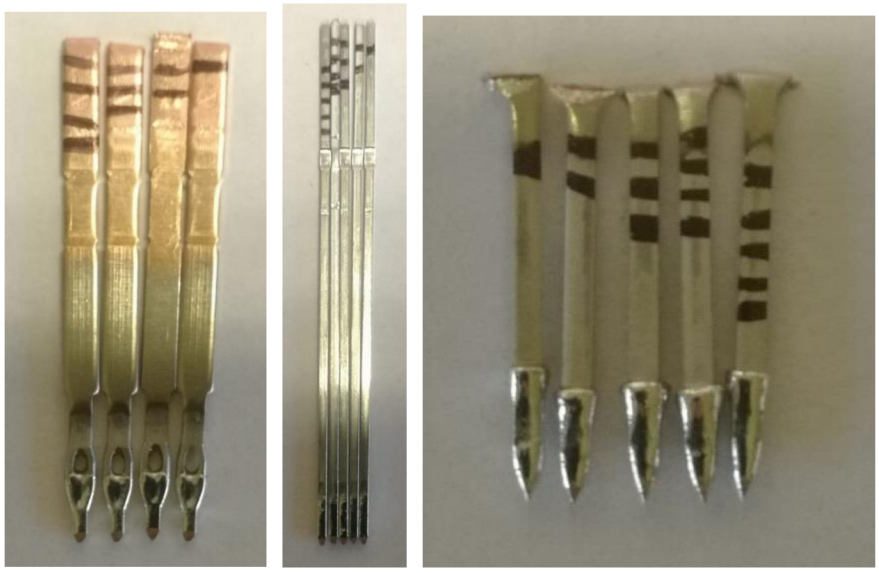
Vzorek	Průchod korigovanou nulou do 1 s					Dosažení 2/3 Fmax do 1 s				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
9364	1,35	1,425	1,25	1,3	N/A	0,6	0,65	0,71	0,49	N/A
9545	0,775	0,775	0,775	0,725	0,725	0,5	0,5	0,47	0,49	0,41
9612	2	N/A	N/A	N/A	2,55	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
9624big	0,85	1,1	0,775	0,75	N/A	1,04	1,4	0,58	1,16	N/A
9624press	0,5	0,625	0,55	0,6	N/A	0,21	0,32	0,22	0,26	N/A
Vzorek	Průchod nulou do 0,6 s					Dosažení 2/3 Fmax do 2 s				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
9364	1,35	1,425	1,25	1,3	N/A	0,6	0,65	0,71	0,49	N/A
9545	0,775	0,775	0,775	0,725	0,725	0,5	0,5	0,47	0,49	0,41
9612	2	N/A	N/A	N/A	2,55	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
9624big	0,85	1,1	0,775	0,75	N/A	1,04	1,4	0,58	1,16	N/A
9624press	0,5	0,625	0,55	0,6	N/A	0,21	0,32	0,22	0,26	N/A

Tabulka 4.8 Hodnoty smáčecího úhlu

	Smáčecí úhel				
	1	2	3	4	5
9364	0	0	0	0	N/A
9545	23	23	20	19	19
9612	71	103	98	93	76
9624big	41	44	38	40	N/A
9624press	0	0	0	0	N/A

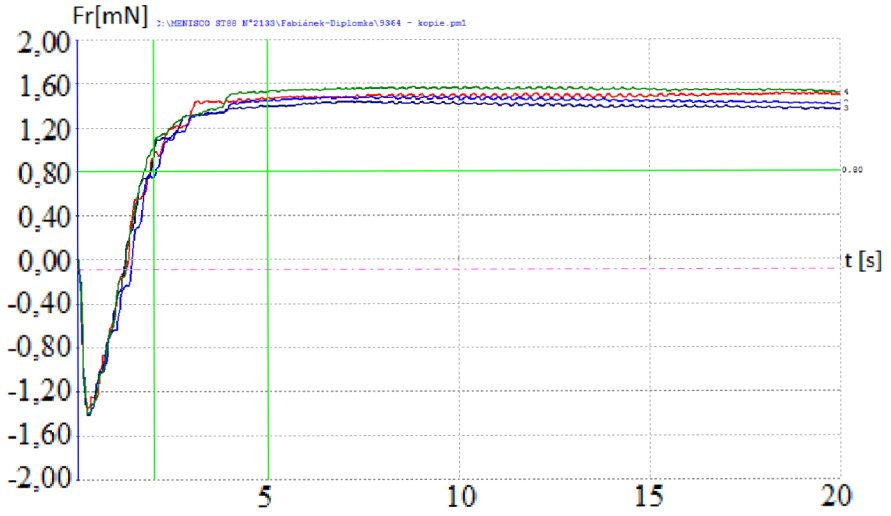
Tabulka 4.9 Vyhodnocení vzorků vůči jednotlivým normám

Normy	9364					9545				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
MIL-STD-883C	Fail	Fail	Fail	Fail	N/A	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
A-89-400	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1	1	1	1	1
IPC-S-805	Fail	Fail	Fail	Fail	N/A	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail
IPC-STD-002/3	Fail	Fail	Fail	Fail	N/A	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail
Normy	9612					9624Big				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
MIL-STD-883C	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Pass	Fail	Pass	Pass	N/A
A-89-400	4	4	4	4	4	3	3	3	2	N/A
IPC-S-805	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	N/A
IPC-STD-002/3	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	N/A
Normy	9624press									
	1	2	3	4	5					
MIL-STD-883C	Pass	Pass	Pass	Pass	N/A					
A-89-400	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A					
IPC-S-805	Pass	Fail	Pass	Pass	N/A					
IPC-STD-002/3	Pass	Pass	Fail	Pass	N/A					

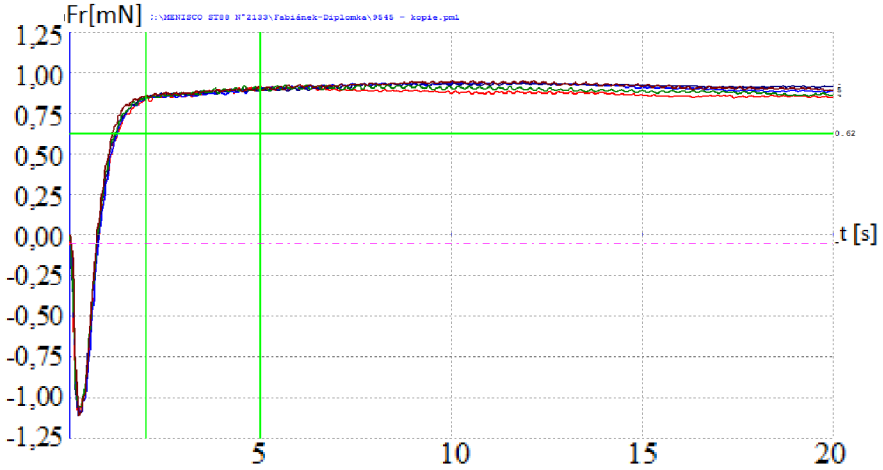


Obrázek 4.11 Testované piny 9364, 9545 a 9612 po měření

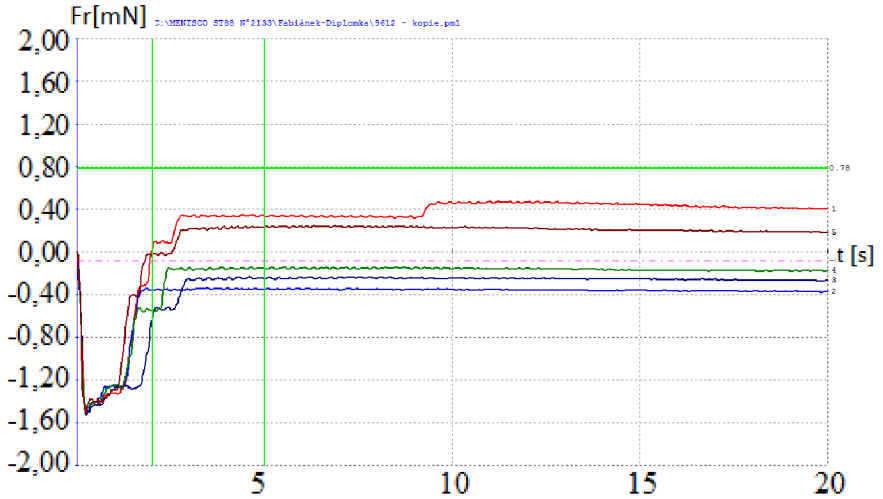
Obrázek 4.12 Testované piny 9624Big a 9624press po měření



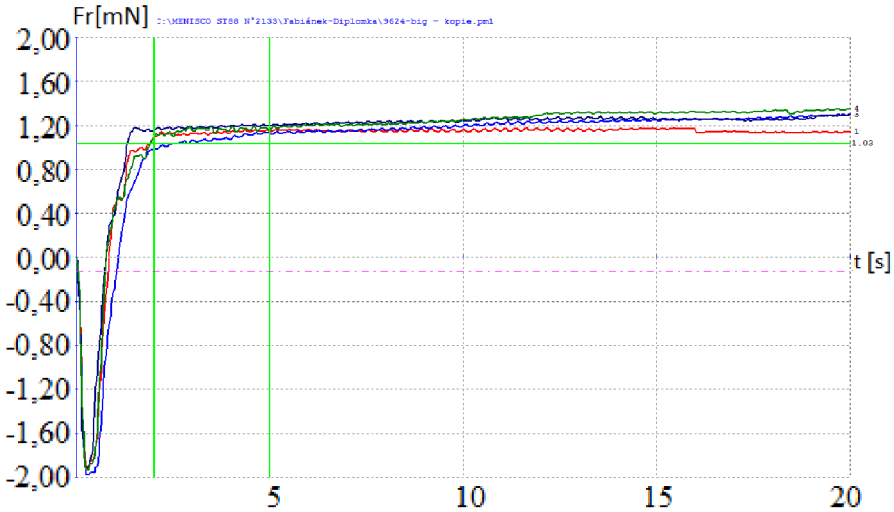
Obrázek 4.13 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9364



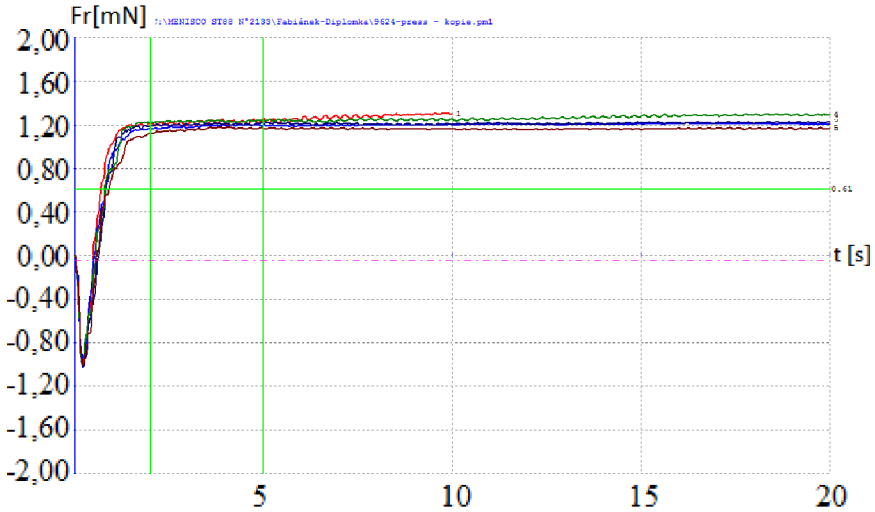
Obrázek 4.14 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9545



Obrázek 4.15 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9612



Obrázek 4.16 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9624big



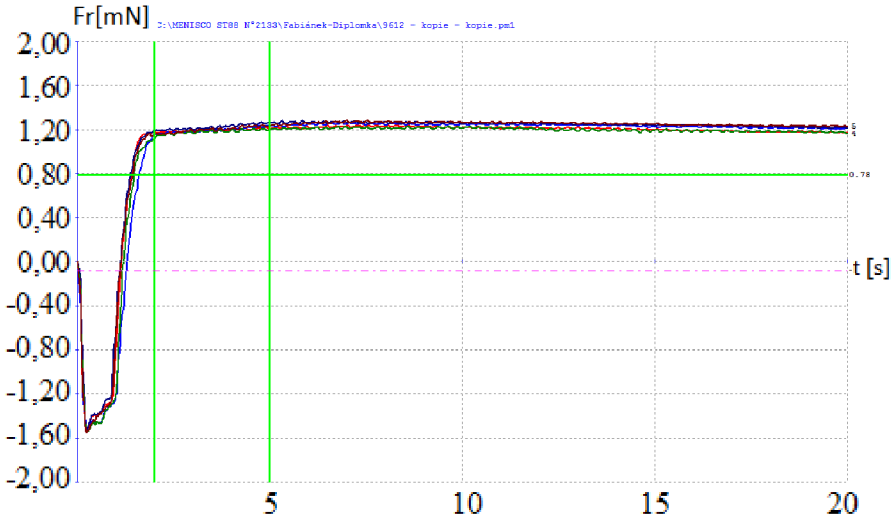
Obrázek 4.17 Srovnání smáčecích charakteristik vzorku 9624press

4.4 Test odvodu tepla ze vzorku do konstrukce meniskografu

V důsledku neobvyklých výsledků smáčecích charakteristik na vzorcích 9612 u pájky SN100C byla hliníková hlavice na ukotvení vzorku doplněna o izolační vrstvu v podobě kaptonovy pásky.

Obrázek 4.18 Doplnění izolační vrstvy na hliníkovou hlavici

V důsledku vložení kaptonové vrstvy došlo k snížení tepelné vodivosti a tím i odvodu tepla do vzorku z původní hodnoty tepelné vodivosti hlinku 237 W/mK na tepelnou vodivost kaptonu 0,16 W/mK.



Obrázek 4.19 Smáčecí charakteristiky vzorku 9612 s doplněnou kaptonovou vrstvou

Tabulka 4.10 Srovnání vzorků 9612 s tepelnou izolací a bez tepelné izolace

	Průchod nulou [s]					F_{max} [mN]				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
S izolací	1,15	1,3	1,125	1,2	1,125	1,24	1,26	1,28	1,23	1,28
Bez izolace	2	N/A	N/A	N/A	2,55	0,47	-0,05	-0,02	-0,05	0,24

Snížením odvodu tepla do povrchu hlavice meniskografu došlo k vyrovnání všech charakteristik. Časy průchodu nulou se snížily a maximální smáčecí síla vzrostla z původních F_{max} = 0,47 mN až na hodnotu F_{max} = 1,28 mN.

4.5 Test smáčivosti při rozdílné tloušťce povrchové úpravy

Nastavení meniskografu:

Teplota pájky 245 °C
Doba měření 20 s
Krok 25 ms
Hloubka ponoru 2 mm
Rychlost ponoru 21 mm/s
Rychlost vynoření vzorku 21 mm/s
Povrchové napětí tavidla 415 mN/m

Tabulka 4.11 Doplňující údaje o testovaných vzorcích

Vzorek	Šířka [mm]	Hloubka [mm]	Délka [mm]	Nikl [µm]*	Indium [µm]*
A	0,738	0,966	29,8	1,3	0,9
B	0,596	0,788	26,8	1,2	0,4
C	0,738	0,966	29,8	0,9	0,7
D	0,588	0,7	36,8	1,3	0,8
E	0,588	0,7	36,8	1,5	0,9
F	0,588	0,7	36,8	1,5	0,9

* Hodnoty uvedené výrobcem

4.5.1 Smáčení s pájkou SAC305

Tabulka 4.12 Smáčecí úhel v pájce SAC305 v čase t = 5 s

Vzorek	1	2	3	4	Průměr
A	0	0	0	0	0
B	17	28	7	0	13
C	0	0	0	0	0
D	36	0,34	26	28	22,59
E	26	14	0	0	10
F	0	0	0	0	0

Tabulka 4.13 Maximální dosažená smáčecí síla

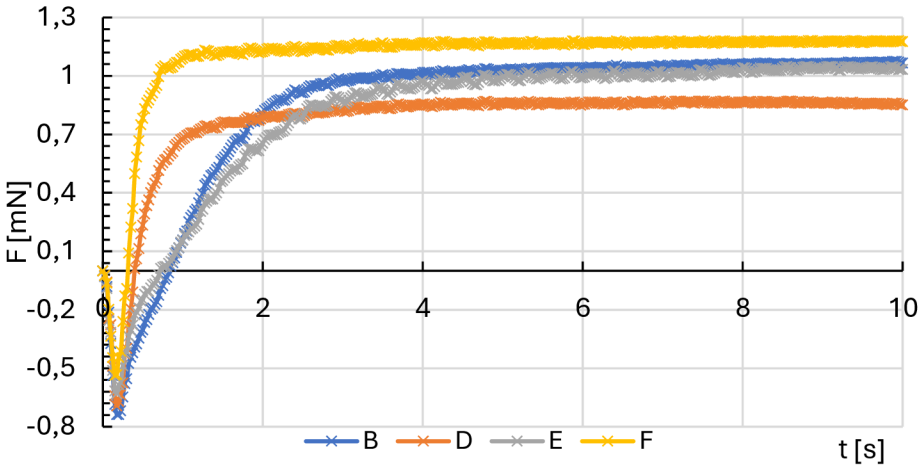
Vzorek	1	2	3	4	Průměr
A	1,76	1,45	1,67	1,65	1,63
B	1,07	1,01	1,09	1,14	1,08
C	1,59	1,56	1,65	1,55	1,59
D	0,83	0,89	0,91	0,89	0,88
E	0,93	1,11	1,12	1,11	1,07
F	1,19	1,18	1,22	1,17	1,19

Tabulka 4.14 Čas průchodu nulou

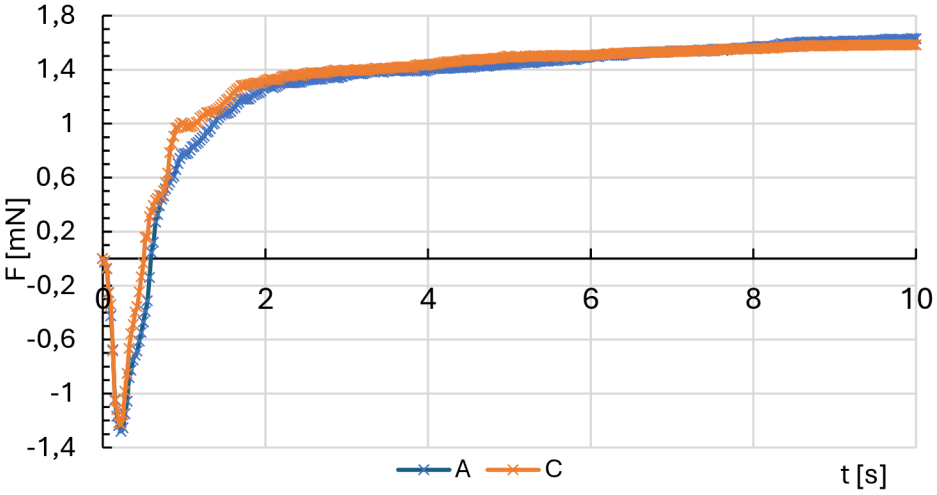
Vzorek	1	2	3	4	Průměr
A	0,6	0,65	0,525	0,575	0,588
B	0,75	0,85	0,85	0,825	0,819
C	0,675	0,775	0,475	0,5	0,606
D	0,425	0,375	0,375	0,45	0,406
E	0,725	0,875	0,8	0,6	0,750
F	0,3	0,3	0,25	0,325	0,294

Tabulka 4.15 Čas potřebný k dosažení 2/3 maximální smáčecí síly

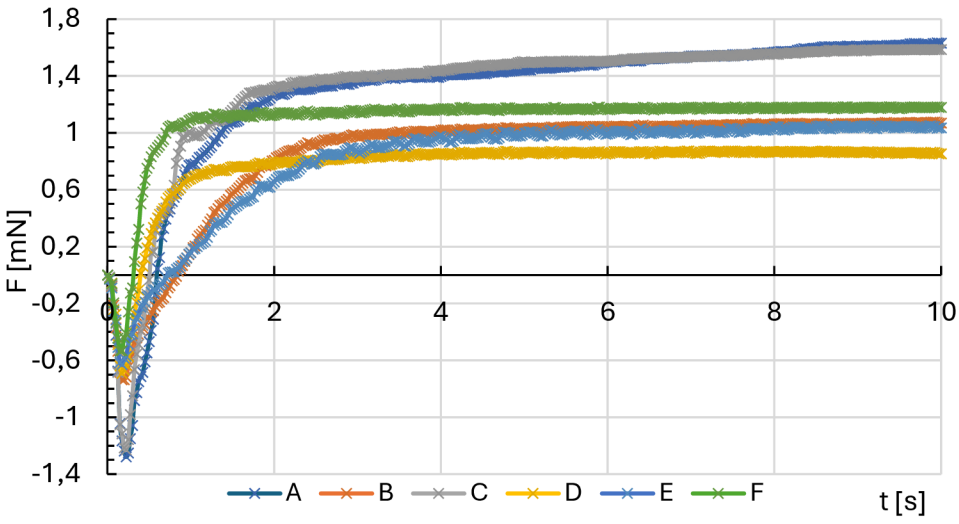
Vzorek	1	2	3	4	Průměr
A	1,6	1,375	1,575	1,625	1,544
B	1,55	1,95	1,75	1,95	1,800
C	0,875	1,425	1,2	1,25	1,188
D	0,8	0,675	0,7	0,95	0,781
E	1,775	3,3	2,025	1,95	2,263
F	0,6	0,45	0,425	0,575	0,513



Obrázek 4.20 Srovnání průměrných smáčecích charakteristik vzorků B, D, E, F

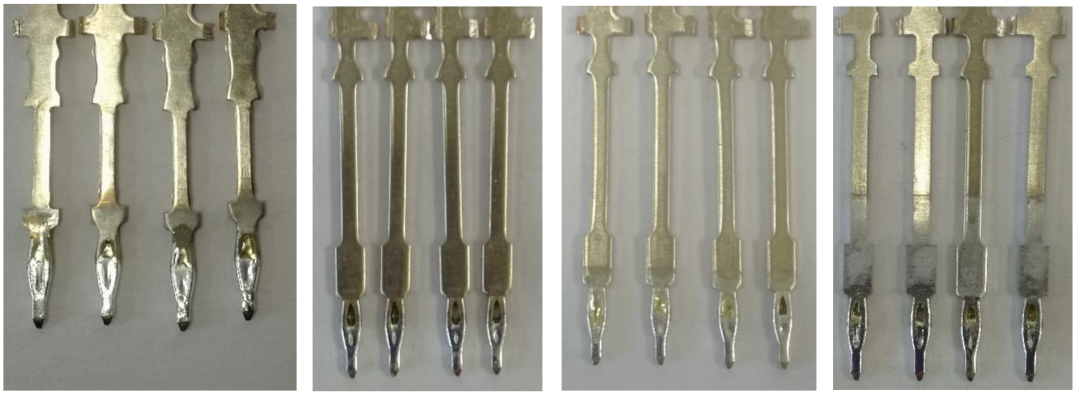


Obrázek 4.21 Srovnání průměrných smáčecích charakteristik vzorků A, C



Obrázek 4.22 Srovnání průměrných smáčecích charakteristik všech testovaných vzorků

Obrázek 4.23 Testované vzorky A a C



Obrázek 4.24 Testované vzorky B, D, E, F

4.5.2 Smáčení s pájkou SN100C

Tabulka 4.16 Smáčecí úhel v pájce SN100C v čase t = 5 s

Vzorek	1	2	3	4	Průměr
A	0	0	0	0	0
B	0	31	25	33	22,25
C	0	0	0	0	0
D	0	0,36	30	31	15,34
E	0	20	0	0	5
F	0	0	17	0	4,25

Tabulka 4.17 Maximální dosažená smáčecí síla

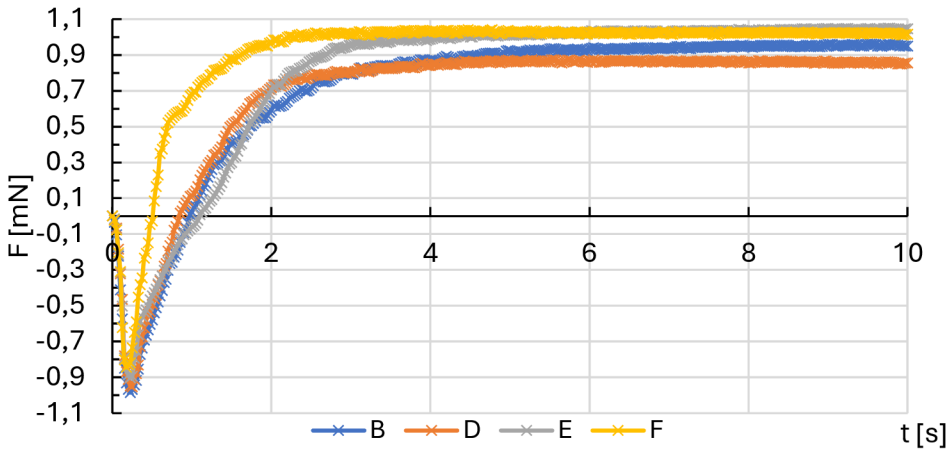
Vzorek	1	2	3	4	Průměr
A	1,26	1,4	1,31	1,26	1,31
B	0,98	0,95	0,98	0,95	0,97
C	1,37	1,46	1,44	1,48	1,44
D	0,91	0,91	0,87	0,85	0,89
E	1,03	0,96	1,12	1,15	1,07
F	1,06	1,05	1	1,1	1,05

Tabulka 4.18 Čas průchodu nulou

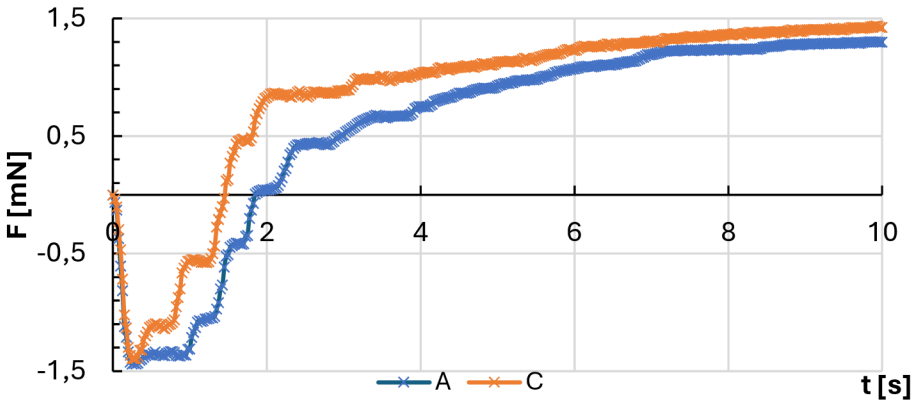
Vzorek	1	2	3	4	Průměr
A	2,15	1,525	2,2	1,825	1,925
B	0,875	1,175	0,975	1	1,006
C	1,825	1,55	1,35	0,85	1,394
D	0,875	0,875	0,825	0,8	0,844
E	1,25	1,125	1,025	1,075	1,119
F	0,5	0,45	0,5	0,5	0,488

Tabulka 4.19 Čas potřebný k dosažení 2/3 maximální smáčecí síly

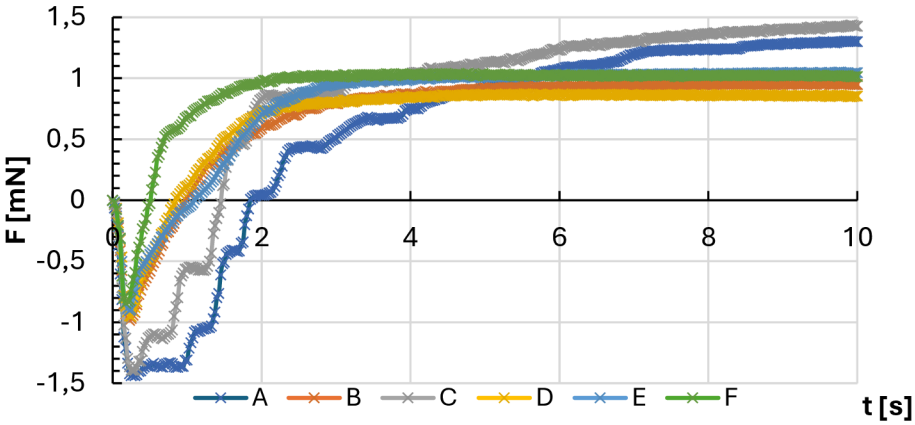
Vzorek	1	2	3	4	Průměr
A	5,025	4,4	4,2	4,45	4,519
B	1,375	2,55	2,475	1,85	2,063
C	3,05	3,15	4	3,825	3,506
D	1,675	1,775	1,575	1,575	1,650
E	2,125	1,925	2,175	1,925	2,038
F	0,625	1,15	1	1,25	1,006



Obrázek 4.25 Srovnání průměrných smáčecích charakteristik vzorků B, D, E, F

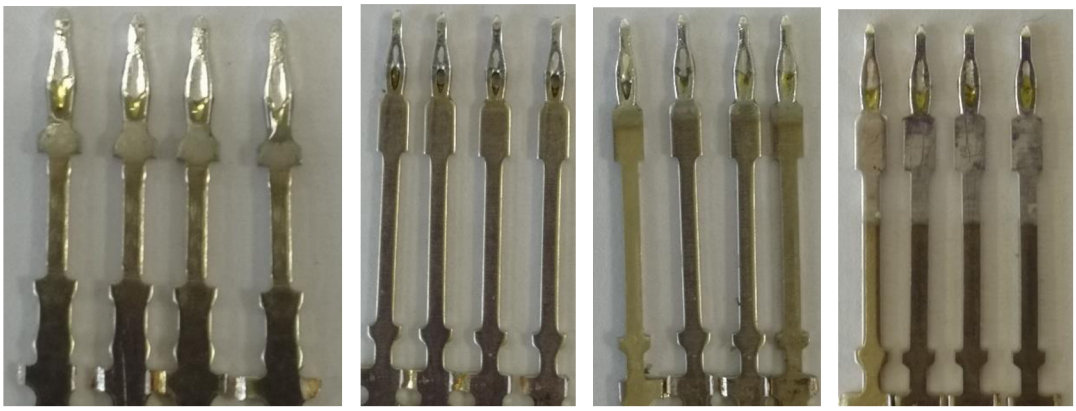


Obrázek 4.26 Srovnání průměrných smáčecích charakteristik vzorků A, C



Obrázek 4.27 Srovnání průměrných smáčecích charakteristik všech testovaných vzorků

Obrázek 4.28 Testované vzorky A a C

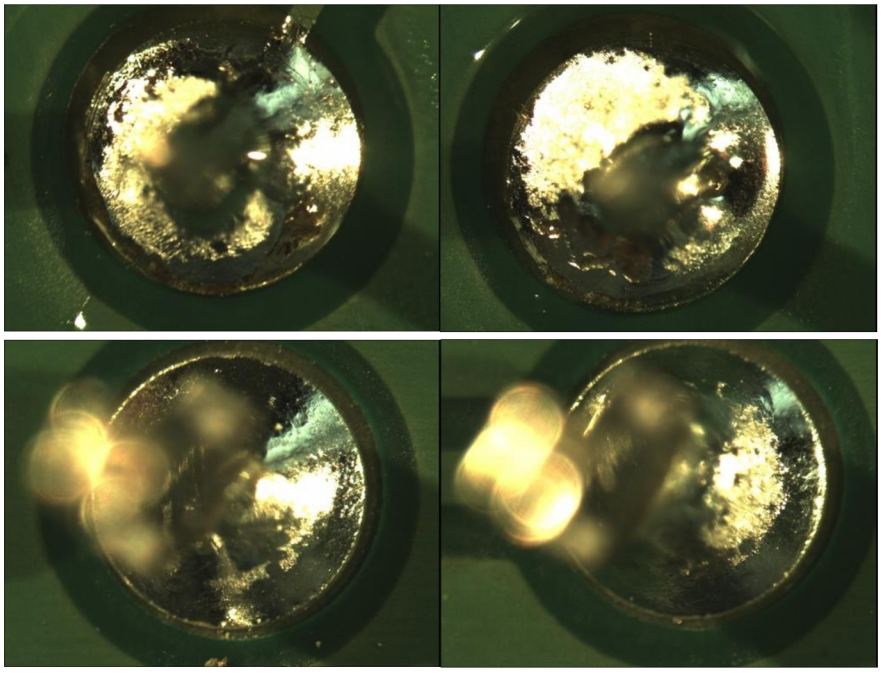


Obrázek 4.29 Testované vzorky B, D, E, F

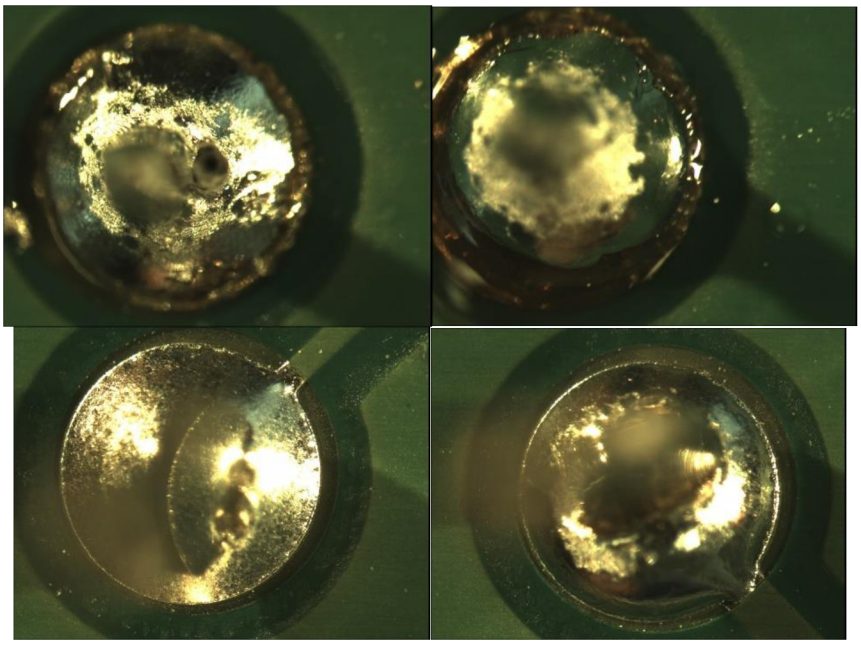
4.6 Test pájitelnosti vývodů

Testování bylo provedeno na dvou vrstvé DPS s povrchovou úpravou bezolovnatý HAL. Testované vývody byly typu B, D, E a F s použitím bezolovnaté pájky SAC305 a SN100C od výrobce BALVER ZINN. Pájecí slitiny byly v provedení trubičkové pájky se shodným typem tavidla REL0 LF2220NO FG 2,2 %. Jednotlivé piny byly pájeny pomocí pájecí stanice MBT by PACE a hrotu typu minivlna PACE 1121-0490. Samotné pájení bylo provedeno za pomocí jednoho centimetru trubičkové pájky, která byla přetavena teplotou ϑ = 360 °C podobu 3s.

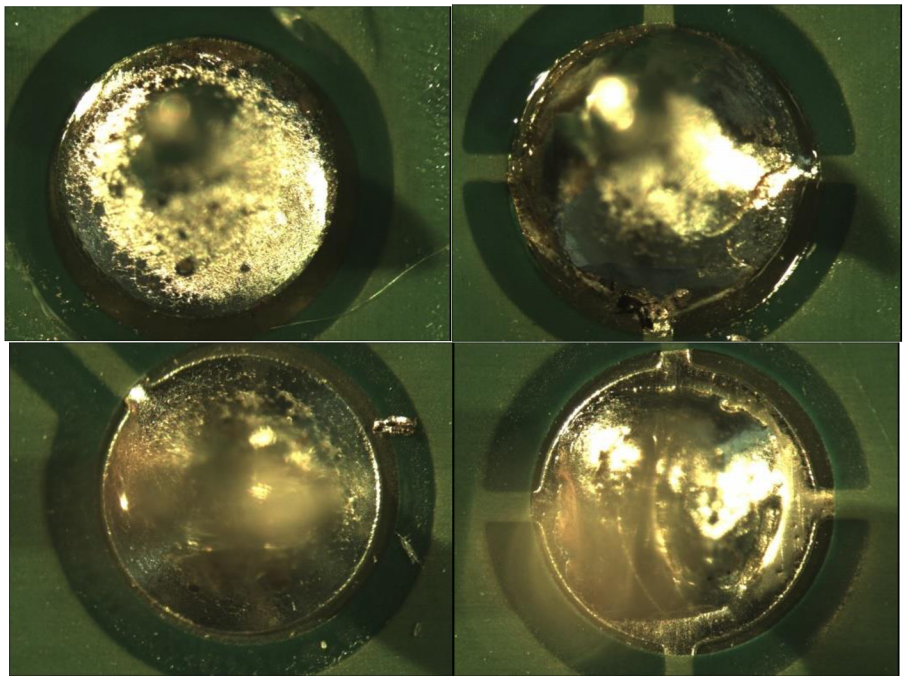
Obrázek 4.30 Pájecí stanice a použitý hrot



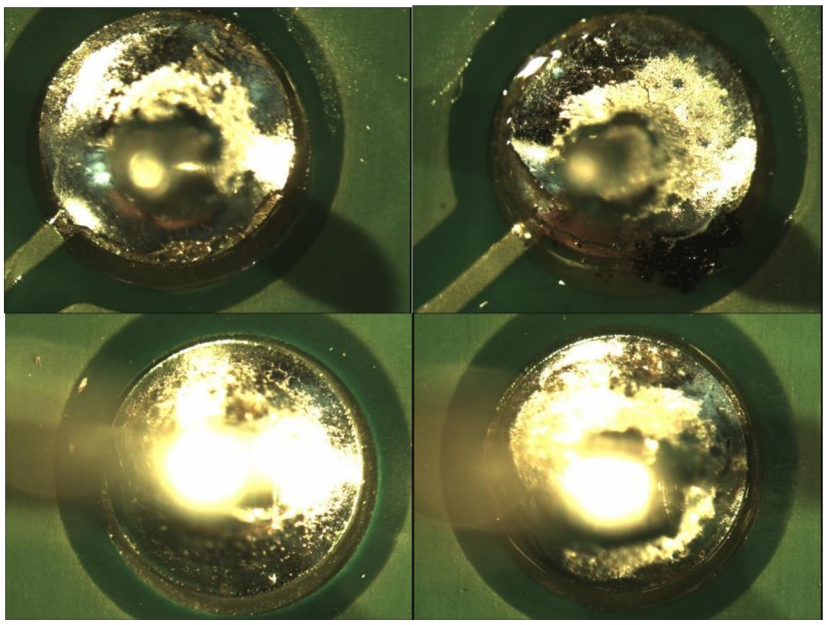
Obrázek 4.31 Vzorky B TOP (horní)a B BOT (spodní) SAC305



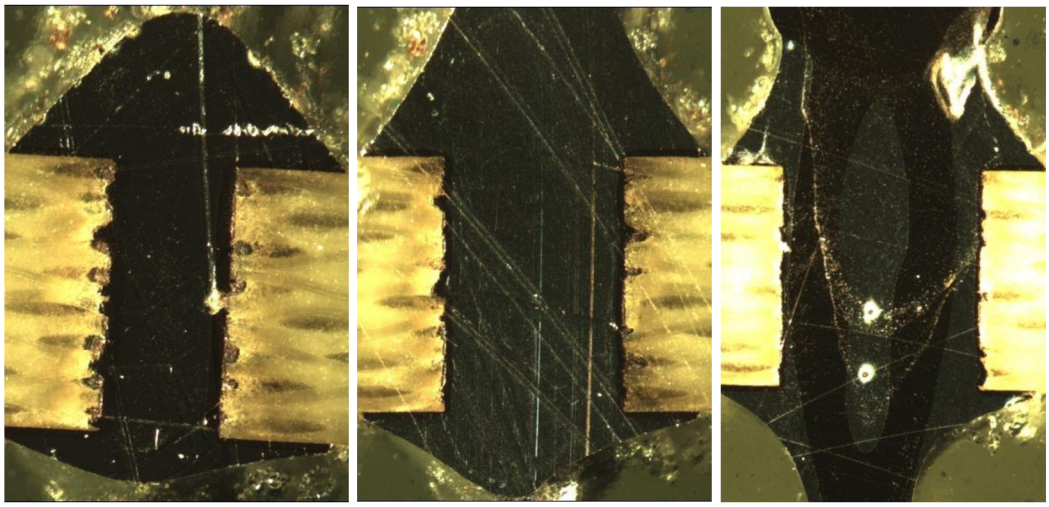
Obrázek 4.32 Vzorky D TOP (horní) a D BOT (spodní) SAC305



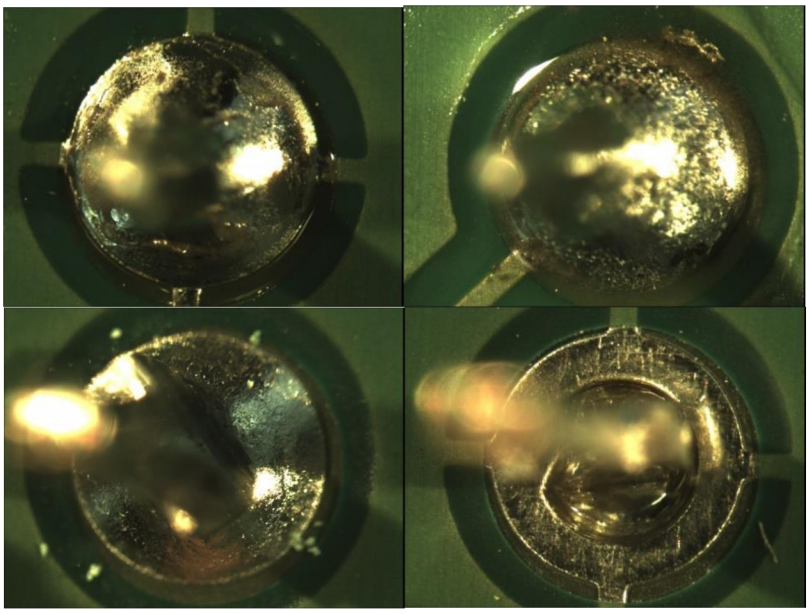
Obrázek 4.33 Vzorky E TOP (horní) a E BOT (spodní) SAC305



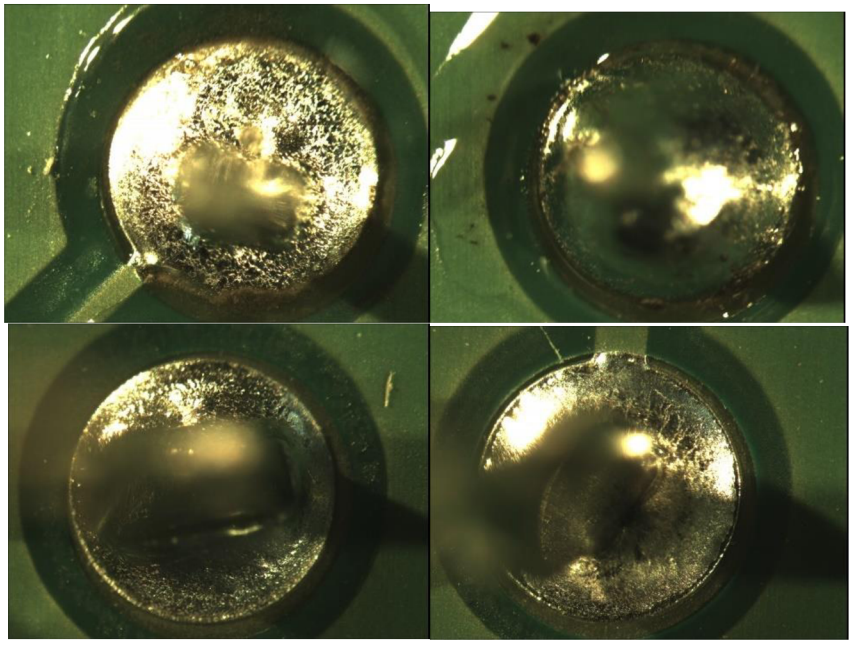
Obrázek 4.34 Vzorky F TOP (horní) a F BOT (spodní) SAC305



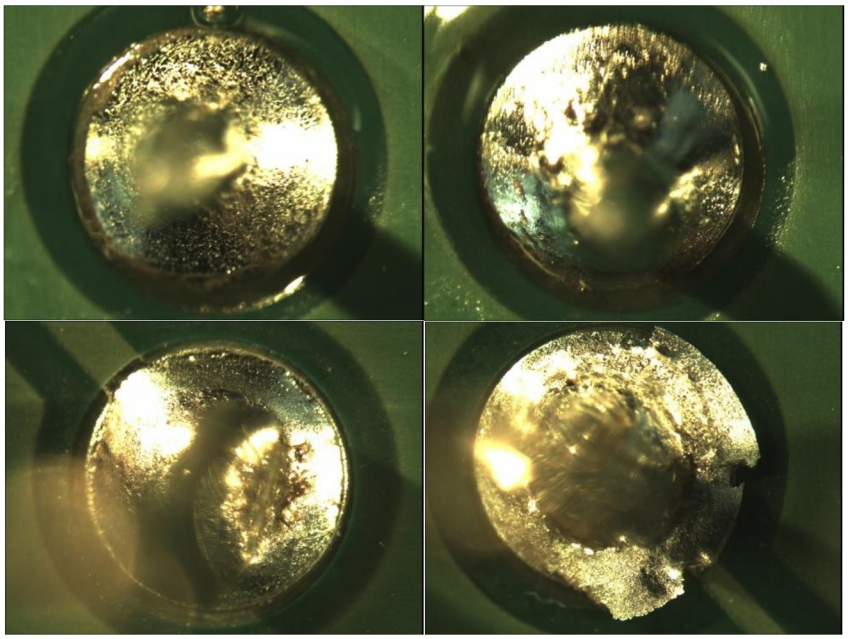
Obrázek 4.35 Mikrovýbrus vzorku F SAC305



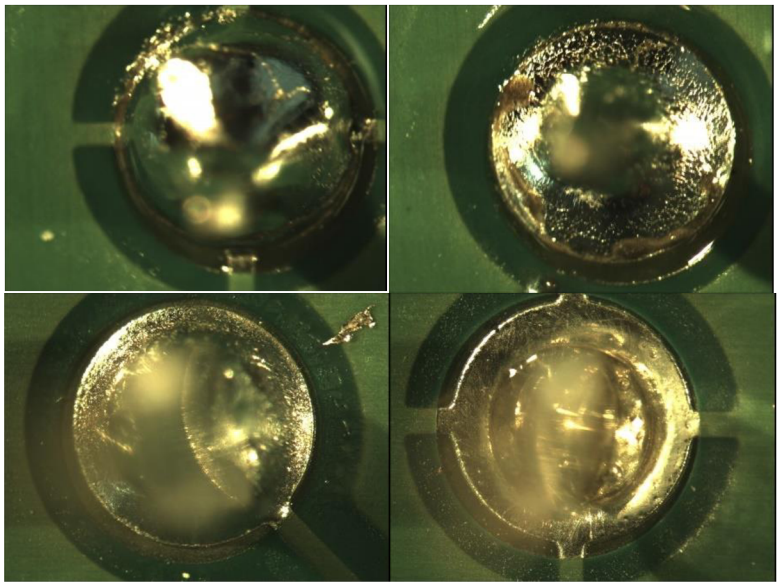
Obrázek 4.36 Vzorky B TOP (horní) a B BOT (spodní) SN100C



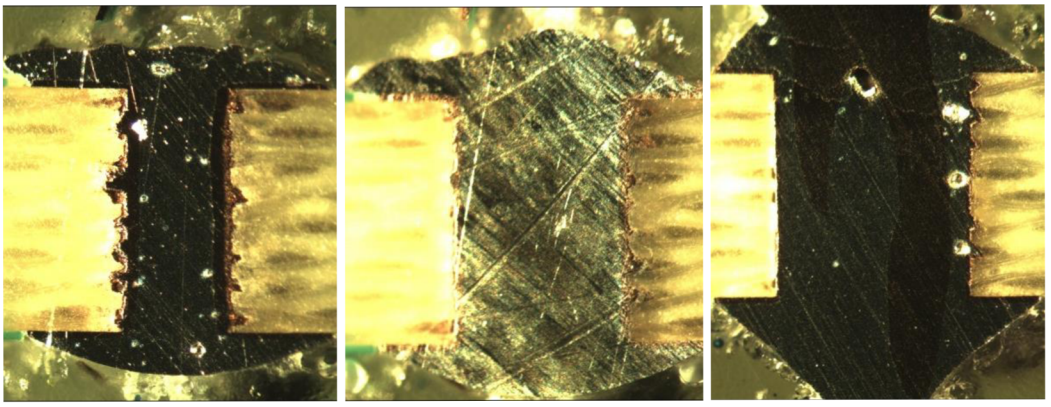
Obrázek 4.37 Vzorky D TOP (horní) a D BOT (spodní) SN100C



Obrázek 4.38 Vzorky E TOP (horní) a E BOT (spodní) SN100C



Obrázek 4.39 Vzorky F TOP (horní) a F BOT (spodní) SN100C



Obrázek 4.40 Mikrovýbrus vzorku F SN100C

Vyhodnocení dle normy IPC-A-610G

a) Výplň pokoveného otvoru
   - Třída 1: Není specifikováno
   - Třída 2: Výplň tvoří alespoň 75 % otvoru
   - Třída 3: Výplň tvoří alespoň 75 % otvoru
b) Obvodové smáčení vývodu na cílové straně
   - Třída 1: Není specifikováno
   - Třída 2: Obvodové smočení kolem vývodu musí být alespoň 180°
   - Třída 3: Obvodové smočení kolem vývodu musí být alespoň 270°
c) Pokrytí plošky pájkou na cílové straně
   - Třída 1: Oblast plošky nemusí být smočena
   - Třída 2: Oblast plošky nemusí být smočena
   - Třída 3: Oblast plošky nemusí být smočena
d) Obvodové smáčení vývodu na zdrojové straně pájky
   - Třída 1: Obvodové smočení kolem vývodu musí být alespoň 270°
   - Třída 2: Obvodové smočení kolem vývodu musí být alespoň 270°
   - Třída 3: Obvodové smočení kolem vývodu musí být alespoň 330°
e) Pokrytí plošky pájkou na zdrojové straně.
   Třída 1: Oblast smáčené plošky musí být alespoň 75%
   Třída 2: Oblast smáčené plošky musí být alespoň 75%
   Třída 3: Oblast smáčené plošky musí být alespoň 75%
   [18]

5. ZÁVĚR

V první části proběhlo seznámení s problematikou tvorby pájeného spoje a jednotlivými fázemi. Zvýšená pozornost byla věnována smáčení povrchu a difuzi jednotlivých kovů. Následovalo seznámení s rastrovací elektronovou mikroskopii, jež bude sloužit pro sledování tvorby intermetalické vrstvy v průběhu smáčení vývodu. Poslední část se věnuje metodě smáčecích vah, která bude použita pro testování kvality tvorby pájeného spoje.

Ve druhé části byly provedeny testy smáčení pinů 9612 s přírodním tavidlem pro olovnatou pájku. Číselné výsledky jsou uvedeny v tabulce 1 ze které vyplývá že žádná ze smáčecích charakteristik pro normu MIL-STD-883 není vyhovující ani v jednom z požadovaných parametrů. Pro evropskou normu IEC 68-2-54 jež není tak přísná, než armádní je toto smočení dostatečné.

Následovaly testy s bezolovnatou pájkou SAC305 na 6 měsíců starých vzorcích s různou povrchovou úpravou a tvarem. Tyto vzorky byly spolu s jejich rozměry uvedeny v Tabulka 4.2. Vzhledem k nedorozumění byly poskytnuty i vzorky s olovnatou povrchovou úpravou. Jedna se o vzory 9364 který je souběžně i pressfit a vzorky 9545.
U vzorků 9364 norma A-89-400 nebyla uvážena, jelikož se jedná o vzorek typu pressfit a dopočet smáčecího úhlu by byl chybný vlivem navzlínané pájky do prostoru vzorku. Ostatní normy byly splněny viz Tabulka 4.5 s tím že vzorek 1 neprošel u normy IPC-S-805 z důvodu pozdního průchodu nulou 0,625 s kdy požadovaný čas je 0,6 s.

Vzorky 9545 splnily všechny sledované normy viz Tabulka 4.5. Jde o vhodnější vzorky na testování smáčivosti, jelikož se zde jedná o čtvercový vývod.

Druhý vzorek z kategorie 9612 jako jediný vykazoval nízkou úroveň smočení 0,8 mN pravděpodobně se jednalo o anomálii, jelikož zbylé vzorky se pohybovaly okolo 1,2 mN viz Obrázek 4.8. Také tento vzorek vykázal pomalé smočení čímž nedodržel podmínku průchodu nulou. Smáčecí úhly se zde zásadně rozcházely viz Tabulka 4.4. Pro možnou kategorizaci vzorku podle normy A-89-400 by bylo potřeba většího množství vzorků. Aktuální zařazení do pájecí třídy na základě průměru výsledků byla 2 což je velmi dobré smáčení. Důvodem selhání u normy IPC-S-805 bylo pomalé smáčení vzorku Tabulka 4.3 podmínka Průchod nulou do 0,6 s. Norma IPC-STD-002/3 nebyla splněna skrze podmínku dosažení minimální síly v čase 2 a 5 sekund.

Vzorky 9624Big splnily podmínky normy MIL-STD-883C. Smáčecí úhel zde byl stabilní viz Tabulka 4.4 byla stanovena pájecí třída 2. Norma IPC-S-805 nebyla splněna z důvodu pozdního průchodu nulou viz Tabulka 4.3. U normy IPC-STD-002/3 první vzorek nesplnil podmínku dosažení dvou třetin své maximální smáčecí síly do jedné sekundy. Dále nebyly splněny podmínky dosažení minimální síly v čase 2 a 5 sekund.
Vzorky 9624Press splnily podmínky pro všechny normy. Norma A-89-400 zde nebyla platná, jelikož navzlínání pájky do prostoru uvnitř vzorku zanáší příliš vysokou chybu do výpočtu smáčecího úhlu.

Druhou testovanou bezolovnatou pájkou byla SN100C. V Tabulka 4.6 jsou uvedeny rozměry a povrchové úpravy vzorků.

Vzorky 9364 nesplnily podmínky žádné normy. Normy MIL-STD-883C, IPC-S-805 i IPC-STD-002/3 nebyly dodrženy vlivem pomalého smočení kdy průchod nulou byl vyšší než je požadován viz Tabulka 4.7. Jelikož se jedná o pressfit konektor norma A-89-400 byla neplatná. Na porovnání smáčecích charakteristik byly patrné záseky, jež byly nejspíše způsobeny odvodem tepla nebo nerovnoměrnou distribucí tepla po vzorku.

Vzorky 9545 splnily podmínky normy MIL-STD-883C. Dle normy A-89-400 byl vzorek zařazen do třídy smáčení 1 tedy nejlepší možné smočení. IPC-S-805 nebyla splněna skrze pozdní průchod nulou a norma IPC-STD-002/3 nebyla splněna skrze podmínku dosažení minimální síly v čase 2 a 5 sekund.

Vzorky 9612 nesplnily žádnou normu. Porovnáním jednotlivých naměřených charakteristik smáčení byly pozorovány velké rozdíly jak v délce prodlevy v pájce, tak v maximální dosažené smáčecí síle. Tři vzorky nedosáhly ani průchodu nulou.

Vzorky 9624Big až na druhý vzorek splnily podmínku normy MIL-STD-883C průchod nulou do 0,6 s. Dle normy A-89-400 byl vzorek zařazen do pájecí třídy 3. Norma IPC-S-805 nebyla splněna z důvodu pozdního průchodu nulou. Dle normy IPC-STD-002/3 nebyla u jednoho vzorku dodržena podmínka průchodu korigovanou nulou v požadovaném čase jedné sekundy. Dále u tří vzorků nebylo dodrženo dosažení dvou třetin maximální síly v čase do jedné sekundy a podmínka dosažení minimální síly v čase 2 a 5 sekund.

U vzorků 9624Press byla splněna norma MIL-STD-883C. Norma A-89-400 zde nebyla uvážena jelikož se jedná o vzorek typu pressfit a dopočet smáčecího úhlu by byl chybný vlivem navzlínané pájky do prostoru vzorku. Normou IPC-S-805 byl jako chybný vyhodnocen pouze vzorek 2 vlivem pozdního průchodu nulou a u normy IPC-STD-002/3 byl jako špatný vyhodnocen vzorek 3 z důvodu nesplnění podmínky dosažení minimální síly v čase 2 a 5 sekund.

Test odvodu tepla ze vzorku prokázal zlepšení charakteristik a celkového průchodu smočení.

Test smáčivosti při různé hodnotě povrchové úpravy pro pájecí slitinu SAC305 prokázal nejvhodnější kombinaci na vzorku F, jež je patrné na srovnání průměrných charakteristik viz Obrázek 4.20. Tato kombinace dosahuje nejrychlejšího průchodu nulou u všech testovaných vzorků a to t = 0,294 s vit Tabulka 4.14. Současně vzorek F dosahuje nejrychlejšího času k dosažení 2/3 maximální smáčecí síly t = 0,513 s viz Tabulka 4.15. Mezi vzorky B, D, E a F dosahuje vzorek F nejvyšší hodnoty smáčecí síly. Při srovnání vzorků A a C se ukazují jako ekvivalentní.

Test smáčivosti při různé hodnotě povrchové úpravy pro pájecí slitinu SN100C prokázal nejvhodnější kombinaci na vzorku F, jež je patrné na srovnání průměrných charakteristik viz Obrázek 4.25. Tato kombinace dosahuje nejrychlejšího průchodu nulou u všech testovaných vzorků a to t = 0,488 s vit Tabulka 4.18. Současně vzorek F dosahuje

nejrychlejšího času k dosažení 2/3 maximální smáčecí síly t = 1,006 s viz Tabulka 4.15. Mezi vzorky B, D, E a F dosahuje nejvyšší hodnoty smáčecí síly vzorek E, avšak pro dosažení vyšší hodnoty smáčecí síly, než vzorek F potřebuje delší časový úsek. Při srovnání vzorků A a C není ani jeden ze vzorků v optimální kombinaci povrchových úprav. Vzorek C vykazuje vhodnější kombinaci viz Obrázek 4.28 přesto však časy průchodu nulou t = 1,394 s a čas dosažení 2/3 maximální síly t = 3,506 s jsou příliš vysoké.

Test pájitelnosti vývodů pro pájecí slitinu SAC305 viz obrázky 4.31 - 4.34 vykazují velmi vhodnou schopnost pájitelnosti. Všechny pozorované vzorky splnily požadavky na pájený spoj dle IPC-A-610G. Výplň pokoveného otvoru byla na všech vzorcích 100 %. Obvodové smáčení vývodu bylo po celém obvodu jak na zdrojové, tak na cílové straně. Pokrytí plošky jak na zdrojové, tak na cílové straně bylo rovnoměrné a po celé ploše pájecí plošky. Pro potvrzení rovnoměrného vyplnění pokoveného otvoru byl proveden mikrovýbrus vzorku F. Na Obrázku 4.35 jsou tři snímky výbrusu. Do jedné třetiny hloubky otvoru, do poloviny hloubky vývodu a třetí snímek vede přes vzorek F tak aby byl viditelný vnitřní prostor pressfit konektoru. Ze snímků je patrné, že smočení je rovnoměrné po celé ploše pájeného spoje včetně plně vyplněného prostoru ve vzorku.

Test pájitelnosti vývodů pro pájecí slitinu SN100C viz obrázky 4.36 - 4.39 splňují požadavky na pájený spoj dle normy IPC-A-610G. Výplň pokoveného otvoru nebyla 100 % vždy jenom u jednoho z testovaných vzorků B a F viz Obrázek 4.36 a Obrázek 4.39. Zde vlivem pájení do zemnících plošek bylo odvedeno část tepla z pájeného spoje a tím snížena míra výplně pokoveného otvoru. Toto snížení bylo minimální a oba vzorky stále splňují podmínku výplně 75 %. Pokrytí plošky na zdrojové straně je rovnoměrné a po celé ploše všech vzorků na cílové straně až na vzorky B a F bylo pokrytí pájkou rovnoměrné po celé ploše pájecí plošky. Obvodové smáčení na zdrojové straně bylo u všech vzorků po celém obvodu. Obvodové smočení vzorku na cílové straně nebylo vyhovující u jednoho ze vzorků D a E viz Obrázek 4.37 a Obrázek 4.38. Na Obrázku 4.40 se nachází snímky mikrovýbrusu vzorku F. Ze snímků je patrné, smočení otvoru a vnějšího pláště vzorku F je po celé ploše. Vnitřní část vzorku F není dokonale navzlínaná a v části na cílové straně nedošlo k plnému vyplnění pájecí slitinou.

Výsledky testování prokazují jako nejvhodnější kombinaci povrchové úpravy vzorek F. Tento vzorek dosáhl nerychlejších hodnot průchodu nulou a času dosažení 2/3 maximální smáčecí síly ze všech testovaných povrchový úprav a jejich kombinací. Zároveň test pájitelnosti byl vyhovující pro obě pájecí slitiny.

Literatura

[1] Intermetalické sloučeniny bezolovnatých pájecích slitin [online]. Plzeň, 2022 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: https://www.citacepro.com/dok/2ECs2Bcq6KetvLHr. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. František Steiner, Ph.D.

[2] Metoda smáčecích vah [online]. Brno [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/503415/mod_folder/content/0/p%C5%99%C3%ADloha%20LC3%20-%20Metoda%20sm%C3%A1%C4%8Dec%C3%ADch%20vah.pdf?forcedownload=1. Skripta. VUT-FEKT.

[3] STARÝ, Jiří a Miroslav ZATLOUKAL. Montážní a propojovací technologie [online]. Brno, 2014 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/481603/mod_resource/content/1/Star%C3%BD_Zatloukal_UETE_MMOT_%20skripta.pdf. Skripta. VUT-FEKT.

[4] Plastics Surface Energy Wetting Test Methods. Adhesion Bonding [online]. 2012, 19.3. 2012 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: https://www.adhesionbonding.com/2012/03/19/plastics-surface-energy-wetting-test-methods/

[5] INSTRUMENTAL AND LABORATORY TECHNIQUES FOR CHARACTERIZATION OF RESERVOIR ROCK. Science Direct [online]. Journal of Contaminant Hydrology, 2019, 19.3. 2012 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/wettabilityhttps://hellerindustries.com/dewetting/

[6] Dewetting. Kurtz Ersa [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: https://ts.kurtzersa.com/electronics-production-equipment/solderlexicon/begriff/dewetting.html

[7] Intermetallic Layer. Kurtz Ersa [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: https://ts.kurtzersa.com/electronics-production-equipment/solderlexicon/begriff/intermetallic-layer.html#:~:text=A%20thin%20layer%20in%20the,led%20the%20intermetallic%20compound

[8] Aaron Olson, Lab Technician. What are Intermetallics and How Can We Overcome the Failures Associated with Them?. STI electonicst [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: https://www.tch.es/wp-content/uploads/Intermetallics.pdf

[9] Skenovací elektronový mikroskop (SEM). Matca [online]. 2023 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/sem/

[10] Skenovací elektronový mikroskop. Encyklopedie fyziky [online]. 2019, 2019-01-19 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1675-skenovaci-elektronovy-mikroskop

[11] Elektromagnetická čočka. Encyklopedie fyziky [online]. 2019, 2019-01-19 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1677-elektromagneticka-cocka
[12] Interakce elektronů se vzorkem. Encyklopedie fyziky [online]. 2019, 2019-01-19 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1678-interakce-elektronu-se-vzorkem
[13] Zdroj elektronů. Encyklopedie fyziky [online]. 2019, 2019-01-19 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1676-zdroj-elektronu
[14] Metoda smáčecích vah. SMT centrum: Školení a služby z oblasti pájení [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: https://www.smtcentrum.cz/pajeny-spoj-pajitelnost/metoda-smacecich-vah/
[15] Testování pájitelnosti metodou smáčecích vah [online]. Plzeň [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: https://docplayer.cz/48065369-Testovani-pajitelnosti-metodou-smacecich-vah-p-harant-1-f-steiner-1-1.html. Fakulta elektrotechnická, ZČU.
[16] MIL-STD-883. Quick search [online]. 2023, 05 May 2023 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: https://quicksearch.dla.mil/qsDocDetails.aspx?ident_number=36028
[17] Optické mikroskopy. Online. Keyence. Dostupné z: https://www.keyence.eu/cscz/ss/products/microscope/microscope_glossary/optical_microscopes/. [cit. 2024-05-19].
[18] IPC. Acceptability of Electronic Assemblies, IPC-A-610G. 9. 2016.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

SE	Sekundární elektron
BSE	Zpětně odražený elektron
RTG	Rentgenové záření

Symboly:

γ_{SF}	Povrchové napětí povrch, tavidlo	(N/m)
γ_{LS}	Povrchové napětí pájka, povrch	(N/m)
γ_{LF}	Povrchové napětí pájka, tavidlo	(N/m)

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - NAMĚŘENÉ HODNOTY OLOVNATÁ PÁJKA 59

PŘÍLOHA B - NAMĚŘENÉ HODNOTY SAC305 61

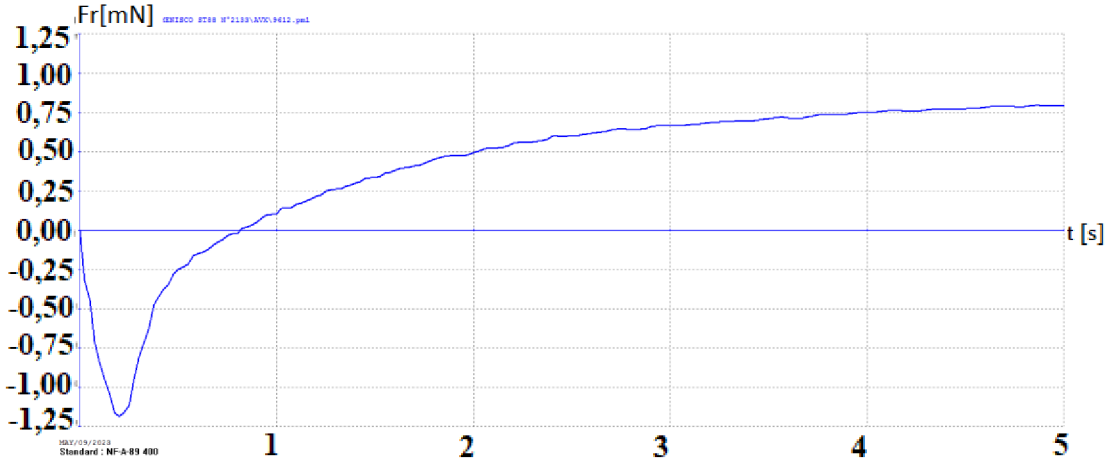
PŘÍLOHA C - NAMĚŘENÉ HODNOTY SN100C 71

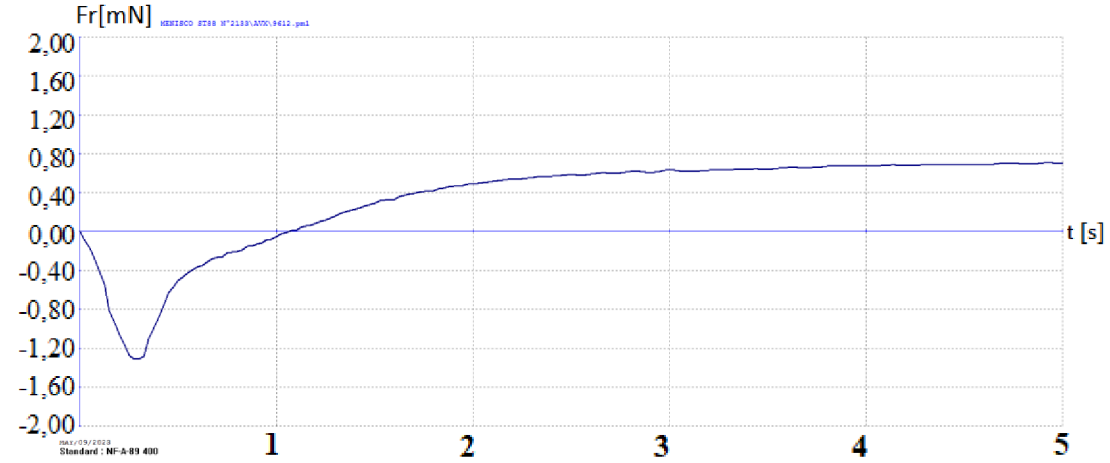
PŘÍLOHA D - SROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH CHARAKTERISTIK V PÁJCE SAC305 81

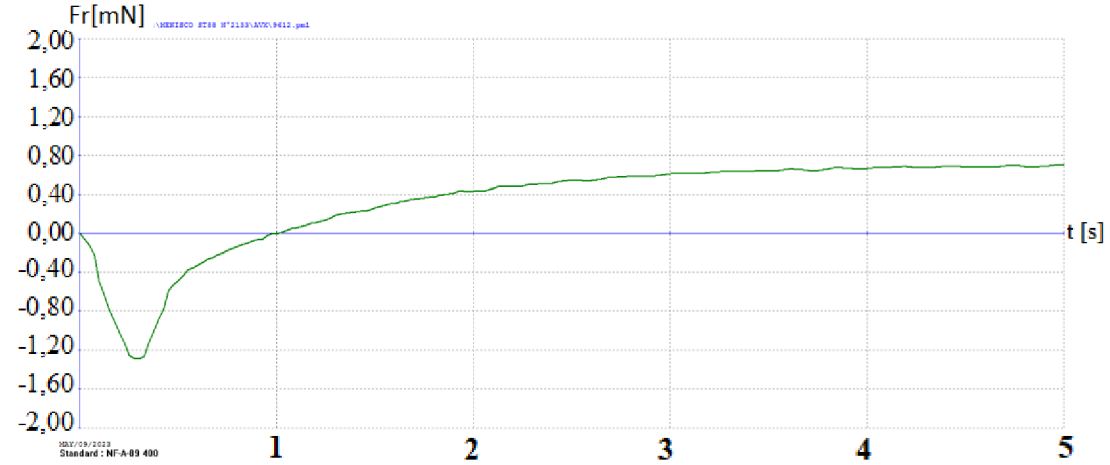
PŘÍLOHA E - SROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH CHARAKTERISTIK V PÁJCE SN100C 83

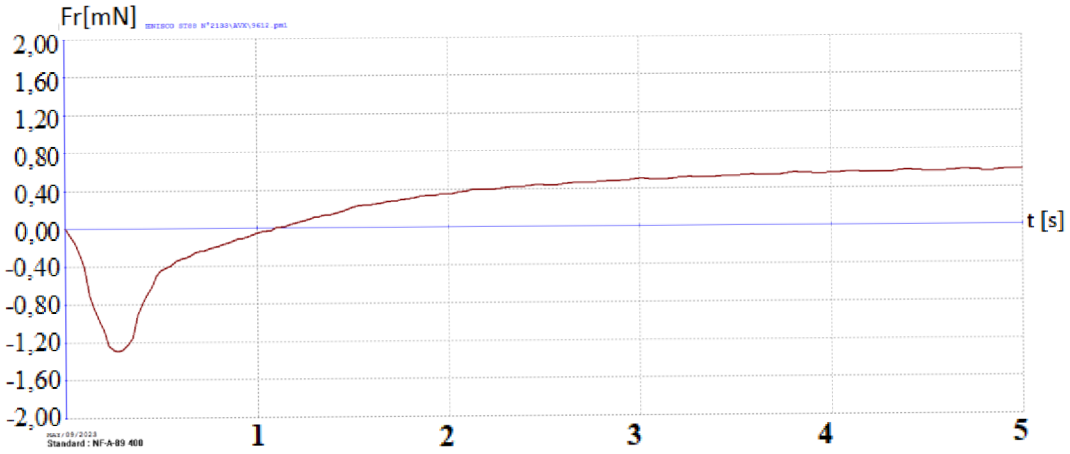
Příloha A - Naměřené hodnoty olovnatá pájka

A.1 Vzorek 9612



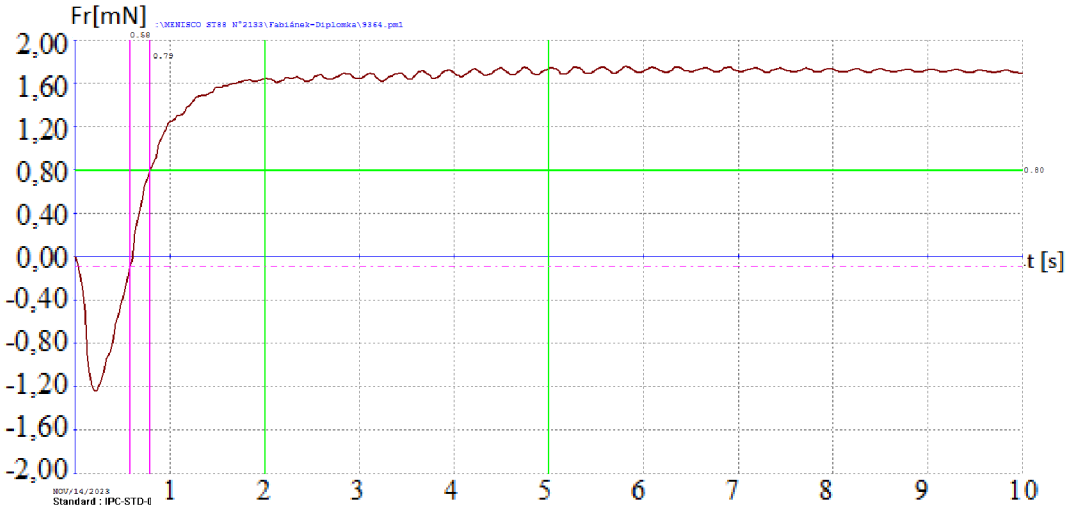


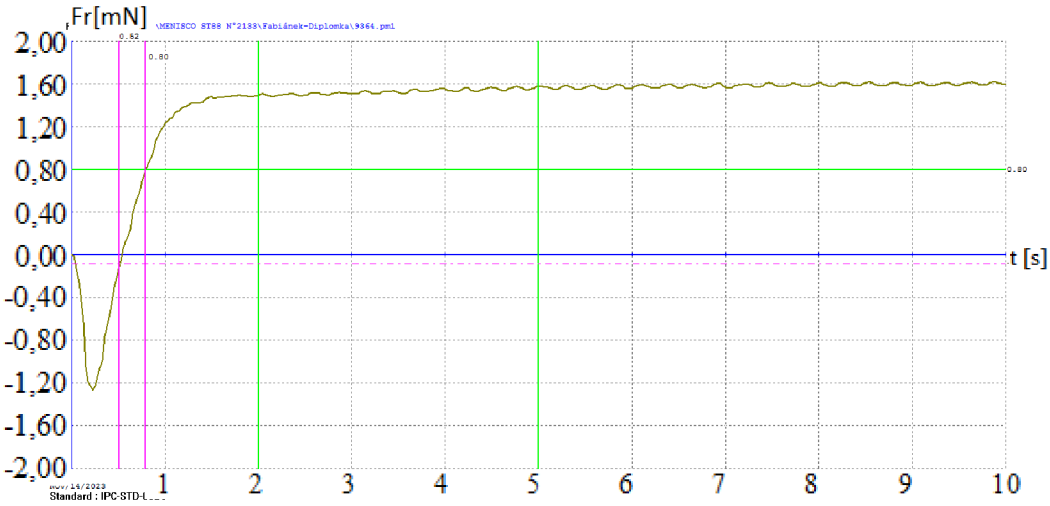


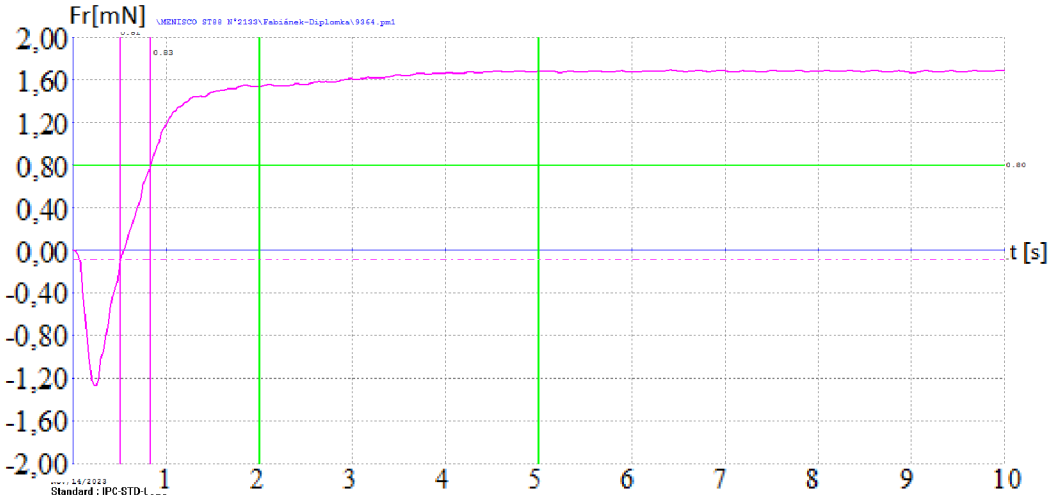

Fr[mN]
2,00
1,60
1,20
0,80
0,40
0,00
-0,40
-0,80
-1,20
-1,60
-2,00
t [s]
1
2
3
4
5
Standard : NF-A-89 400

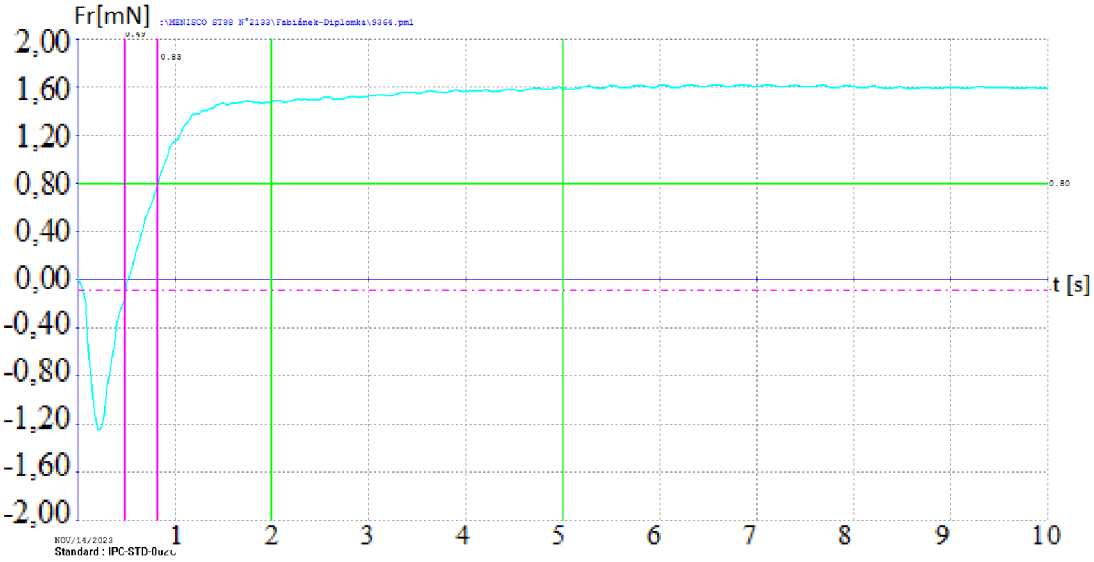
Příloha B - Naměřené hodnoty SAC305

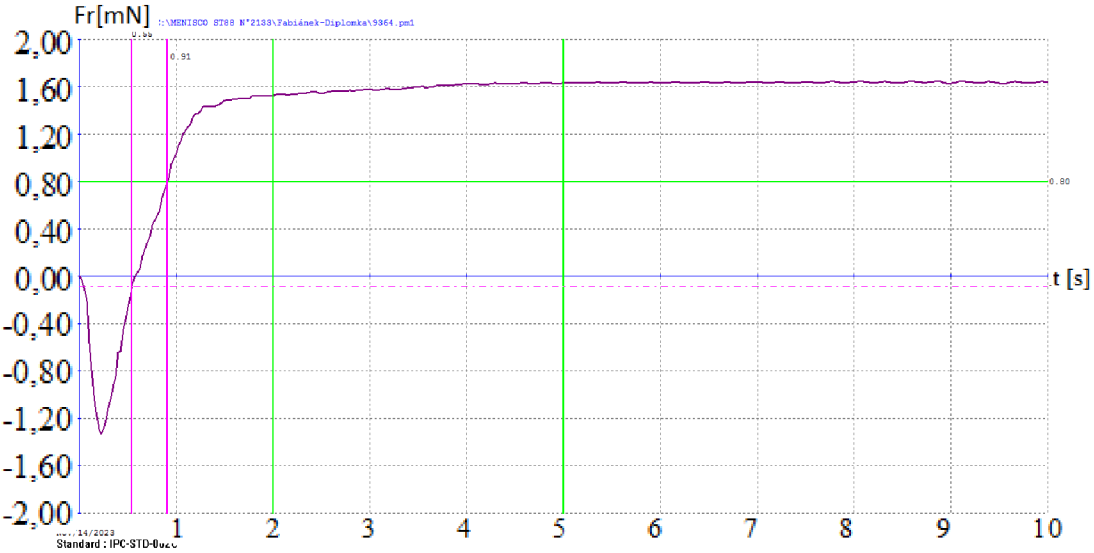
A.2 Vzorek 9364



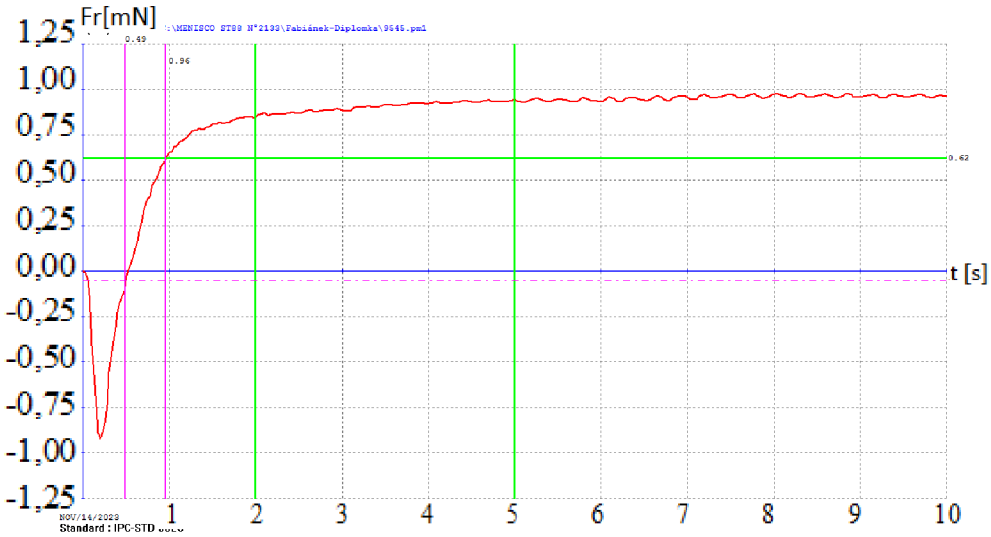


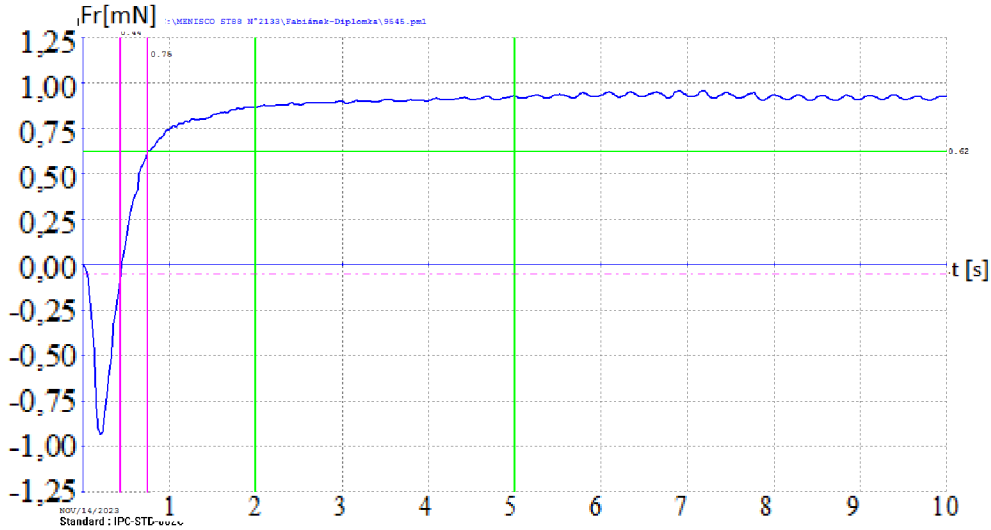


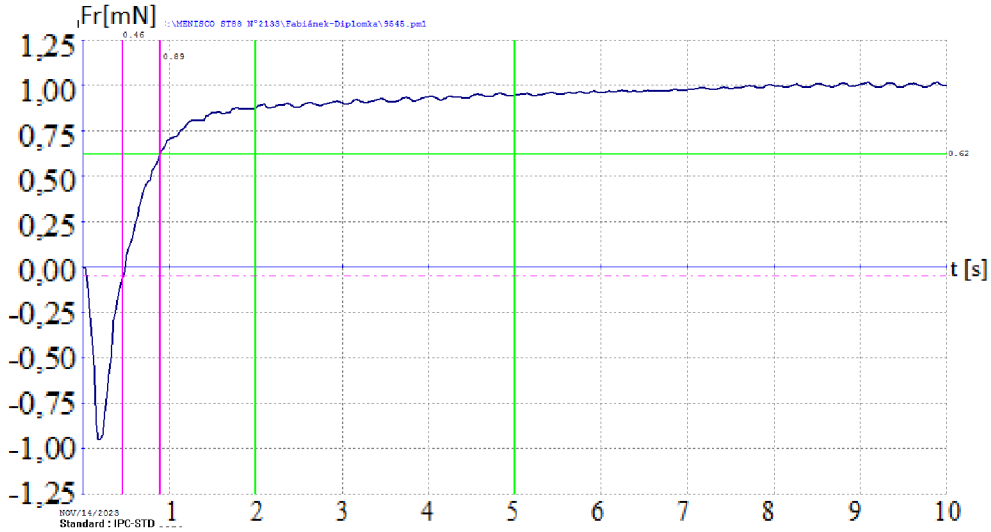

Fr[mN]
2,00
1,60
1,20
0,80
0,40
0,00
-0,40
-0,80
-1,20
-1,60
-2,00
t [s]
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

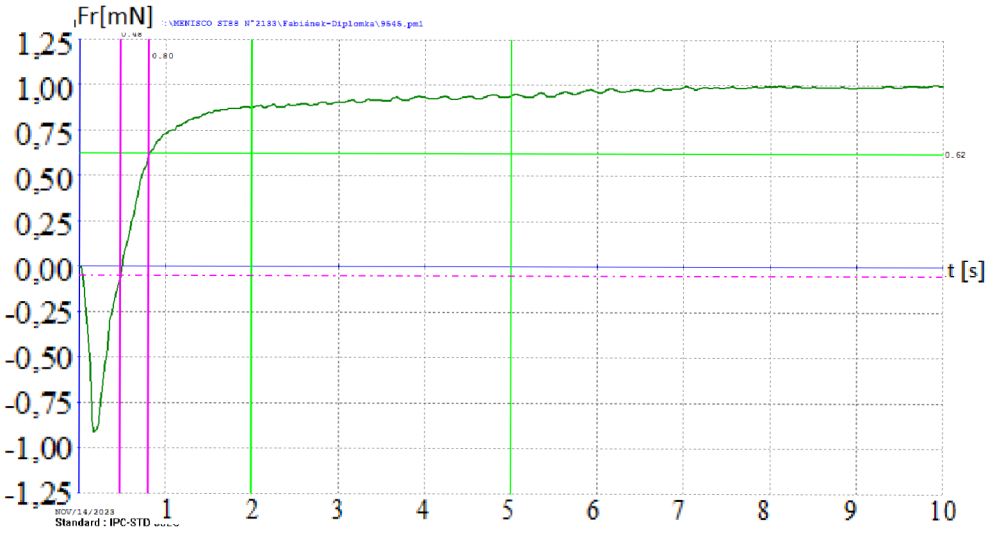

Fr[mN]
2,00
1,60
1,20
0,80
0,40
0,00
-0,40
-0,80
-1,20
-1,60
-2,00
t [s]
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

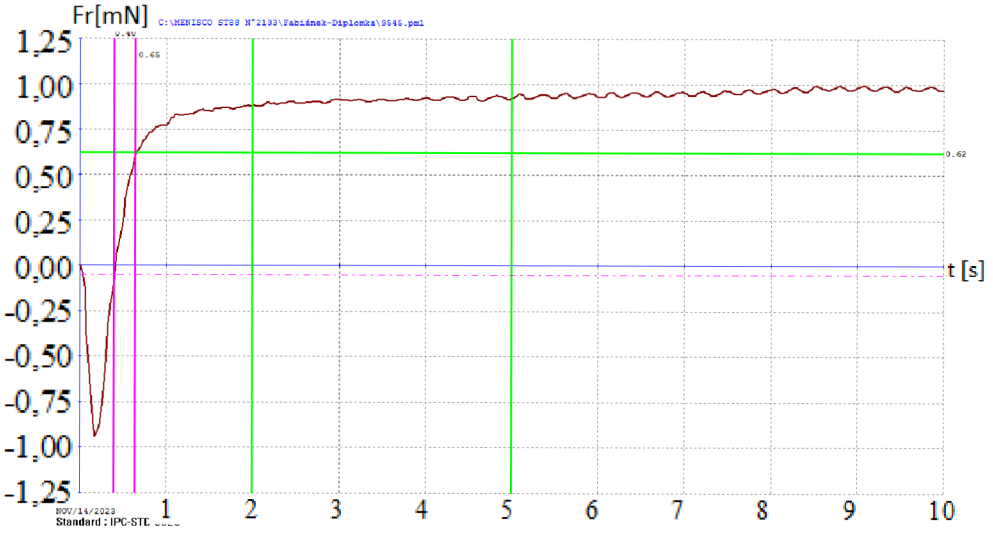
A.3 Vzorek 9545



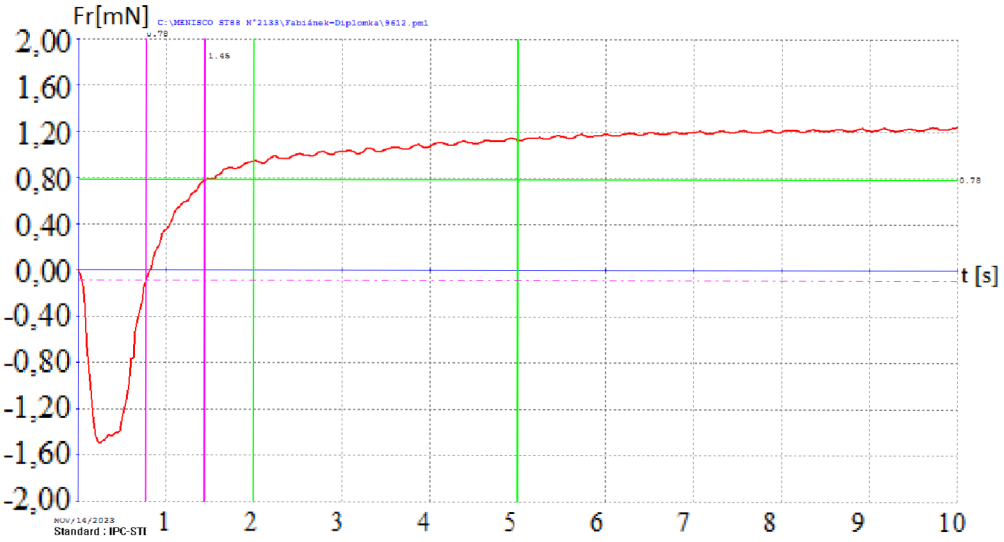


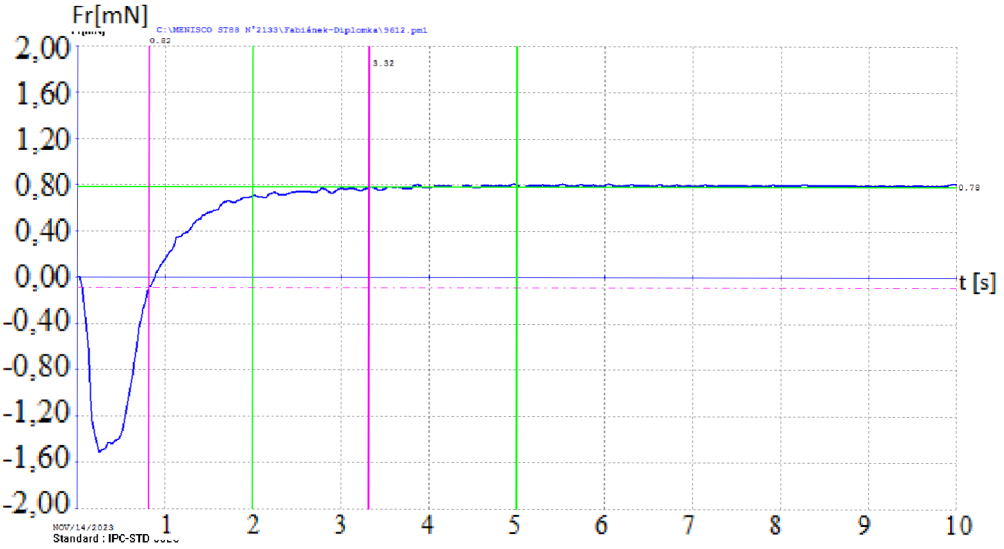


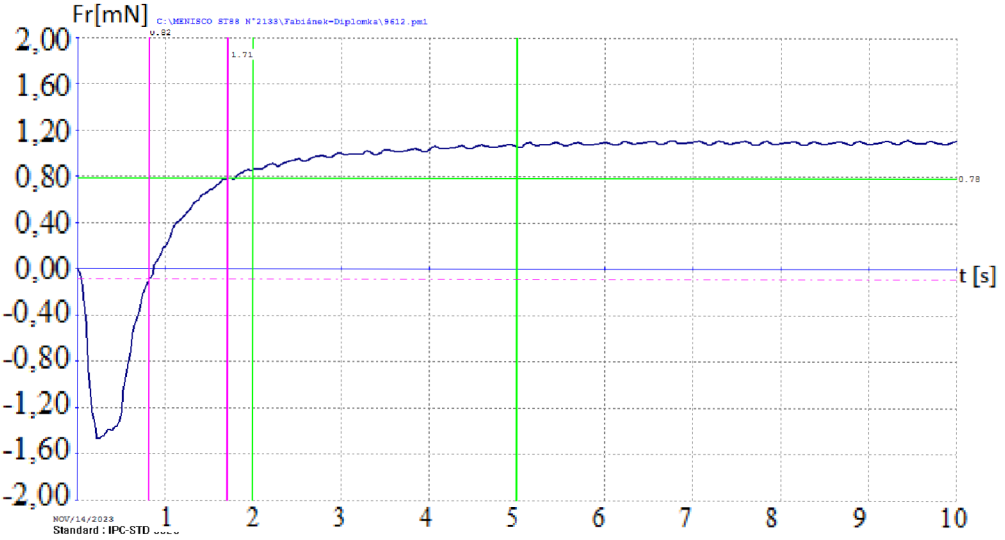

Fr[mN]
1,25
1,00
0,75
0,50
0,25
0,00
-0,25
-0,50
-0,75
-1,00
-1,25
0.80
0.62
t [s]
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
Standard : IPC-STD

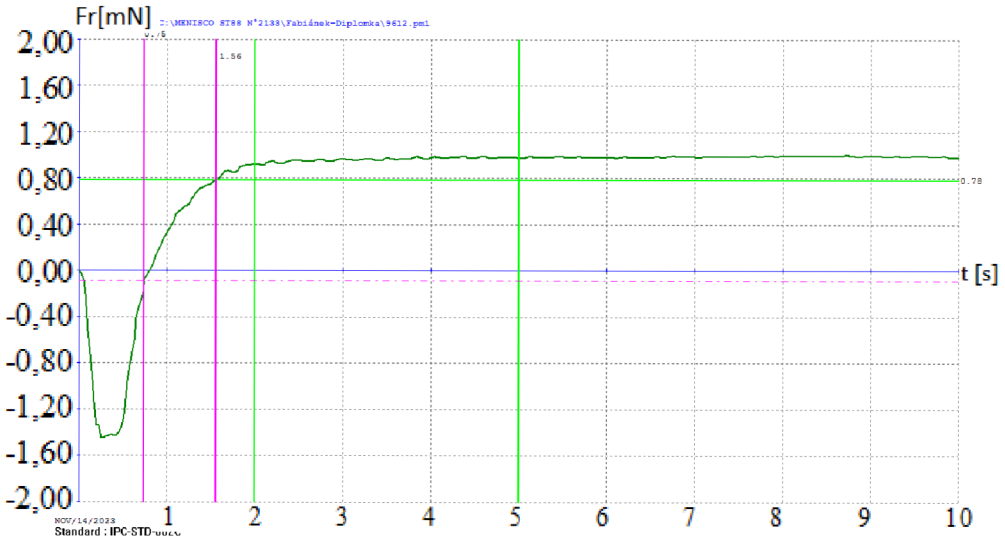

Fr[mN]
1,25
1,00
0,75
0,50
0,25
0,00
-0,25
-0,50
-0,75
-1,00
-1,25
0.65
0.62
t [s]
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
Standard : IPC-STD

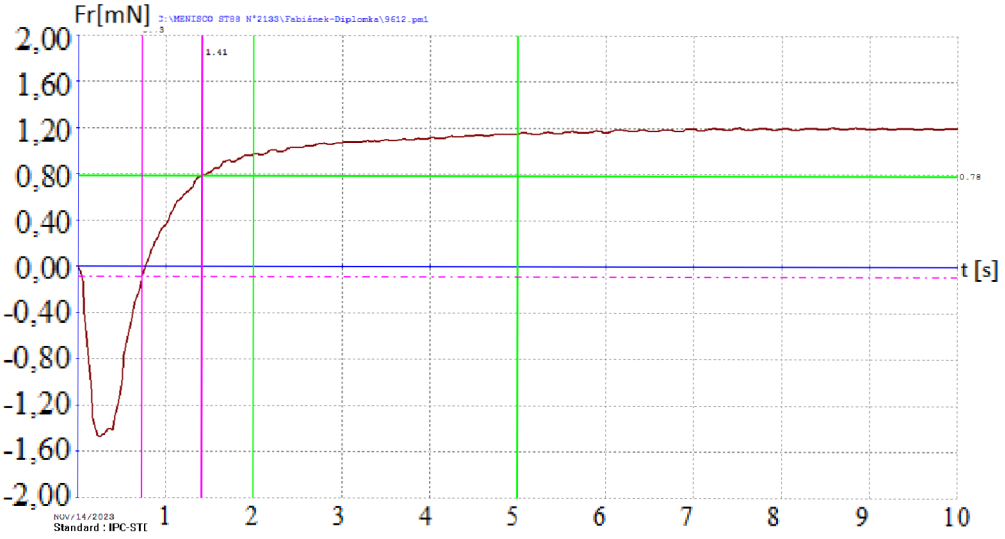
A.4 Vzorek 9612



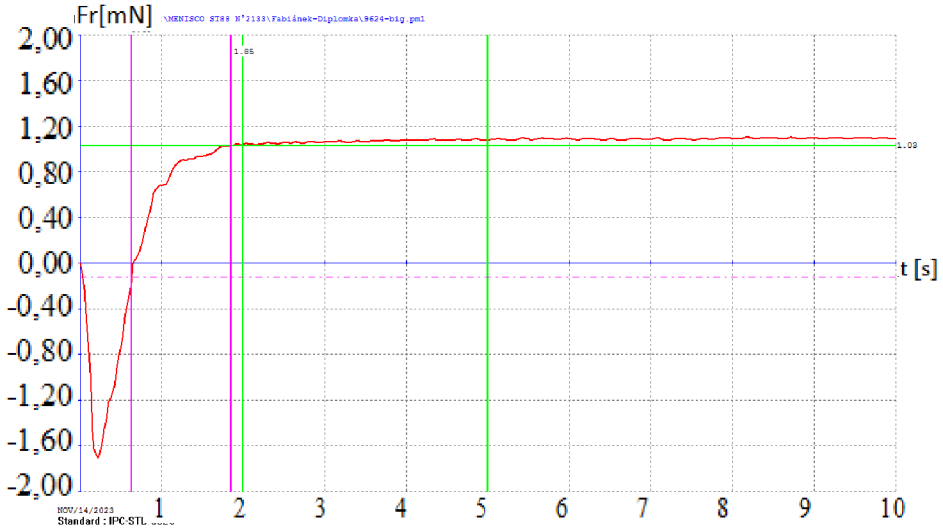


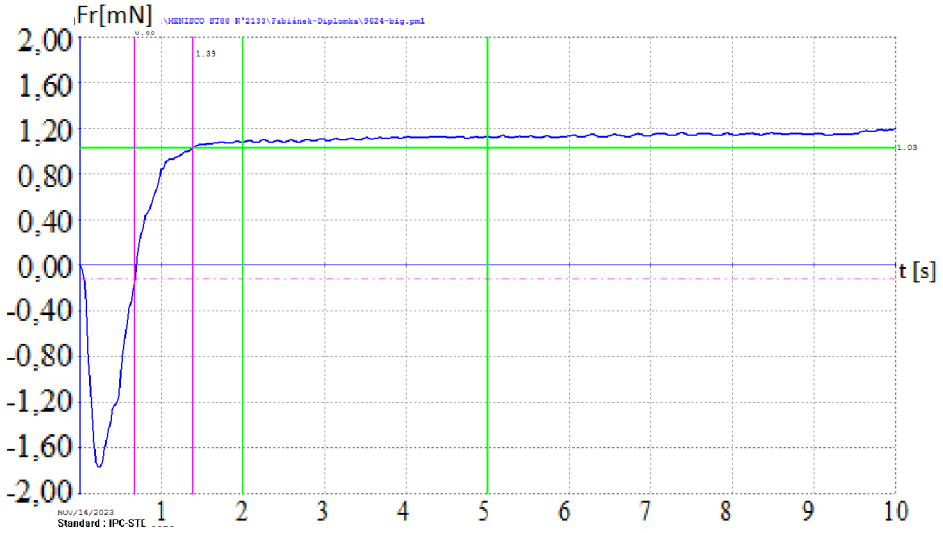


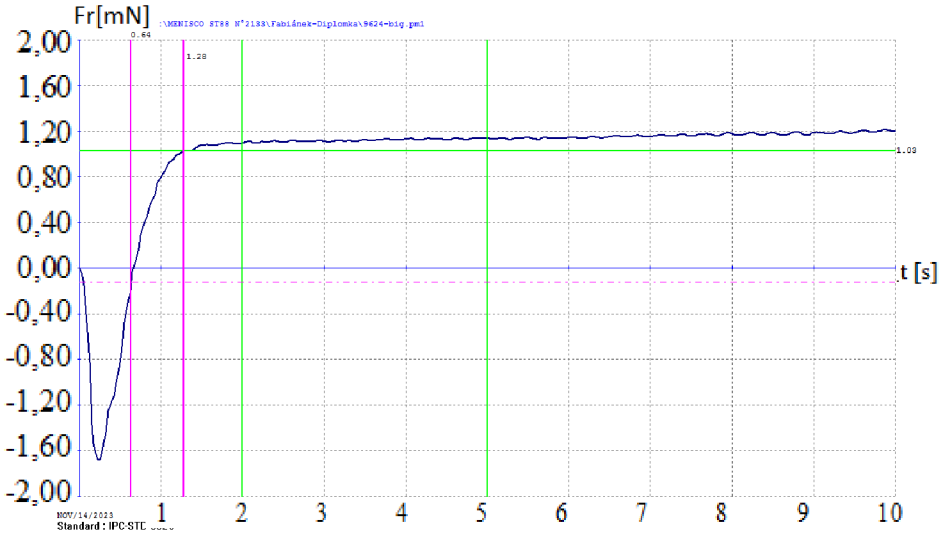

Fr[mN]
2,00
1,60
1,20
0,80
0,40
0,00
-0,40
-0,80
-1,20
-1,60
-2,00
1.56
0.78
t [s]
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
NOV/14/2023
Standard : IPC-STD

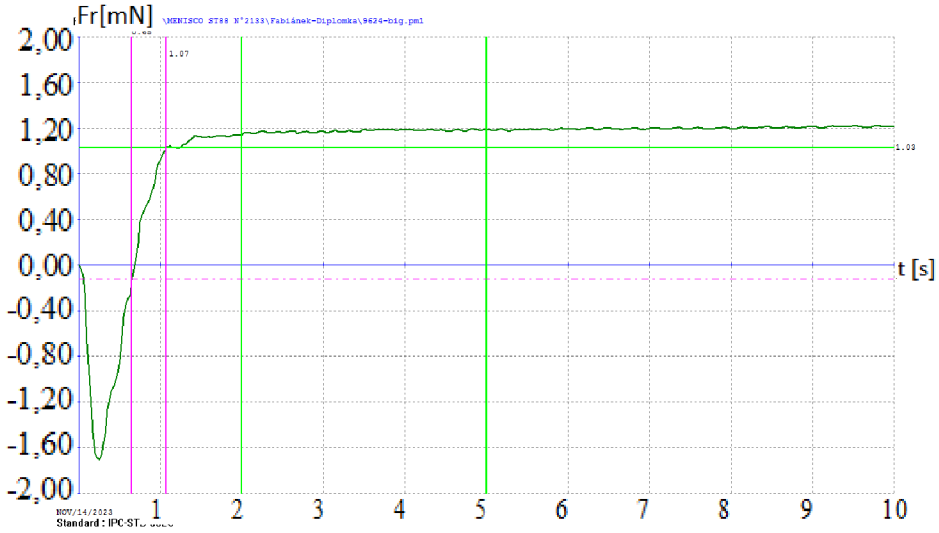

Fr[mN]
2,00
1,60
1,20
0,80
0,40
0,00
-0,40
-0,80
-1,20
-1,60
-2,00
1.41
0.78
t [s]
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
NOV/14/2023
Standard : IPC-STD

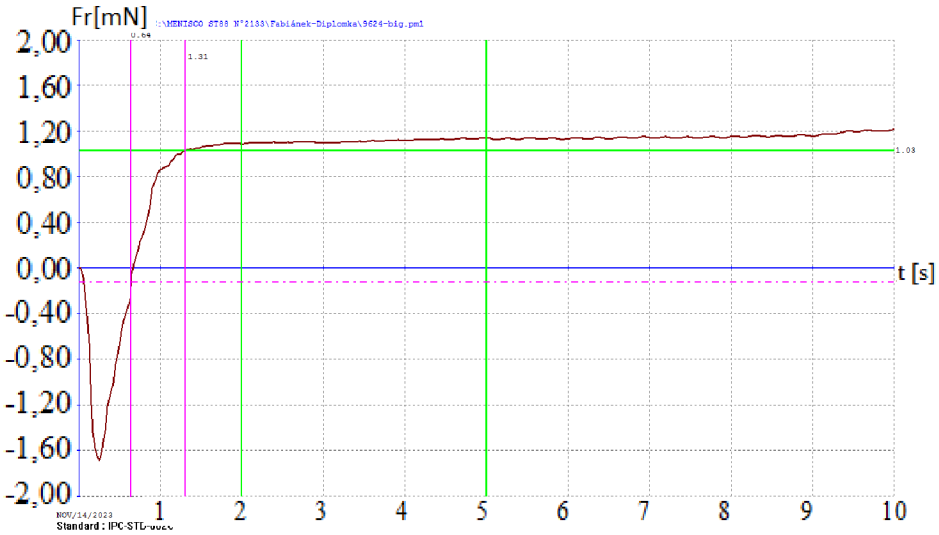
A.5 Vzorek 9624Big



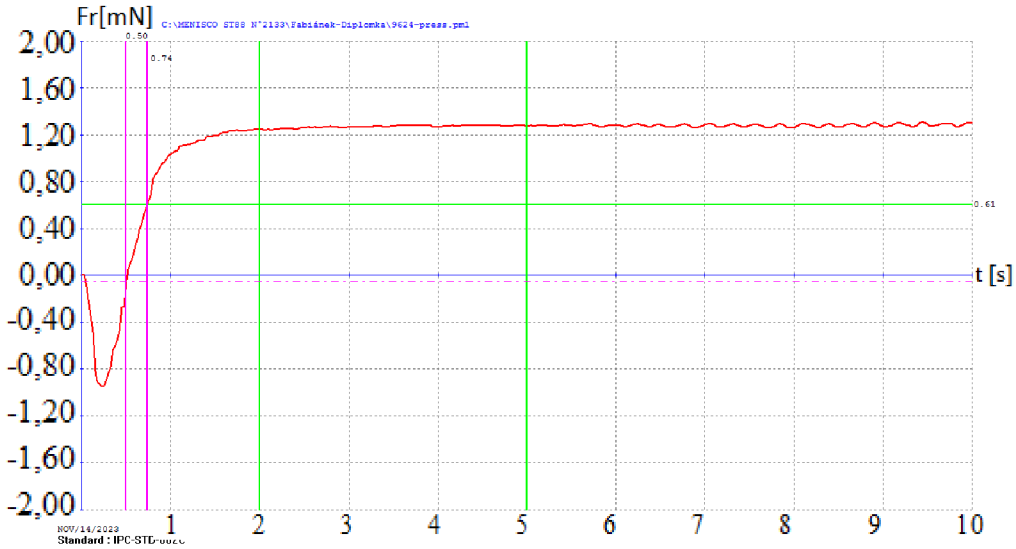


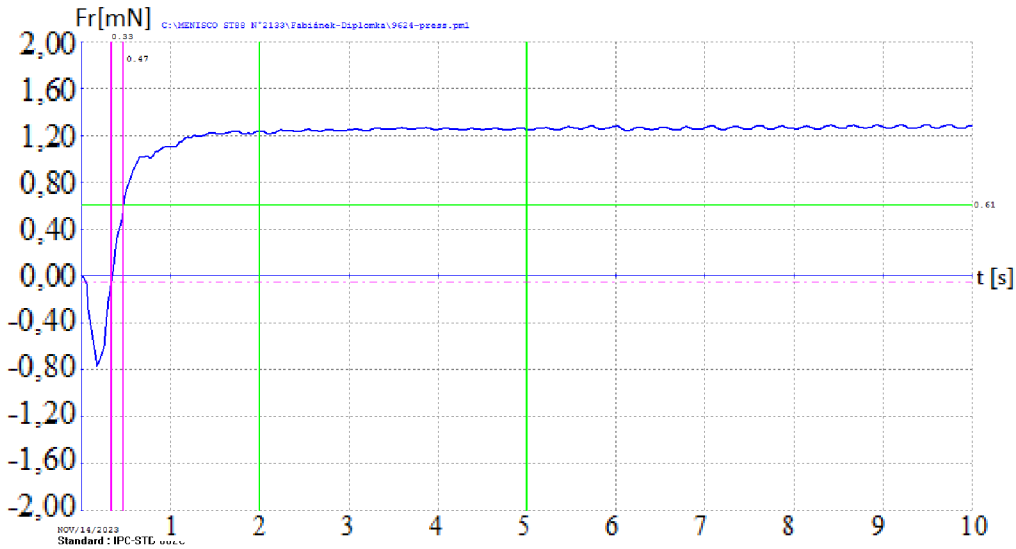


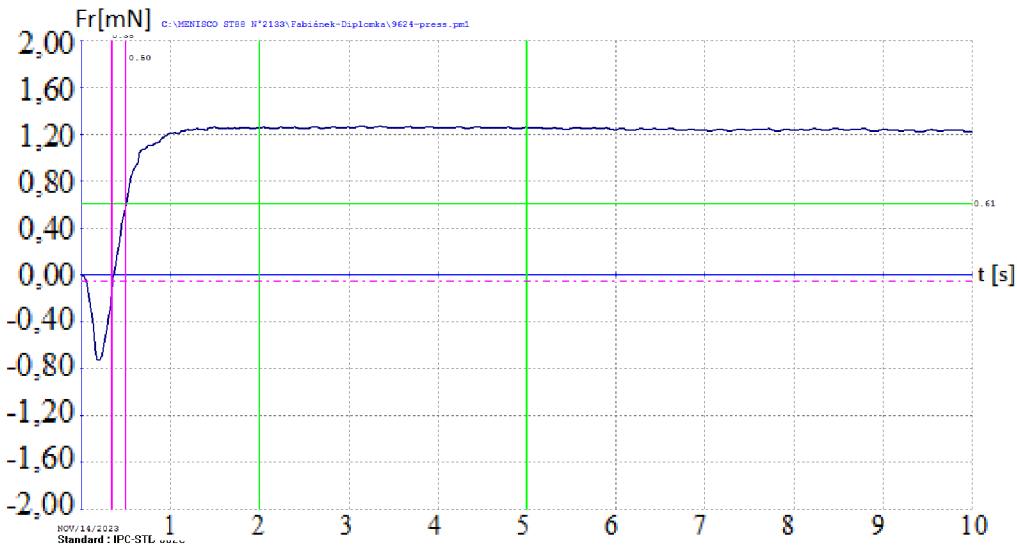

Fr[mN]
2,00
1,60
1,20
0,80
0,40
0,00
-0,40
-0,80
-1,20
-1,60
-2,00
1.07
1.03
t [s]
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

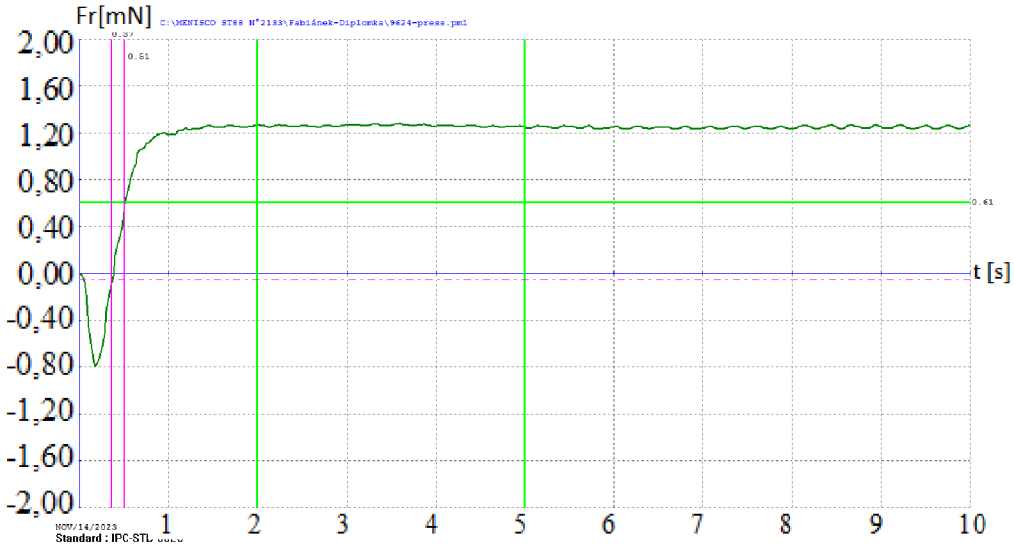

Fr[mN]
2,00
1,60
1,20
0,80
0,40
0,00
-0,40
-0,80
-1,20
-1,60
-2,00
1.31
1.03
t [s]
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

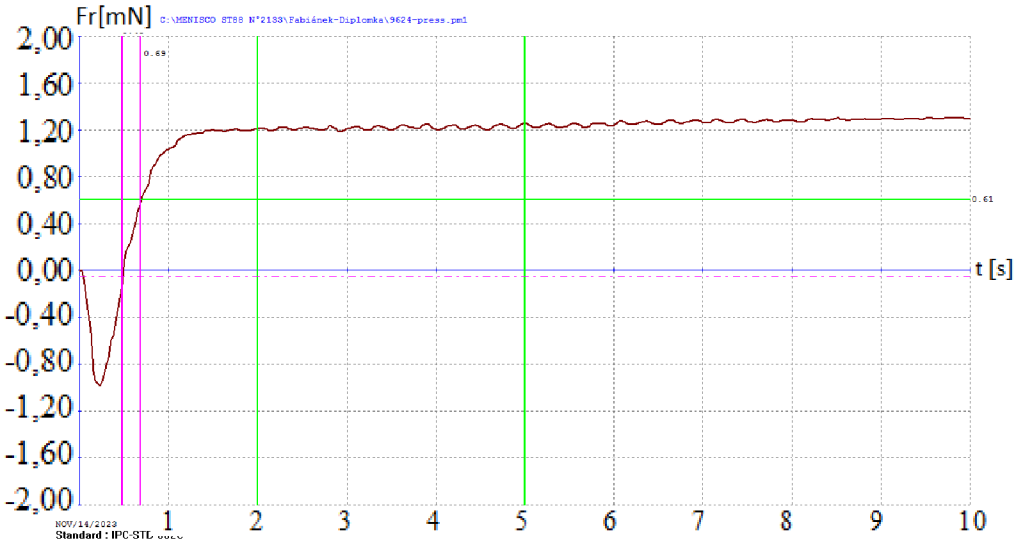
A.6 Vzorek 9624Press





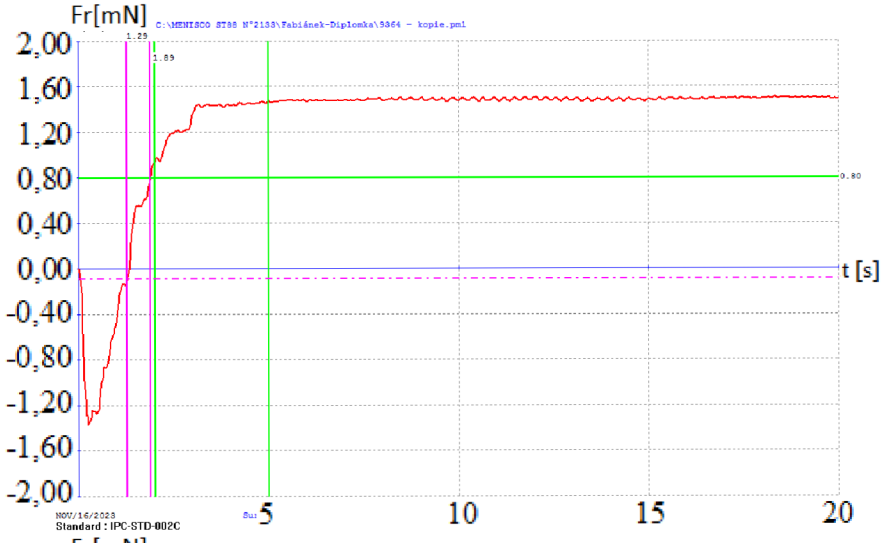


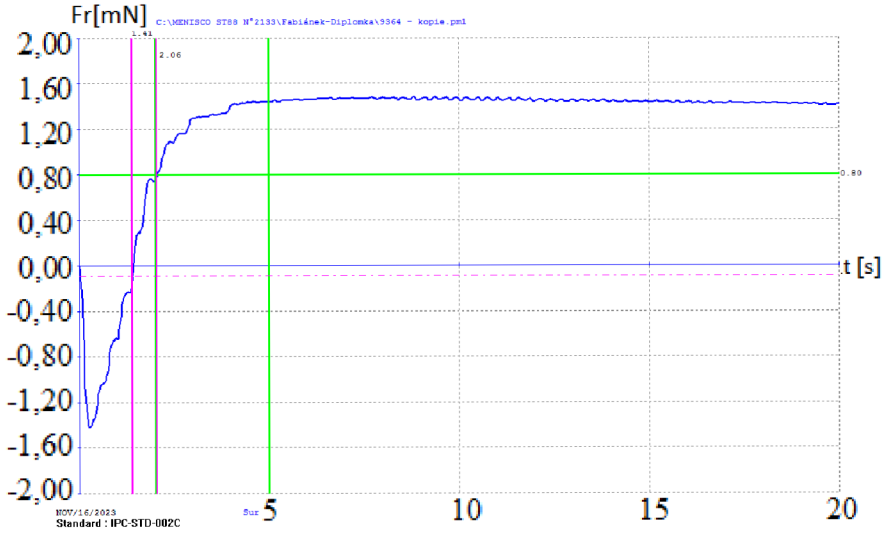

Fr[mN]
C:\MENISCO ST88 N°2133\Fabiánek-Diplomka\9624-press.pm1
2,00
1,60
1,20
0,80
0,40
0,00
-0,40
-0,80
-1,20
-1,60
-2,00
0.51
0.61
t [s]
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
NOV/14/2023
Standard : IPC-STL

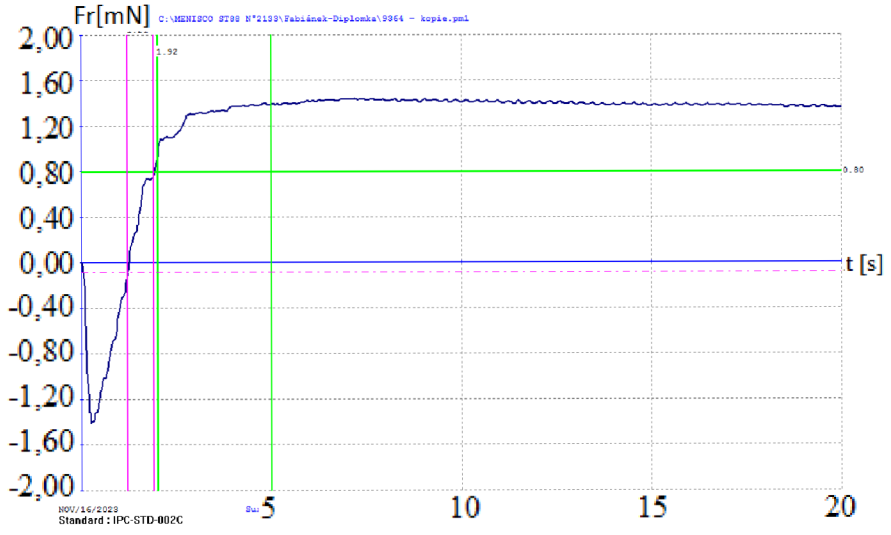

Fr[mN]
C:\MENISCO ST88 N°2133\Fabiánek-Diplomka\9624-press.pm1
2,00
1,60
1,20
0,80
0,40
0,00
-0,40
-0,80
-1,20
-1,60
-2,00
0.69
0.61
t [s]
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
NOV/14/2023
Standard : IPC-STL

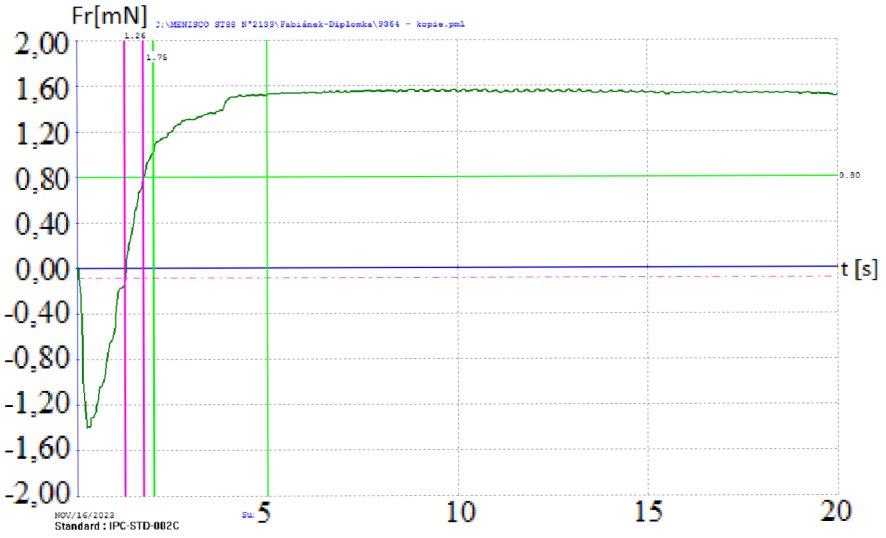
Příloha C - Naměřené hodnoty SN100C

A.7 Vzorek 9364

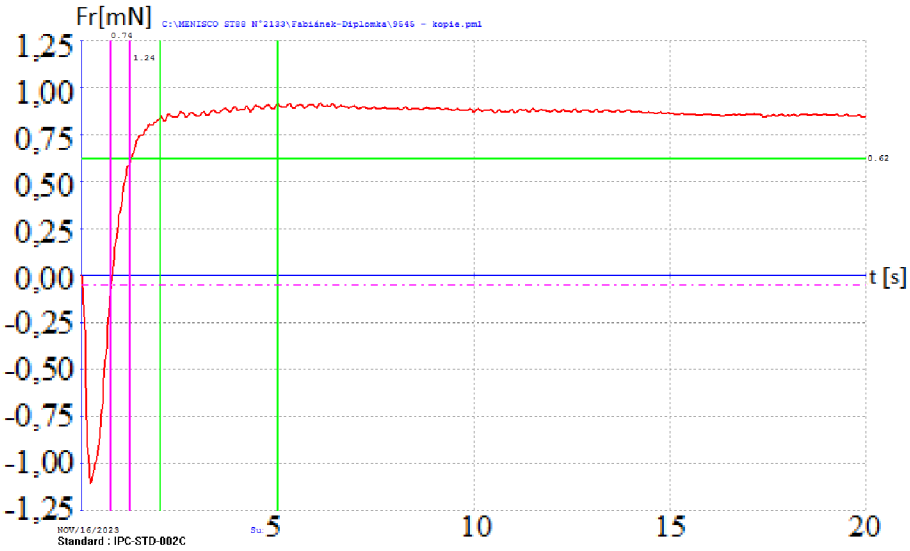


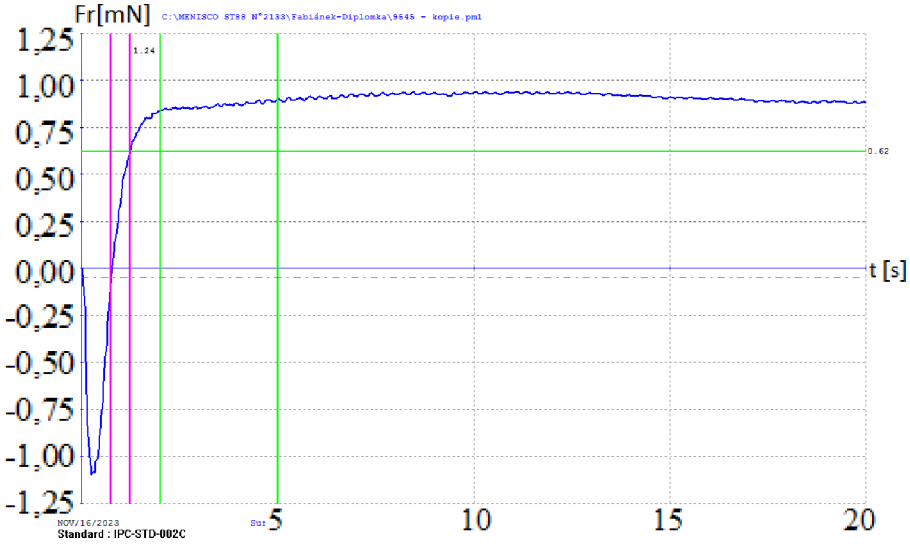


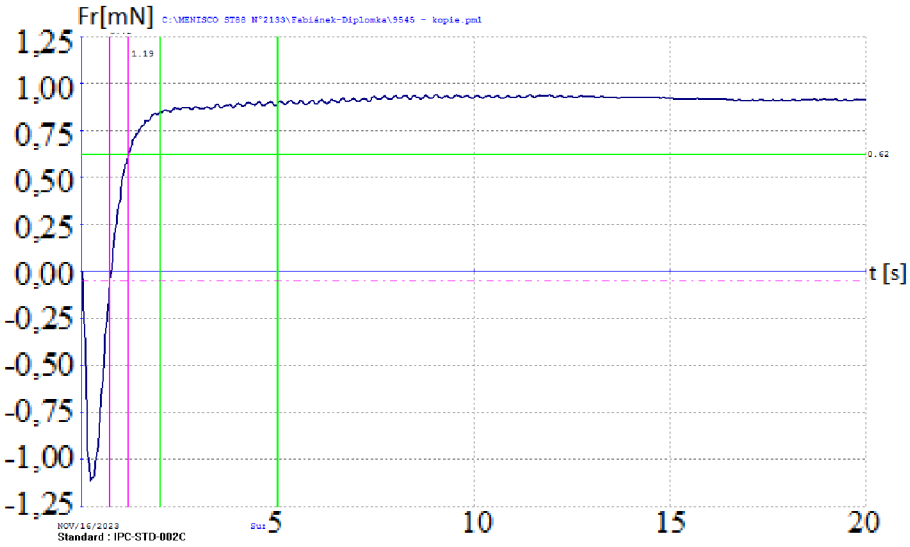


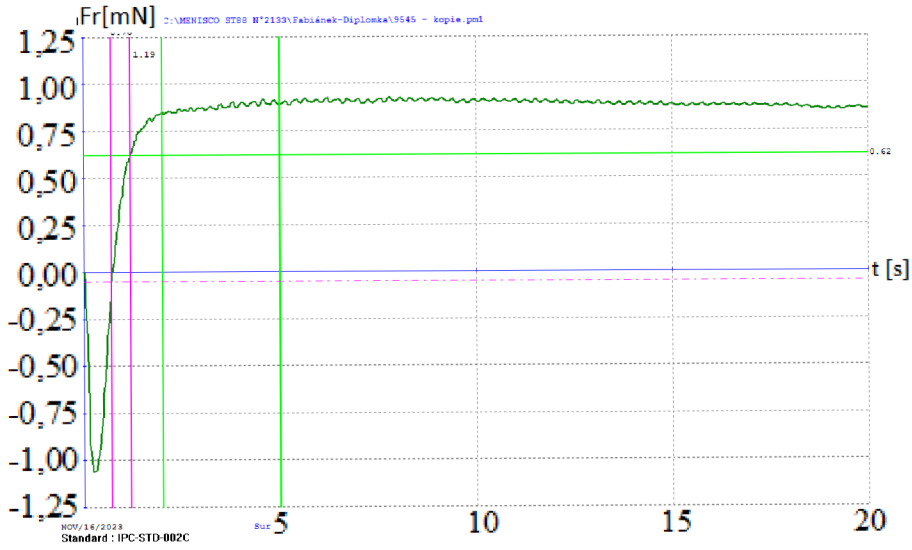

Fr[mN]
2:\MENISCO ST88 N°2199\Fabianek-Diplomka\9364 - kopie.pml
1.26
1.76
0.80
2,00
1,60
1,20
0,80
0,40
0,00
-0,40
-0,80
-1,20
-1,60
-2,00
t [s]
5
10
15
20
NOV/16/2022
Standard : IPC-STD-002C

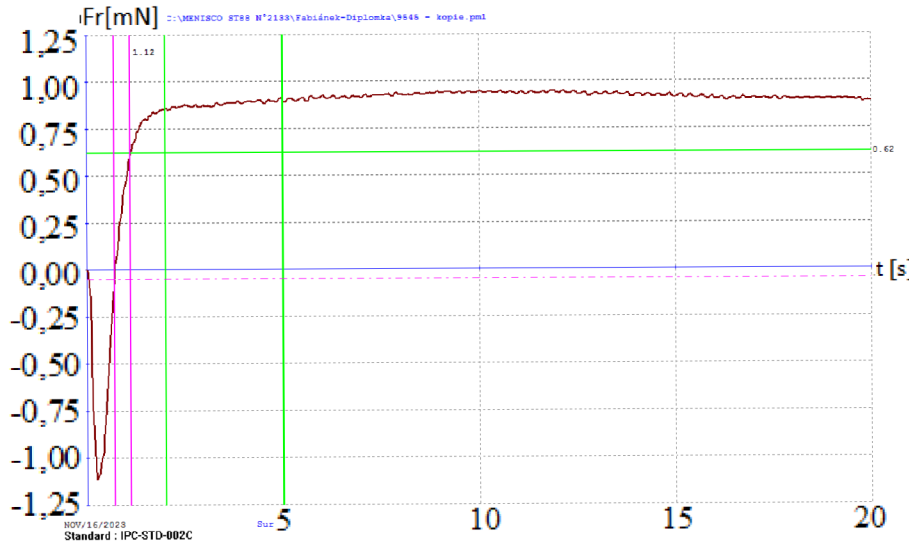
A.8 Vzorek 9545



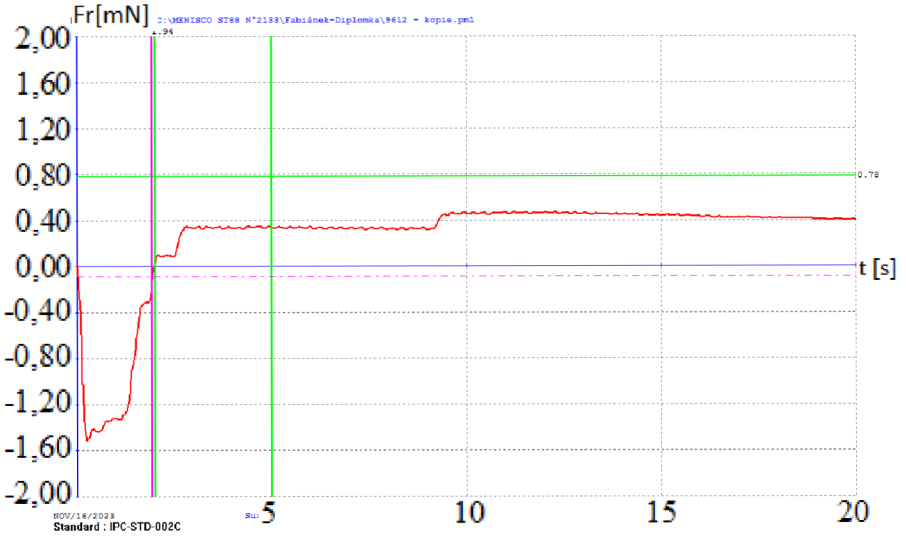


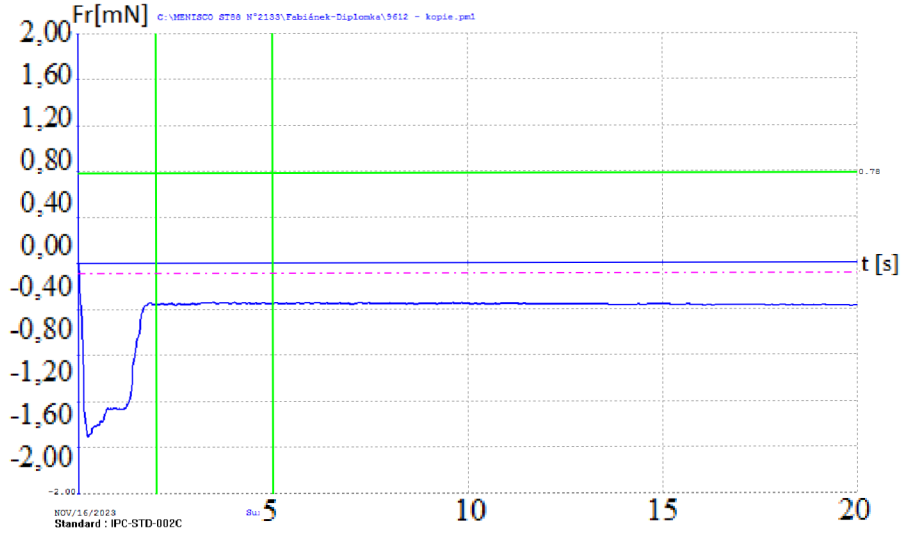


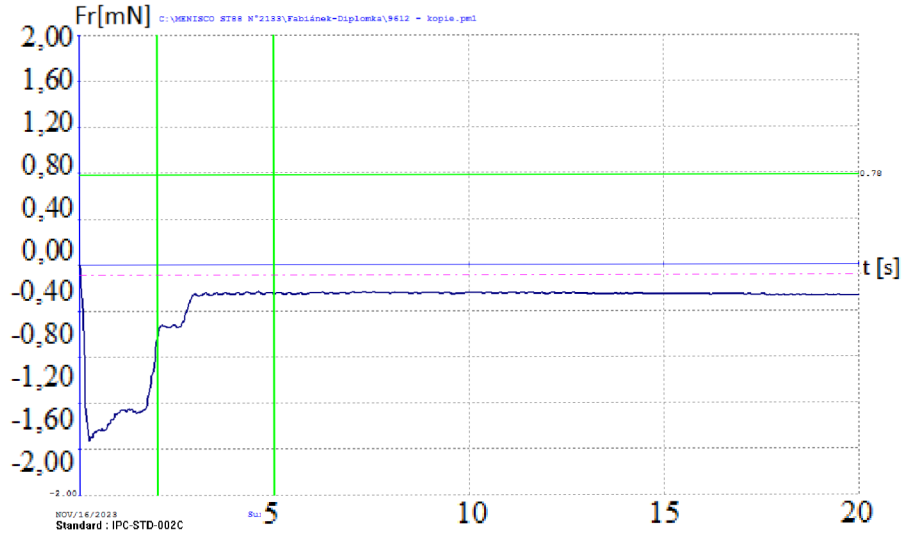

Fr[mN]
C:\MENISCO ST88 N°2133\Fabiánek-Diplomka\9545 - kopie.pml
1,25
1,00
0,75
0,50
0,25
0,00
-0,25
-0,50
-0,75
-1,00
-1,25
1.19
0.62
t [s]
5
10
15
20
NOV/16/2023
Standard : IPC-STD-002C

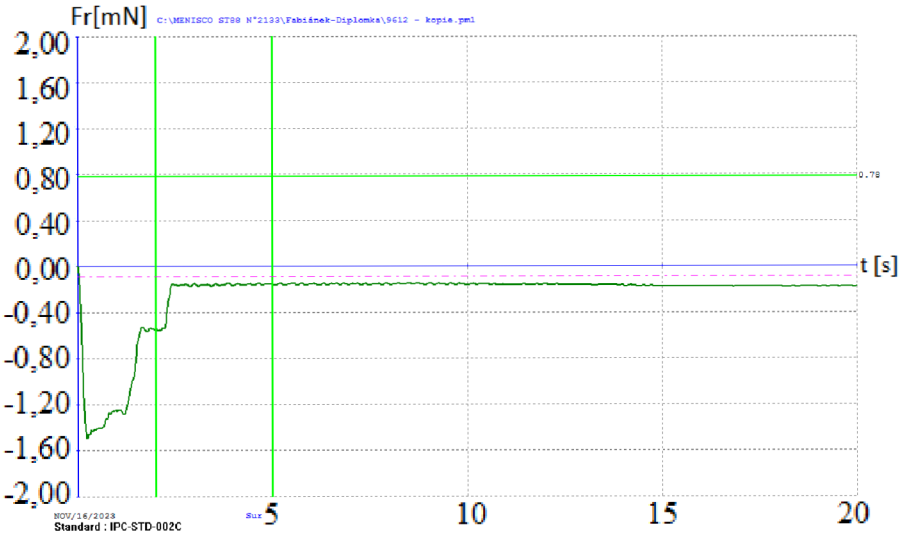

Fr[mN]
C:\MENISCO ST88 N°2133\Fabiánek-Diplomka\9548 - kopie.pml
1,25
1,00
0,75
0,50
0,25
0,00
-0,25
-0,50
-0,75
-1,00
-1,25
1.12
0.62
t [s]
5
10
15
20
NOV/16/2023
Standard : IPC-STD-002C

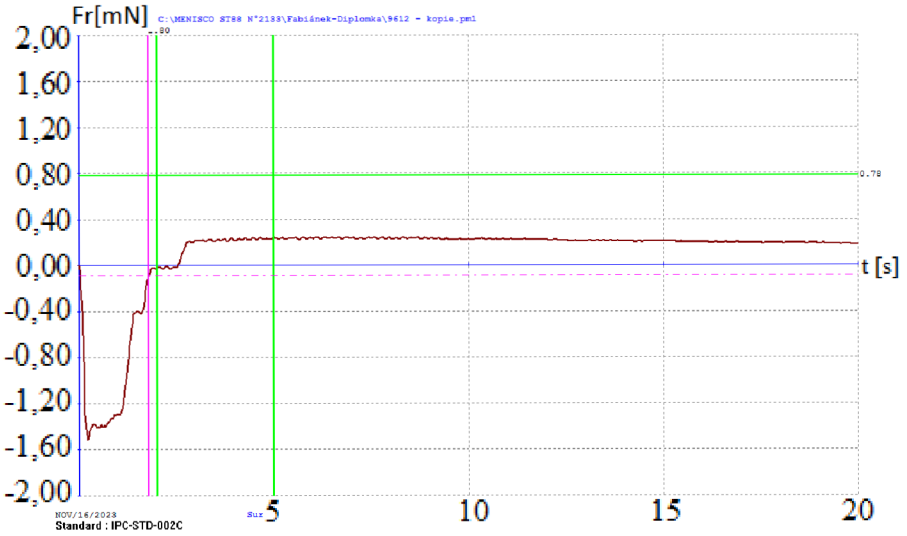
A.9 Vzorek 9612



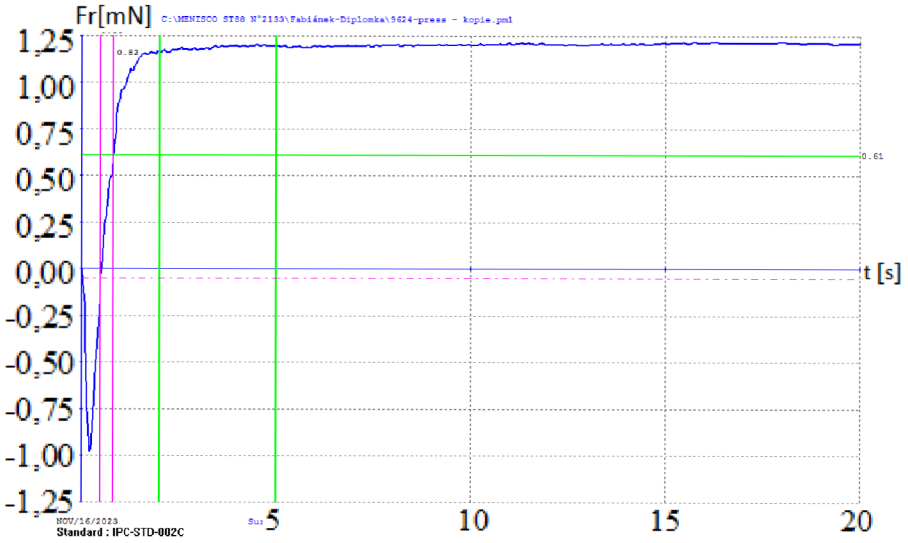


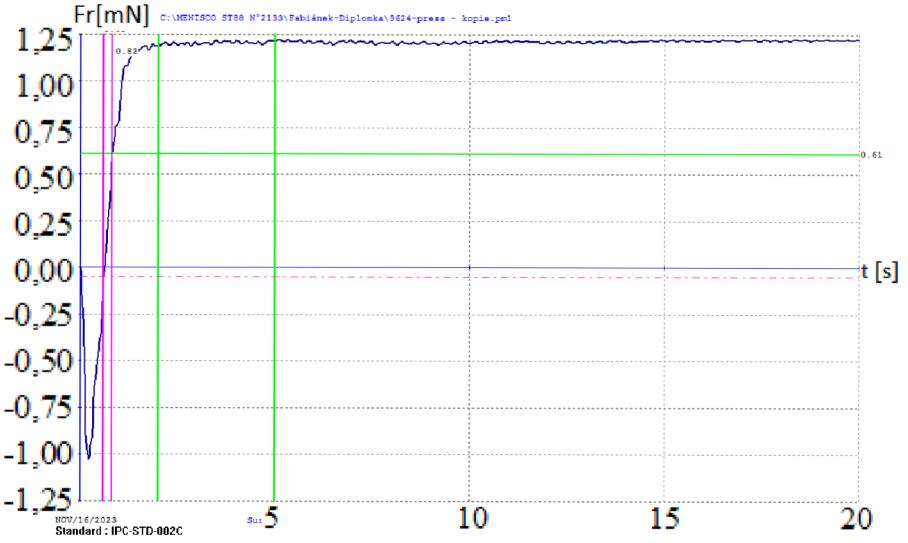


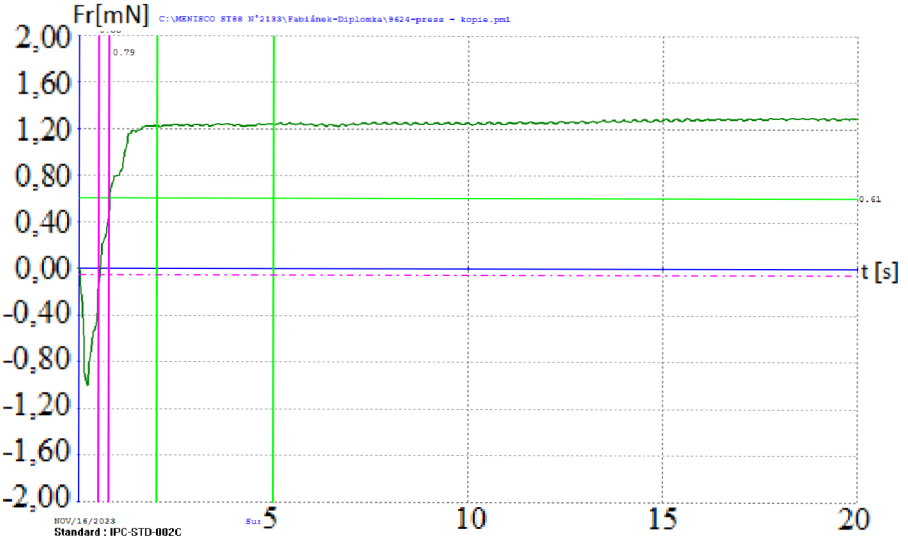

Fr[mN]
2,00
1,60
1,20
0,80
0,40
0,00
-0,40
-0,80
-1,20
-1,60
-2,00
t [s]
5
10
15
20
Standard : IPC-STD-002C

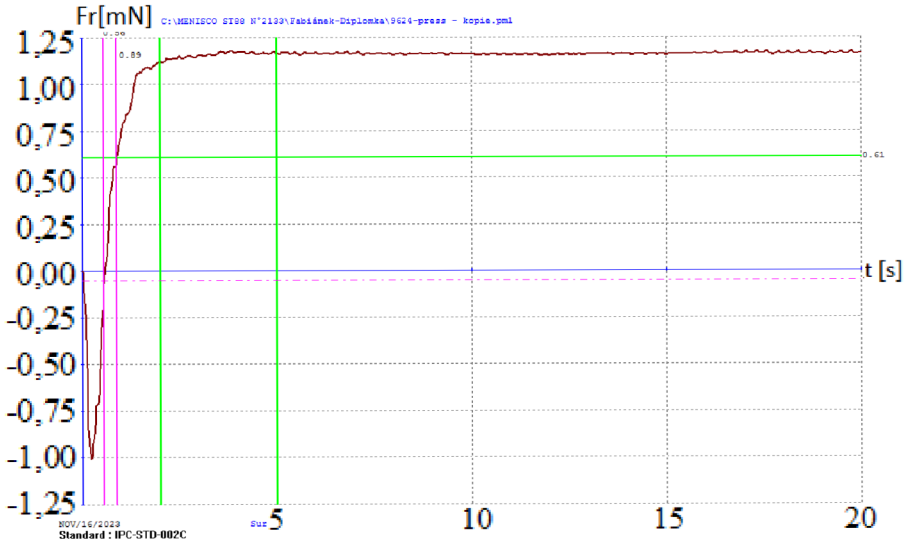

Fr[mN]
2,00
1,60
1,20
0,80
0,40
0,00
-0,40
-0,80
-1,20
-1,60
-2,00
t [s]
5
10
15
20
Standard : IPC-STD-002C

A.10 Vzorek 9624Press

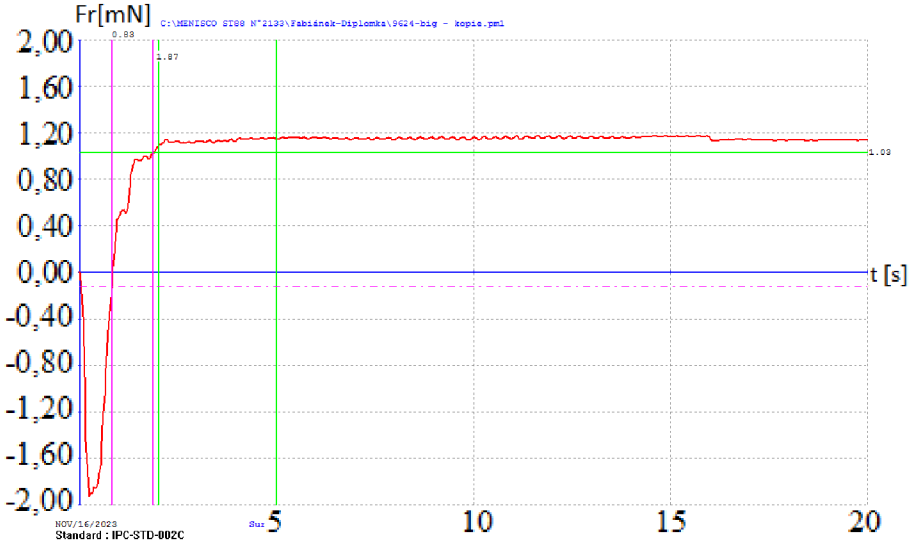


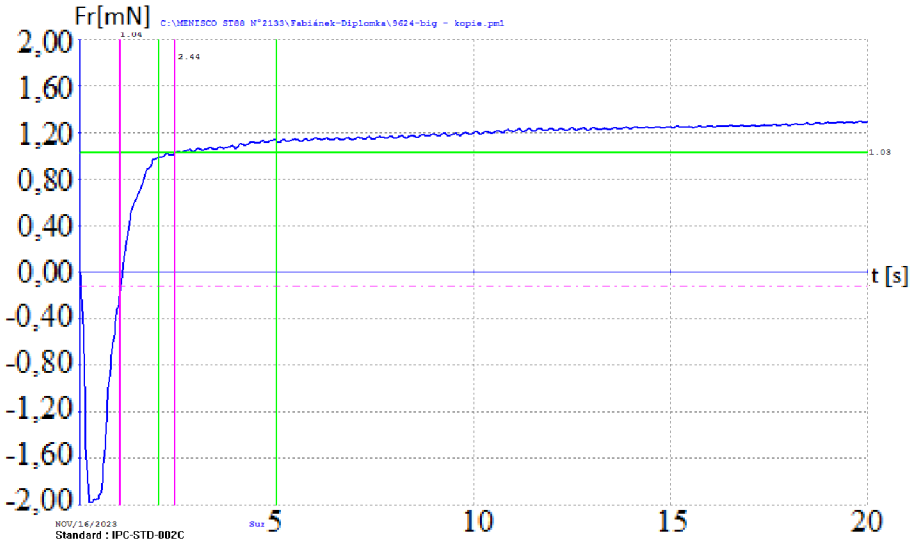


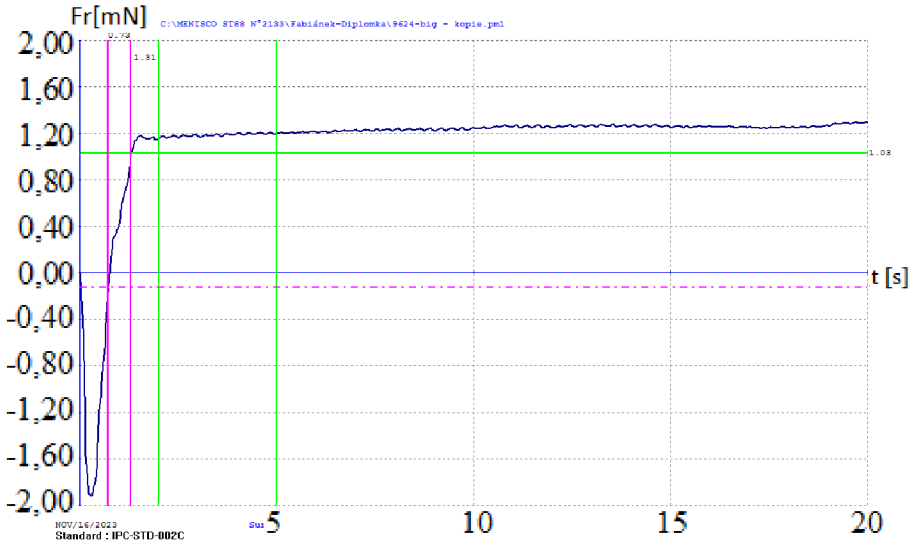


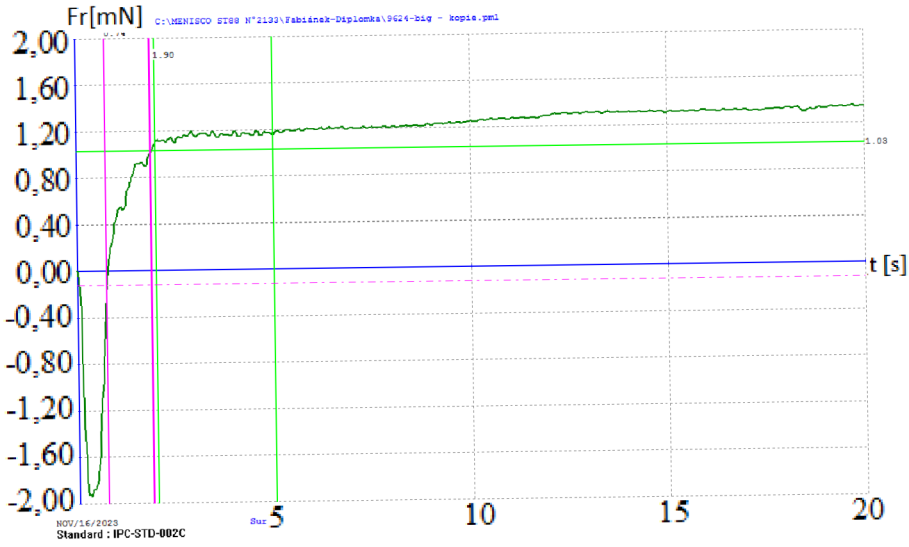

Fr[mN]
C:\MENISCO ST80 N°2133\Fabiánek-Diplomka\9624-press - kopie.pml
1,25
1,00
0,75
0,50
0,25
0,00
-0,25
-0,50
-0,75
-1,00
-1,25
0.89
0.61
t [s]
5
10
15
20
NOV/16/2023
Standard : IPC-STD-002C

A.11 Vzorek 9624Big



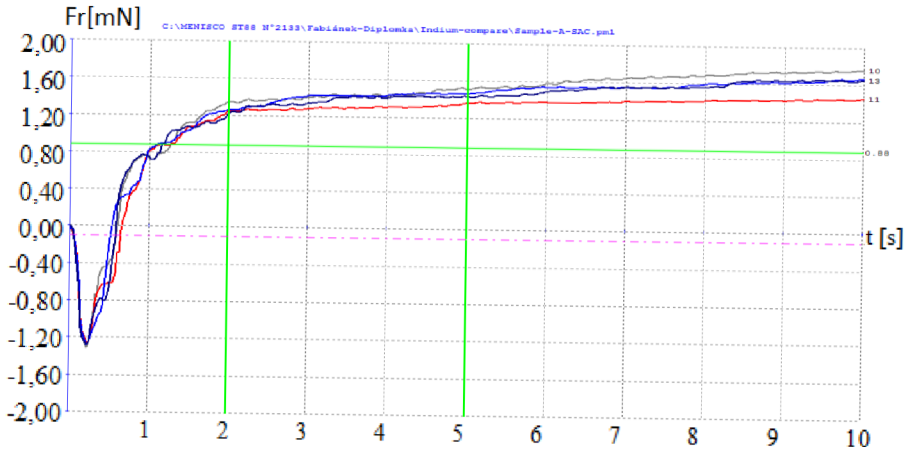




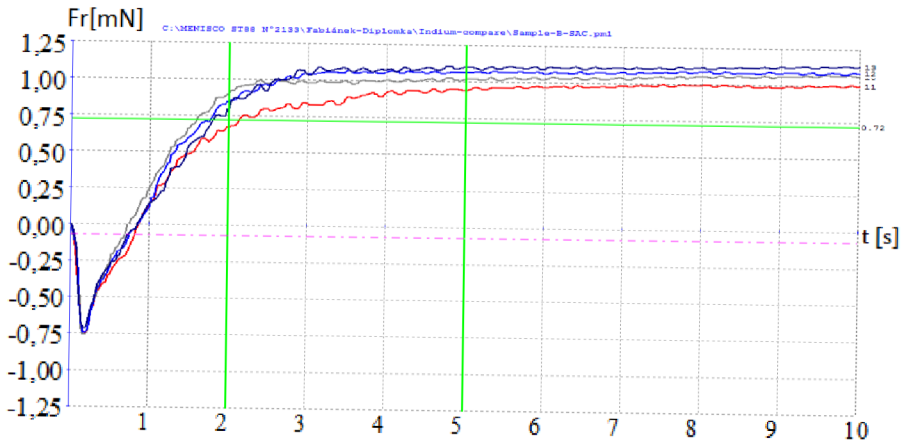

Fr[mN]
C:\MENISCO ST88 N°2133\Fabianek-Diplomka\9624-big - kopia.pml
2,00
1,60
1,20
0,80
0,40
0,00
-0,40
-0,80
-1,20
-1,60
-2,00
1.90
1.08
t [s]
5
10
15
20
NOV/16/2023
Standard : IPC-STD-002C

Příloha D - Srovnání naměřených charakteristik v pájce SAC305

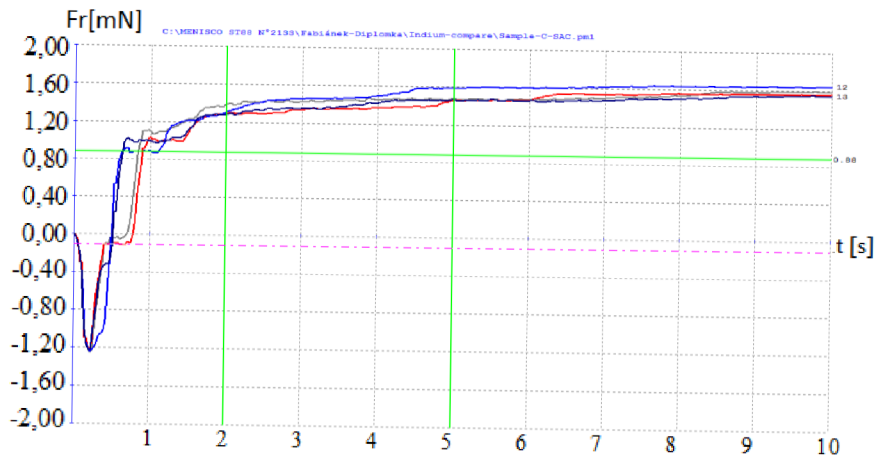
A.12 Vzorek A



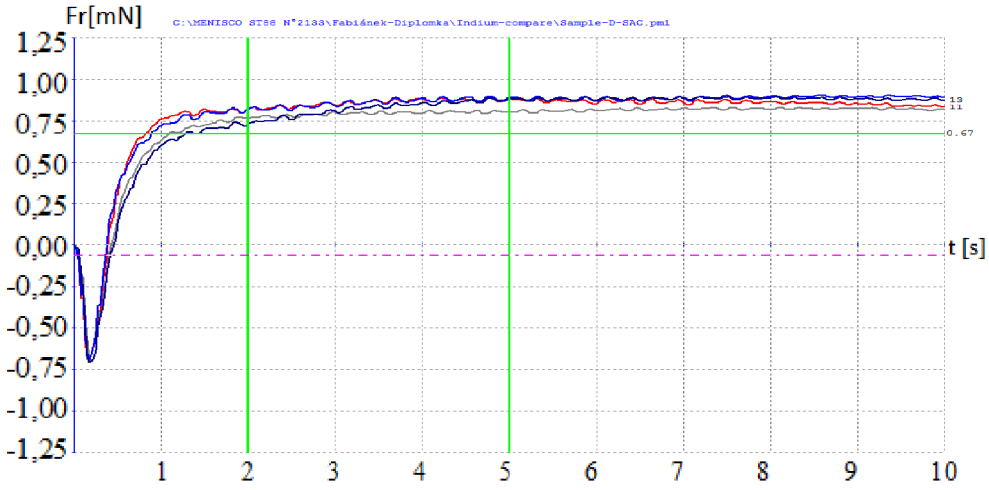
A.13 Vzorek B



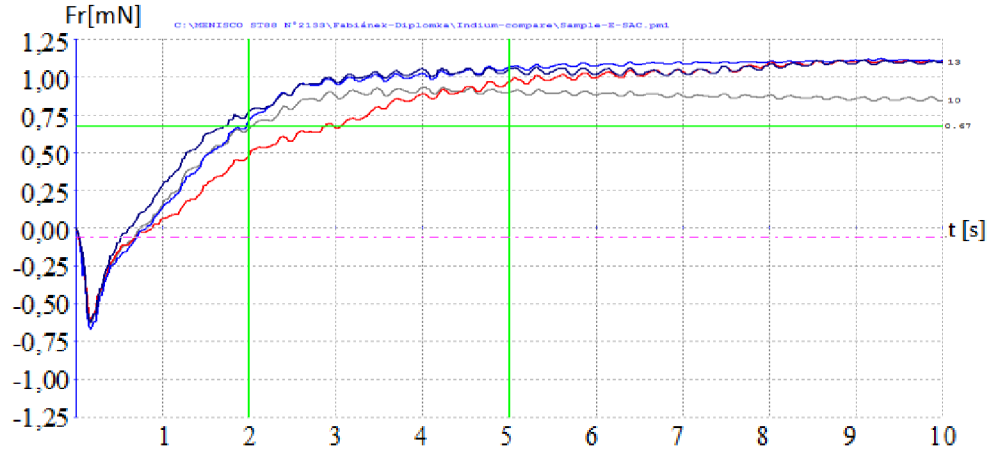
A.14 Vzorek C



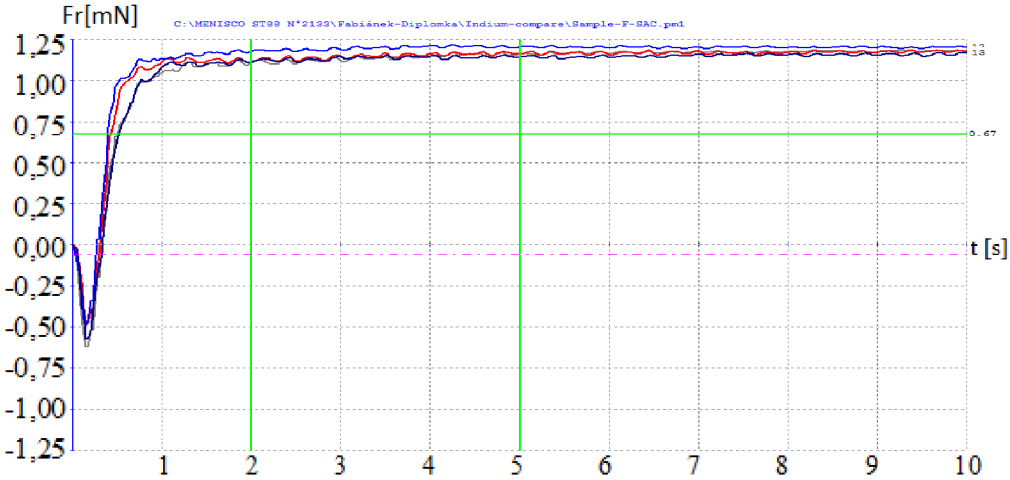
A.15 Vzorek D



A.16 Vzorek E

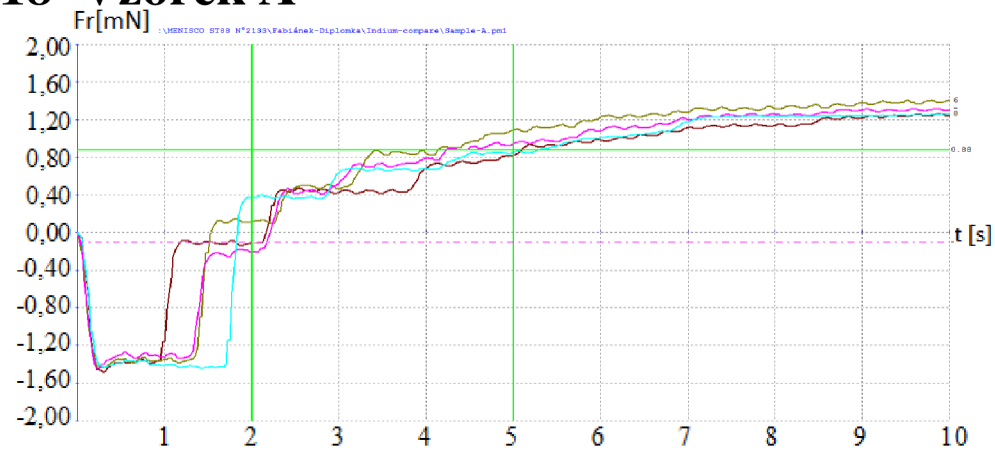


A.17 Vzorek F

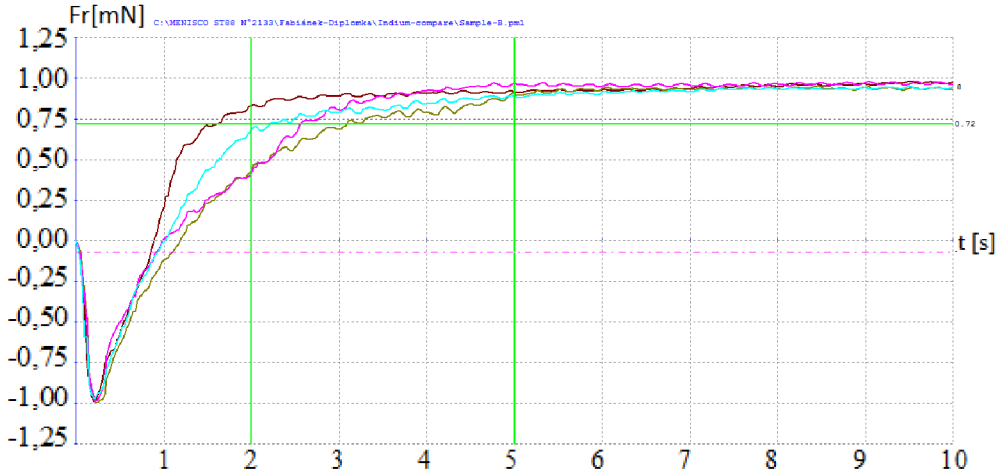


Příloha E - Srovnání naměřených charakteristik v pájce SN100C

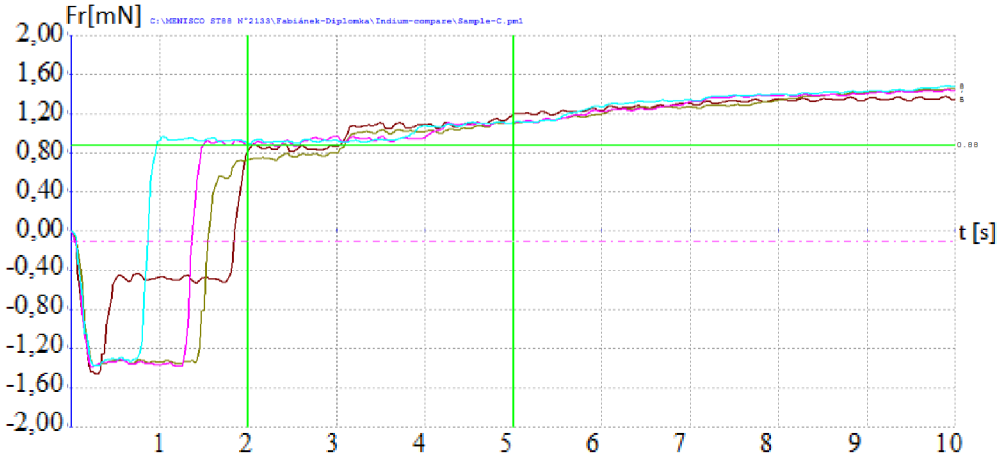
A.18 Vzorek A



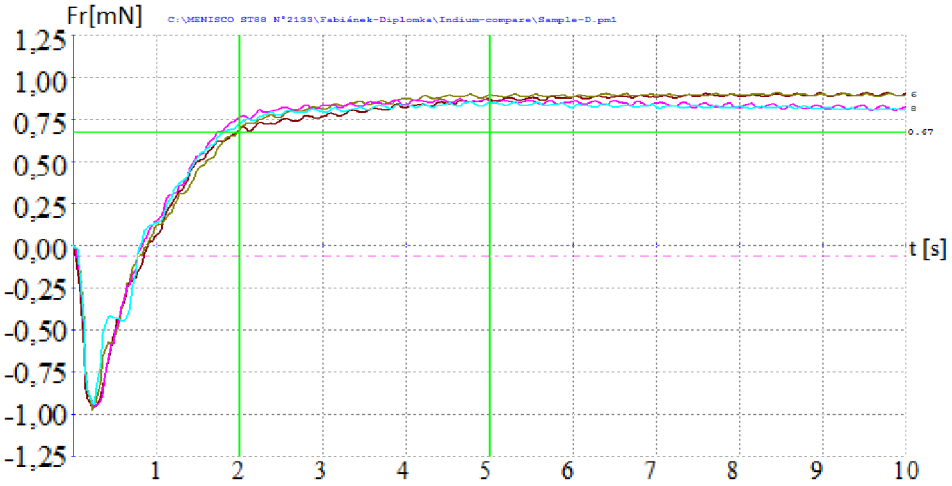
A.19 Vzorek B



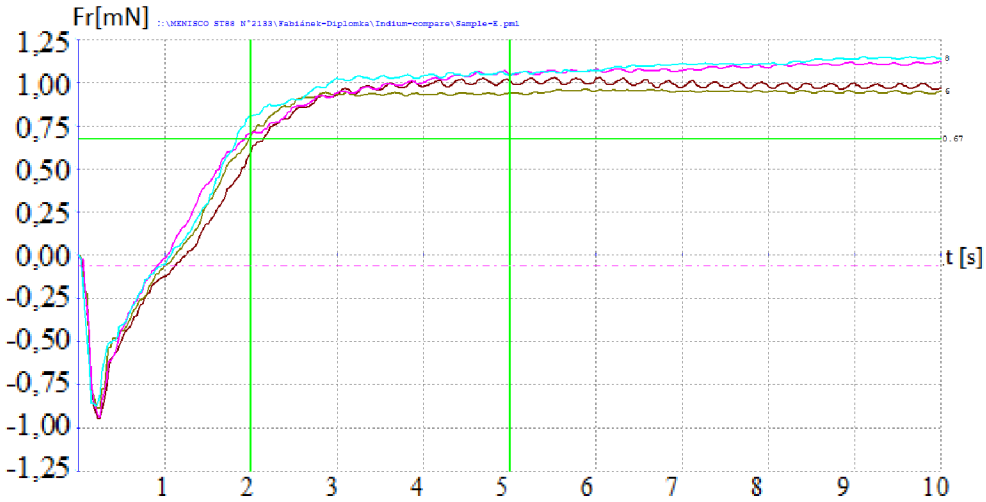
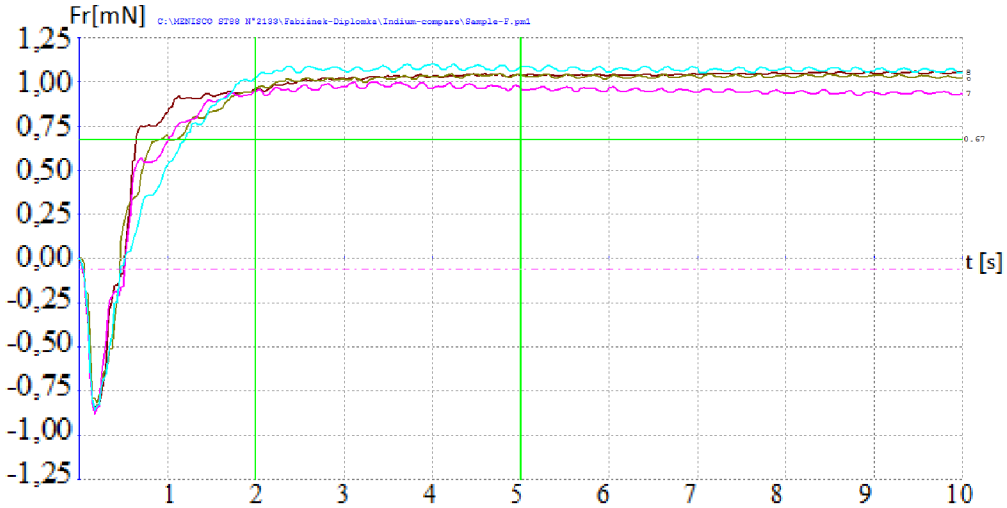
A.20 Vzorek C



A.21 Vzorek D



A.22 Vzorek E



A.23 Vzorek F