



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

NÍZKOTEPLTNÍ BIZMUTOVÉ PÁJECÍ PASTY

BISMUTH LOW TEMPERATURE SOLDER PASTES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Hájka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý,
Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Jan Hájka

ID: 220866

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Nízkoteplotní bizmutové pájecí pasty

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte odbornou literaturu se zaměřením na bizmutové nízkoteplotní pájecí slitiny druhé generace a na materiálové, procesní a environmentální vlivy limitující spolehlivost těchto pájených spojů. Soustředte se i na perspektivní aplikace a na úskalí v jejich použití.

Aplikujte navrženou metodiku zkoušek pevnosti pájeného spoje. Provedte konstrukční úpravu měřicího zařízení s cílem minimalizace rozptylu naměřených dat včetně realizace nových měřicích nástavců. Detailněji se zaměřte na mechanické oddělení součástky od desky. Vyhodnoťte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 2.6.2022

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Tato bakalářská práce se zabývá nízkoteplotními pájecími pastami s různým obsahem bismutu a aditiv. Zaměřuje se na materiálové, procesní a environmentální vlivy, které ovlivňují spolehlivost pájeného spoje. V praktické části se zkoumá vliv izotermického stárnutí a teplotního cyklování na mechanické vlastnosti pájených spojů tvořených eutektickou slitinou cín bismut. Dále jsou srovnávány bismutové pájecí pasty s pastami s aditivy (nanočástice TiO_2) a se slitinou SAC305. Na měřicím zařízení jsou provedeny technické úpravy za účelem zvýšení přesnosti měření.

Klíčová slova

DPS, BiSn, SMD, pájení přetavením, testovací metody

Abstract

This bachelor thesis deals with low-temperature solder pastes with different bismuth content. It focuses on material, process and environmental influences that affect the reliability of the soldered joint. The practical part investigates the effect of isothermal aging and thermal cycling on the mechanical properties of solder joints formed by an eutectic tin-bismuth alloy. Furthermore, tin-bismuth solder pastes are compared to pastes with additives (TiO_2 nanoparticles) and to SAC305 alloy. Technical adjustments are made to the measuring device in order to increase the accuracy of the measurement.

Keywords

PCB, BiSn, SMD, reflow soldering, test method

Bibliografická citace

HÁJKA, Jan. *Nízkoteplotní bizmutové pájecí pasty* [online]. Brno, 2021 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137352>. Semestrální 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:	Jan Hájka
VUT ID studenta:	220866
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2021/22
Téma závěrečné práce:	Nízkoteplotní bismutové pájecí pasty

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: 2. června 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc při výrobě testovacích vzorků a cenné rady k zpracování mé bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Alexandru Otáhalovi, Ph.D. a Ing. Josefu Skácelovi za pomoc při teplotním cyklování vzorků.

V Brně dne: 2. června 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	11
ÚVOD.....	12
1. NÍZKOTEPLTNÍ PÁJECÍ SLITINY	13
1.1 PROCESNÍ VLASTNOSTI NÍZKOTEPLTNÍCH PÁJECÍCH SLITIN.....	13
1.2 VYUŽITÍ NÍZKOTEPLTNÍCH PÁJECÍCH SLITIN	14
2. PÁJECÍ SLITINY BISMUT-CÍN.....	15
2.1 SMÁČIVOST	16
2.2 INTERMETALICKÉ VRSTVY	17
2.3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI	19
3. PÁJECÍ SLITINY BISMUT-CÍN DRUHÉ GENERACE	22
3.1 VLIV NA TEPLITU TAVENÍ	22
3.2 VLIV NA SMÁČENÍ	22
3.3 VLIV NA VNITŘNÍ STRUKTURU	24
3.4 VLIV NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	26
3.5 PÁJECÍ PASTY S EPOXIDOVÝMI PRYSKYŘICEMI	27
4. MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	29
4.1 MĚŘÍCÍ PRACOVIŠTĚ PUSH/PULL V1.0	29
4.2 NESTAVENÍ MĚŘENÍ PEVNOSTI STŘIHEM.....	30
4.3 TESTOVANÉ VZORKY.....	30
4.4 NEPŘESNOSTI MĚŘENÍ	32
4.5 KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY ZAŘÍZENÍ	33
5. MECHANIZMY ODTRŽENÍ SOUČÁSTEK.....	36
5.1 ODTRH OD INTERMETALICKÉ VRSTVY NA PÁJECÍ PLOŠCE	36
5.2 ODTRH V OBJEMU PÁJENÉHO SPOJE.....	37
5.3 KOMBINOVANÝ ODTRH	38
6. VLIV IZOTERMICKÉHO STÁRNUTÍ.....	40
6.1 METODIKA IZOTERMICKÉHO STÁRNUTÍ	40
6.2 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	43
7. VLIV TEPLTNÍHO CYKLOVÁNÍ.....	44
7.1 METODIKA TEPLTNÍHO CYKLOVÁNÍ	44
7.2 MĚŘENÍ PŘED TEPLTNÍM CYKLOVÁNÍM	45
7.3 MĚŘENÍ PO 350 CYKLECH.....	46
7.4 MĚŘENÍ PO 700 CYKLECH.....	47
7.5 MĚŘENÍ PO 1050 CYKLECH	49
7.6 ZMĚNY VLASTNOSTÍ DESEK V PRŮBĚHU STÁRNUTÍ	50
7.7 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	53
8. SROVNÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PÁJENÝCH SPOJŮ	54

8.1	VLIL PŘIDANÝCH NANOČÁSTIC OXIDU TITANU DO SN-58BI PÁJKY.....	54
8.2	VLASTNOSTI SN-58BI PŘI OPRAVÁCH NA DESCE	55
8.3	SAC 305 S PŘÍMĚSÍ NIKLU A KOBALTU.....	57
8.4	SROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ PÁJEK.....	58
	ZÁVĚR.....	60
	LITERATURA.....	62

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Multičipový procesor na jednom substrátu (AMD Epyc 7702). [4]	14
Obrázek 2.1 Fázový diagram bismut-cín. [2]	15
Obrázek 2.2 Pohled na vnitřní strukturu eutektické BiSn slitiny pod elektronovým mikroskopem. [1]....	16
Obrázek 2.3 Pohled na intermetalické vrstvy pájených spojů BiSn pájkou s různým obsahem bismutu. [5]18	
Obrázek 2.4 Vliv stárnutí na strukturu intermetalické vrstvy. [5]	19
Obrázek 2.5 Tahové vlastnosti slitin bismutu a cínu. [2].....	20
Obrázek 3.1 Smáčecí vlastnosti Sn-58Bi slitin s příměsí nanočástic. [6]	23
Obrázek 3.2 Závislost tloušťky mezifázových přechodu na koncentraci nanočástic. [6]	24
Obrázek 3.3 Vliv aditiv na tloušťku intermetalické vrstvy po přetavení. [6]	25
Obrázek 3.4 Pevnost v tahu slitin Sn-58Bi s kovovými aditivy. [6].....	26
Obrázek 3.5 Pevnost ve střihu pájecích slitin BiSn a nanoaditivy. [6]	27
Obrázek 3.6 Přetavení pájecí pasty s příměsí epoxidu. [6]	28
Obrázek 3.7 Vliv epoxidové vrstvy na pevnost pájených spojů ve střihu, na různých povrchových úpravách a době stárnutí. [6]	28
Obrázek 4.1 Pracoviště pro měření pevnosti pájených spojů [7]	29
Obrázek 4.2 Řídící jednotka PushPull V1.0 [7]	30
Obrázek 4.3 Testovací DPS.	31
Obrázek 4.4 Teplotní profil pájení přetavením.	32
Obrázek 4.5 Kontrolní měření pro zlepšení přesnosti.	32
Obrázek 4.6 Pracoviště pro měření pevnosti pájených spojů, před úpravami bez kamery (vlevo) a po úpravách (vpravo).	34
Obrázek 4.7 Kontrolní měření se vzdáleností hlavy 0,1mm	35
Obrázek 4.8 Kontrolní měření s hlavou v kontaktu s deskou	35
Obrázek 5.1 Odtrh od intermetalické vrstvy	36
Obrázek 5.2 Ilustrace odtrhu od intermetalické vrstvy	36
Obrázek 5.3 Odtrh v objemu pájeného spoje	37
Obrázek 5.4 Ilustrace odtrhu v objemu pájeného spoje	37
Obrázek 5.5 Kombinovaný odtrh.....	38
Obrázek 5.6 Odtrh od intermetalické vrstvy na terminálu rezistoru (vlevo) a od pájecí plošky (vpravo) vyfocen laserovým skenovacím mikroskopem.	39
Obrázek 6.1 Průběh síly v čase při trhání součástek ihned po zapájení.....	41
Obrázek 6.2 Průběh síly v čase při trhání součástek po stárnutí při 90°C	41
Obrázek 6.3 Průběh síly v čase při trhání součástek po stárnutí při -40°C	42
Obrázek 6.4 Výběr typického průběhu z řady průběhů před stárnutím.	42
Obrázek 6.5 Porovnání typických průběhů při izotermickém stárnutí.....	43
Obrázek 7.1 Nastavený teplotní profil cyklování.....	44
Obrázek 7.2 Typické průběhy síly v čase při trhání součástek na deskách před teplotním cyklováním. ...	46
Obrázek 7.3 Typické průběhy síly v čase při trhání součástek na deskách po 350 cyklech.	47
Obrázek 7.4 Typické průběhy síly v čase při trhání součástek na deskách po 700 cyklech.	48
Obrázek 7.5 Typické průběhy síly v čase při trhání součástek na deskách po 1050 cyklech.	49
Obrázek 7.6 Typické průběhy síly v čase při trhání rezistorů v jednotlivých etapách cyklování (deska 2.a ROL0)	50

Obrázek 7.7 Typické průběhy síly v čase při trhání rezistorů v jednotlivých etapách cyklování (deska 2.b ROL0)	51
Obrázek 7.8 Typické průběhy síly v čase při trhání rezistorů v jednotlivých etapách cyklování (deska 2.c ROL1)	51
Obrázek 7.9 Typické průběhy síly v čase při trhání rezistorů v jednotlivých etapách cyklování (deska 2.d ROL1)	52
Obrázek 7.10 Počet odtrhů od intermetalické vrstvy na pájecí plošce podle počtu cyklů.	53
Obrázek 8.1 Průběh síly v čase při trhání součástek zapájených slitinou cín-bismut s příměsí nanočástic oxidu titanu.....	54
Obrázek 8.2 Tavidlové zbytky vzniklé po pájení pastou PF602-P30 s příměsí oxidu titanu.	55
Obrázek 8.3 Průběh síly v čase při trhání znovu zapájených součástek.	56
Obrázek 8.4 Struktura na okraji pájecí plošky zaznamenaná laserovým skenovacím mikroskopem.	56
Obrázek 8.5 Krystalický bismut [10]	57
Obrázek 8.6 Průběh síly v čase při trhání součástek zapájených slitinou SAC 305 s příměsí niklu a kobaltu.....	57
Obrázek 8.7 Typické průběhy síly při trhání součástek zapájených danou slitinou.	58

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1 Vybrané pájecí slitiny a jejich teploty tavení. [3]	13
Tabulka 2.1. Smáčivost vybraných pájecích slitin na různých povrchových úpravách. [1].....	17
Tabulka 2.2 Pevnost pájeného spoje na měděném substrátu. [1]	20
Tabulka 3.1. Teploty tání a tuhnutí vybraných BiSn pájek se příměsí kovů. [6]	22
Tabulka 6.1 Mez pevnosti ve stříhu desky při izotermickém stárnutí	40
Tabulka 7.1 Mez pevnosti před teplotním cyklováním.	45
Tabulka 7.2 Mez pevnosti 350 teplotních cyklech.	46
Tabulka 7.3 Mez pevnosti 700 teplotních cyklech.	48
Tabulka 7.4 Mez pevnosti po 1050 teplotních cyklech.	49
Tabulka 7.5 Počet odtrhů od intermetalické vrstvy na pájecí plošce.	52
Tabulka 8.1 Srovnání meze pevnosti ve stříhu jednotlivých slitin.	58

ÚVOD

Používání olova jakožto těžkého kovu nese mnoho rizik, jak pro životní prostředí jako takové, tak i pro osoby jemu vystavené. Proto se v posledních desítkách let objevuje snaha o omezení jeho používání v průmyslu a nahrazení méně škodlivými látkami. Tyto materiálové změny však často negativně dopadají na kvalitu výrobků. Pro pájecí slitiny znamenalo odstranění olova nástup pájecích slitin s velkým obsahem cínu obsahující aditiva snižující teplotu tavení a zlepšující elektrické a mechanické vlastnosti (např. SAC). To však znamená zvýšení teploty pájení oproti původním PbSn pájkám a tím i zvýšení energetických nákladů na pájení, větší teplotní namáhání jak součástek, tak substrátu, a mnohdy celkově horší kvalitu a spolehlivost pájeného spoje. Kvůli již zmíněným důvodům existuje snaha snižovat teplotu tavení pájecích slitin a jako jeden z nejlepších kandidátů se ukazuje slitina cín bismut, která má potenciál nahradit pájky olověné.

1. NÍZKOTEPLTNÍ PÁJECÍ SLITINY

Po přechodu na bezolovnaté pájení, které zvýšilo procesní teploty a přineslo tak mnoho problémů jak procesních, tak materiálových, se nízkoteplotní pájecí slitiny staly důležitým tématem. Nízkoteplotní slitiny mají potenciál vyřešit problémy vzniklé přechodem z PbSn slitin na slitiny rodiny SAC. Přesná definice nízkoteplotních pájecích slitin sice neexistuje, ale obecně se za nízko teplotní slitiny označují ty, které mají nižší teplotu tavení než již zmiňované slitiny z rodiny SAC, tedy 220 °C. V některé literatuře se jako nízkoteplotní označují až slitiny s nižším bodem tavení než původní eutektické slitiny PbSn, tedy zhruba 180 °C. [2]

Tabulka 1.1 Vybrané pájecí slitiny a jejich teploty tavení. [3]

Slitina	Hmotnostní poměr %	Teplota tavení °C
SN100C	Sn-0,7Cu	227
SAC305	Sn-3Ag-0,5Cu	217
PbSn	Sn-37Pb	183
BiSn	Sn-58Bi	138
SnIn	Sn-50In	118-125
BiIn	Bi-33In	109

O téma těchto slitin se zajímalo mnoho studií a výzkumů a jako nejlepší kandidát pro nízkoteplotní aplikace se ukazují slitiny s vysokým obsahem bismutu. O použití těchto slitin se uvažovalo již při přechodu na bezolovnaté pájení, avšak panovaly obavy, že by ve výrobních linkách mohlo dojít ke kontaminaci olovem, což by představovalo značný problém, vzhledem k velmi nízkému bodu tavení SnBiPb slitin. Tyto obavy však již dnes neplatí vzhledem tomu, že většina výrobních procesů je již bez olova, a taková kontaminace tedy nehrozí. [2]

1.1 Procesní vlastnosti nízkoteplotních pájecích slitin

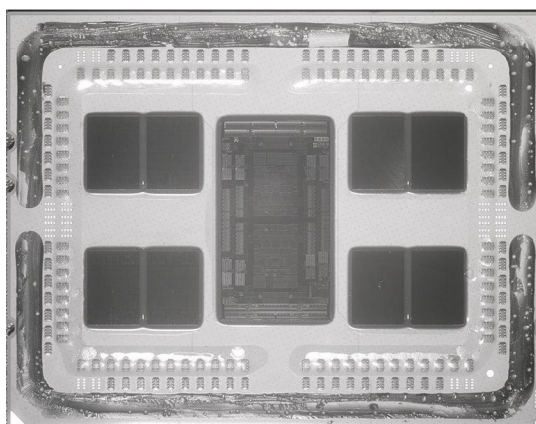
Z procesního hlediska je výhod hned několik. Implementace nízkoteplotních pájecích slitin v kombinaci s klasickými lead-free pájkami umožňuje dvoustupňové přetavení, tedy jedna strana PCB je osazena SMT součástkami za použití klasické pájecí pasty a přetavena při vyšší teplotě. Druhá strana je následně osazena součástkami s menší tolerancí pro vysoké teploty za použití nízkoteplotní pájky, druhé přetavení tak může probíhat při nižší teplotě a nehrozí, že by se již zapájené spoje znovu tavily. [2]

Další nová procesní možnost je pájet THT součástky metodou pin-in-paste (vývod v pastě). To znamená, že se do otvorů v PCB nanese pájecí pasta, do které se zasunou THT součástky, a je možné pájet je přetavením. Výhodou nízkoteplotních slitin je u této metody to, že součástky nejsou vystaveny vyšší teplotě, než kdyby byly pájeny vlnou například pájkou SAC. Pájení vlnou se dnes používá především pro pájení větších součástek, jako jsou například konektory, které by nevydržely vysoké teploty přetavení dnešních bezolovnatých pájek. Tato metoda tak efektivně řeší problémovou implementaci některých nízkoteplotních pájek pro pájení vlnou. [2]

1.2 Využití nízkoteplotních pájecích slitin

Jedním z nejdůležitějších dopadů je implementace nízkoteplotních pájecích slitin do výroby mikroprocesorů s několika čipy zapájenými na jednom substrátu. Tyto čipy mají tisíce vstupních a výstupních pinů a jsou velice náchylné na prohýbání v důsledku vysokých teplot, jako je například přetavení klasických bezolovnatých pájek. Snížení procesních teplot má za důsledek menší prohýb substrátu a snižuje tak stres, který zapájené spoje podstupují během samotného pájení a následného chladnutí. [2]

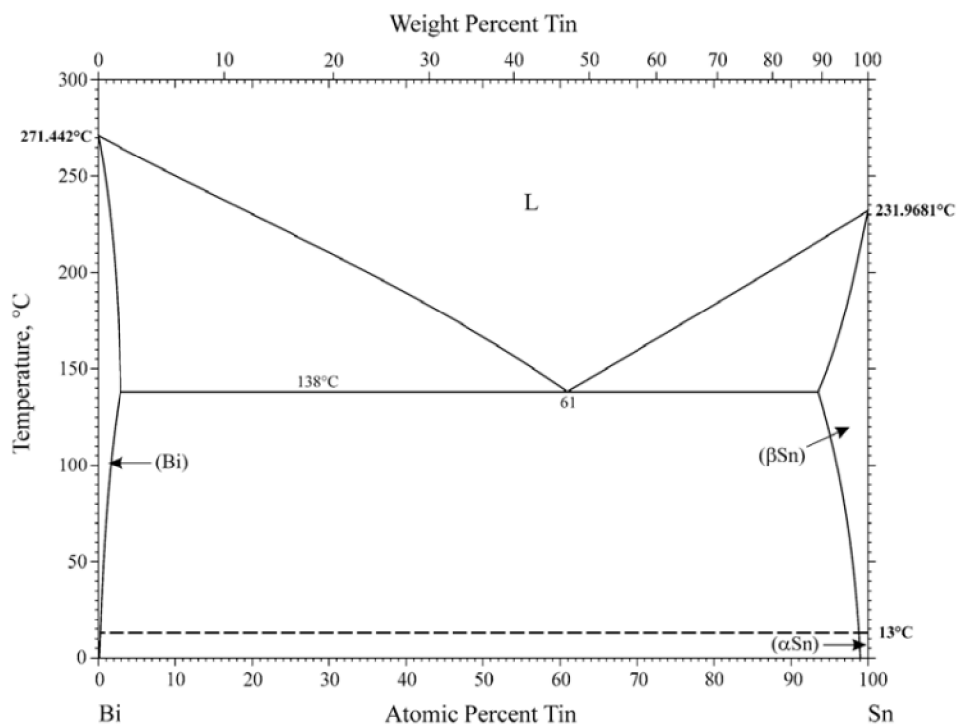
Nízkoteplotní bezolovnaté pájecí slitiny se již tedy nějakou dobu využívají, jejich využití je však velmi úzké a zahrnuje výhradně aplikace, kde je nízká procesní teplota prioritou nad ostatními parametry procesu, kde tyto slitiny často zaostávají za slitinami klasickými. Vzhledem k vývoji trhu, který požaduje stále zmenšování součástek, a také tlaky na úspornost a ekologičnost výroby, se využití nízkoteplotních pájek stále rozrůstá a jeví se jako nadějná možnost vývoje. [2]



Obrázek 1.1 Multičipový procesor na jednom substrátu (AMD Epyc 7702). [4]

2. PÁJECÍ SLITINY BISMUT-CÍN

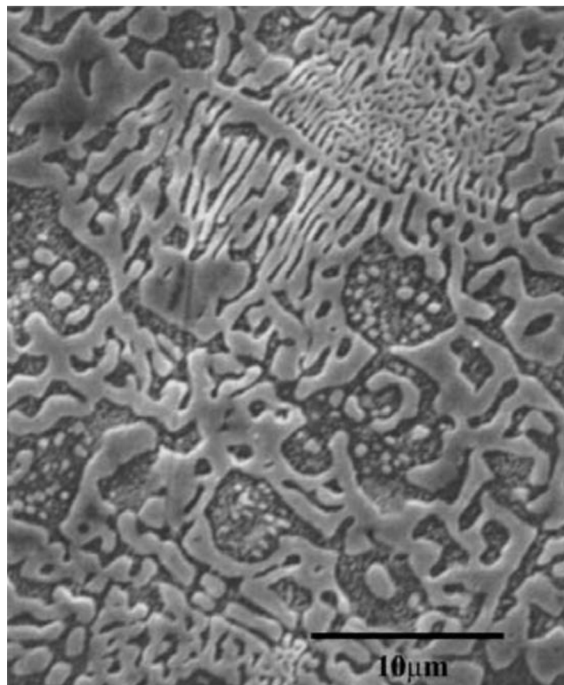
Pro měkké pájení v elektrotechnice se vždy používaly pájecí slitiny na bázi cínu (teplota tání 231,9 °C), který se míchal s dalšími prvky. Nejpoužívanější příměsí bylo dlouhá léta olovo (teplota tání 327,5 °C). V posledních desítkách let je kladen stále větší důraz na zdravotní dopady výrobního procesu na pracovníky a na celkový dopad výroby na životní prostředí. Z tohoto důvodu se zásadně omezilo používání olova v elektrotechnické výrobě jen na případy, kdy je nezbytné využít kvality olověných pájek, jako například zdravotnictví, nebo vesmírné aplikace. Ve zbytku výrobních aplikací se olovo přestalo používat a bylo nahrazeno pájkami tvořenými cínem a pouze minimem příměsí jiných prvků. Za původní olovnaté pájky se dodnes hledá náhrada. [3]



Obrázek 2.1 Fázový diagram bismut-cín. [2]

Jako nejslibnější nízkoteplotní pájecí slitiny se ukazují směsi cínu s různými hodnotami příměsí bismutu, konkrétně eutektické složení obsahující 43 hmotnostních procent cínu a 57 hmotnostních procent bismutu s teplotou tavení 138 °C. Vnitřní struktura této slitiny se skládá z lamel bismutu a cínu a obě tyto vnitřní struktury jsou plně nasyceny druhým prvkem, jak můžeme vidět na obrázku 2.2, kde je struktura cínu znázorněna tmavě šedou a struktura bismutu světle šedou barvou. Z této vnitřní struktury také vychází jedna z největších slabín této slitiny, a to zvyšování její tvrdosti a

křehkosti během stárnutí, to je způsobeno migrací bismutu do oblastí bohatých na cín, čímž se mění vnitřní struktura a pájka tvrdne a křehne. [1]



Obrázek 2.2 Pohled na vnitřní strukturu eutektické BiSn slitiny pod elektronovým mikroskopem. [1]

Jedním z problémů těchto této slitiny je horší použitelnost pro pájení vlnou, kde je v pájecím zařízení slitina udržována v tekutém stavu. Z roztavené pájky se pomocí čerpadla tvoří vlna, nad kterou prochází pájená deska, a dojde k zapájení součástek. Problémem je, že BiSn slitiny mají v tekutém stavu nižší objem než ve stavu tuhém, což by představovalo problém při odstavce zařízení, kdy pájka uvnitř ztuhne, tím pádem zvětší objem a potenciálně hrozí poškození vnitřního ústrojí zařízení. [2]

2.1 Smáčivost

Eutektická BiSn slitina je při smáčecím procesu velice citlivá na přítomnost nečistot mnohem více než jiné olovnaté a bezolovnaté pájecí slitiny s vyšší teplotou tavení. Proces smáčení komplikuje přítomnost např. mědi, niklu či paladia, což jsou bohužel materiály, které se běžně vyskytují na pájecích ploškách. Nejlepšího smáčení dosahuje tato pájka na povrchové úpravě ENiG, kde dosahuje lepšího smáčení než pájky olovnaté. Na ostatních površích je již smáčivost horší, a aby se i zde dala BiSn pájka použít, je potřeba použití agresivnějších tavidel než je kalafuna, která lépe funguje při nižších teplotách. [1]

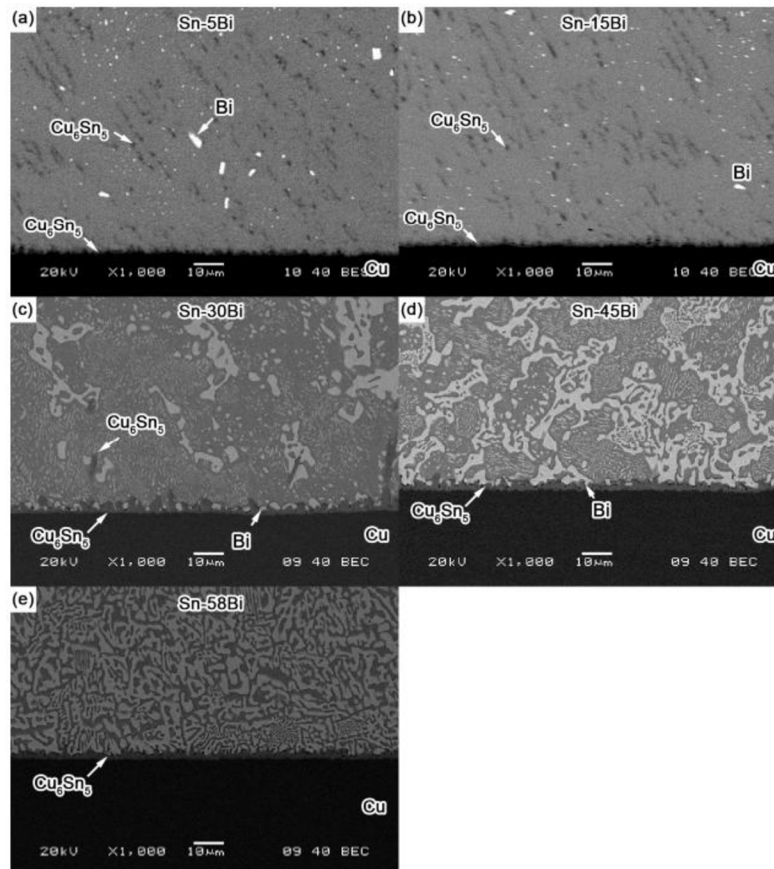
Tabulka 2.1. Smáčivost vybraných pájecích slitin na různých povrchových úpravách. [1]

Povrchová úprava	Procentuální část smočeného povrchu [%]			
	Čistá měď	ENiG	Poniklovaný povrch	Čistý nikl
Sn-58Bi	72	89	69	69
Sn-37Pb	91	86	99+	81
Sn-3,5Ag	71	79	74	72

Experiment, jehož výsledky se nacházejí v tabulce 2.1, probíhal při teplotě 260 °C po dobu 5 minut za použití RMA (halogenidy aktivované tavidlo na bázi přírodní pryskyřice). Výsledky tohoto experimentu jsou však pouze orientační, protože použitá teplota značně převyšuje teplotu, při jaké se plánuje BiSn pájky používat. Vlastnosti této slitiny by tak v reálném výrobním procesu byly pravděpodobně horší. [1], [3]

2.2 Intermetalické vrstvy

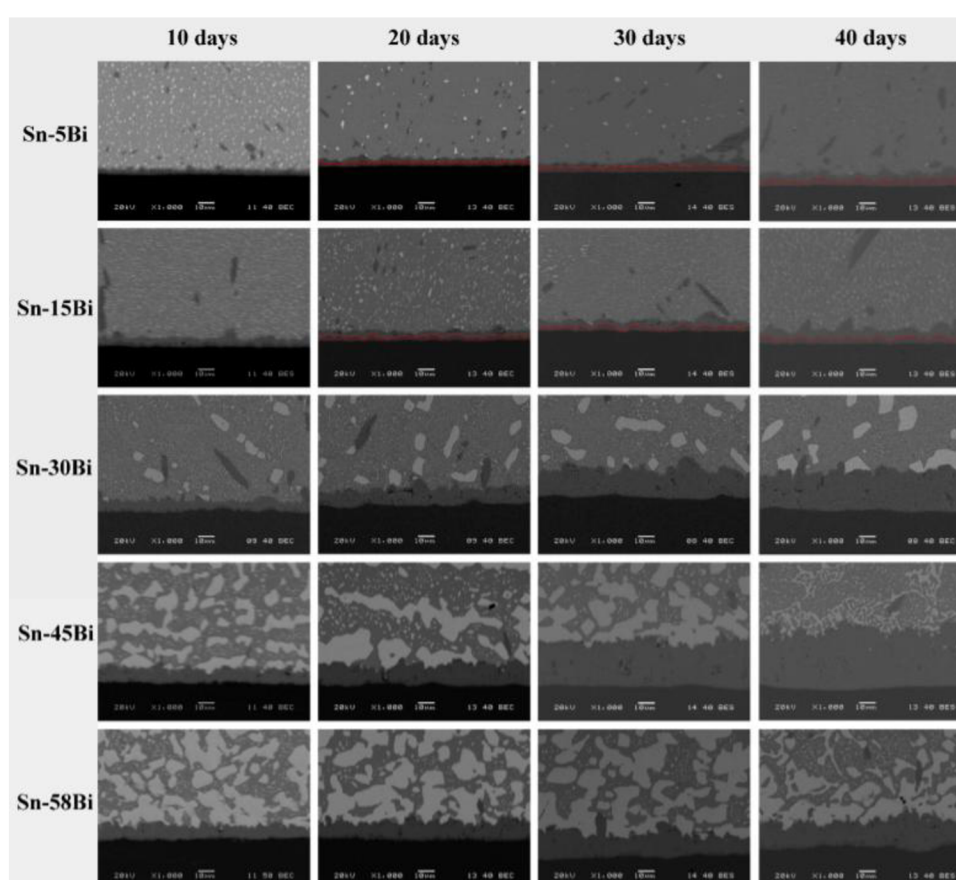
Při pájení dochází ke kontaktu pájecí plošky s roztavenou pájkou, která pro kov v pevné fázi působí jako rozpouštědlo, dochází tedy k difuzi částic mezi pájecí ploškou a pájkou a k následným chemickým reakcím za vzniku intermetalických sloučenin, např. Cu_3Sn , Ag_3Sn , nebo Cu_6Sn_5 . Vlastnosti zapájeného spoje závisí na vlastnostech vrstvy těchto sloučenin na rozhraní pájeného spoje a pájecí plošky, hlavně tedy na tloušťce a krystalické struktuře této vrstvy. Šířka intermetalické vrstvy závisí jak na procesních parametrech, jako je teplota, nebo čas pájení, tak na materiálech pájky a povrchové úpravy plošek. [1]



Obrázek 2.3 Pohled na intermetalické vrstvy pájených spojů BiSn pájkou s různým obsahem bismutu. [5]

Na obrázku 2.3 můžeme pozorovat intermetalické vrstvy pohledem z elektronového mikroskopu, mezi měděným substrátem a pájkami (Sn-5Bi, Sn-15Bi, Sn-30Bi, Sn-45Bi, Sn-58Bi). Vzniklé intermetalické sloučeniny byly identifikovány jako Cu_6Sn_5 . V případě pájek Sn-5Bi a Sn-15Bi došlo k vytvoření asi 1 μm tlusté hřebínkovité intermetalické vrstvy, mimo to se objevily Cu_6Sn_5 vločky rovnoměrně rozprostřené v objemu BiSn pájky. Intermetalická vrstva hřebínkovitého typu se objevila i u pájky Sn-30Bi, avšak byla znatelně hrubší než v případě prvních dvou slitin. Na rozhraní intermetalické vrstvy a mřížky pájky můžeme pozorovat vrstvu čistého bismutu a opět můžeme pozorovat struktury tvořené Cu_6Sn_5 , tentokrát však byly větší a rozprostřeny byly spíše nerovnoměrně. Na zbylých dvou slitinách Sn-45Bi, Sn-58Bi, můžeme opět pozorovat intermetalickou vrstvu tlustou asi 2 μm , která je znatelně rovnější než v předchozích případech, tvořenou Cu_6Sn_5 na jejímž rozhraní s mřížkou pájky se opět nachází struktura bohatá na bismut. V ani jedné z těchto dvou slitin se v jejím objemu nevyskytovaly Cu_6Sn_5 struktury mimo intermetalickou vrstvu. [5]

Intermetalické vrstvy se také mění v čase, tyto změny můžeme pozorovat na obrázku 2.4. Stárnutí probíhalo při teplotě 125 °C po dobu 10, 20, 30 a 40 dnů. Ve všech případech lze pozorovat nárůst a zdrsnění intermetalické vrstvy, nejvyšší byl u pájky Sn-45Bi. U pájek Sn-5Bi, Sn-15Bi a Sn-30Bi došlo ke zvýšení výskytu intermetalických sloučenin mimo intermetalickou vrstvu. V případě pájek Sn-30Bi, Sn-45Bi a Sn-58Bi došlo ke zvýšení koncentrace fáze bohaté na bismut na rozhraní intermetalické vrstvy a samotné pájky. Tento růst je způsoben tím, že se růstem Cu_6Sn_5 spotřebovává cín z objemu pájky a na jeho místě zůstává na bismut bohatá oblast. [5]



Obrázek 2.4 Vliv stárnutí na strukturu intermetalické vrstvy. [5]

2.3 Mechanické vlastnosti

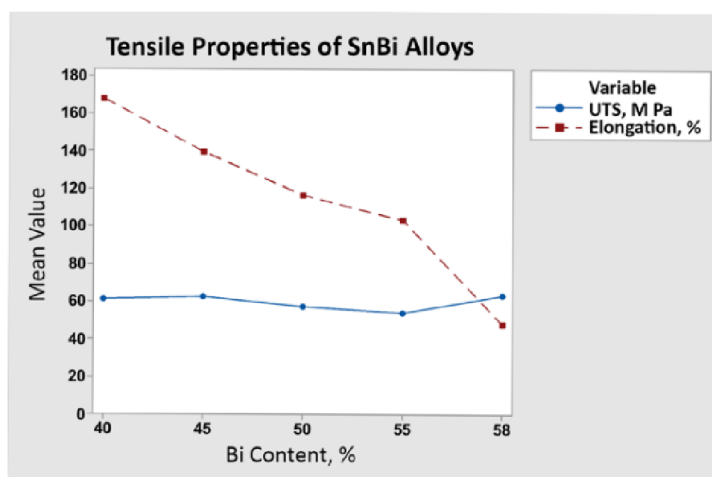
Při větším objemu jsou mechanické vlastnosti eutektické BiSn pájky srovnatelné, nebo dokonce lepší než u olovnatých pájek. Vlastnosti slitiny ve větším objemu však nelze přímo převést na vlastnosti pájeného spoje, který je tvořen mnohem menším množstvím materiálu. Na jeho mechanické vlastnosti mají zásadní vliv i jiné faktory než vnitřní

struktura, jako třeba intermetalické vrstvy. Srovnání mechanických vlastností pájených spojů se nachází v tabulce 2.2. V této tabulce lze jasně vidět, že pevnost spoje reprezentovaná pevností ve smyku je silně závislá na rychlosti deformace a rostoucí rychlostí klesá pevnost spoje. Dále lze srovnat tvrdost BiSn pájky oproti pájce Sn-0,7Cu, pájené spoje BiSn se před odtrhnutím prodloužily řádově o polovinu méně, než spoj pájky Sn-0,7Cu což ukazuje na vyšší tvrdost BiSn slitiny. [1]

Tabulka 2.2 Pevnost pájeného spoje na měděném substrátu. [1]

	Rychlost deformace [mm/min]	Pevnost ve smyku [MPa]	Prodloužení [%]
Sn-57Bi	0,05	25,3	4,8
Sn-57Bi	50,00	19,6	3,2
Sn-37Pb	0,10	32,7	-
Sn-37Pb	50,00	18	-
Sn-0,7Cu	0,05	26,8	10,2
Sn-3,5Ag	0,10	27	-

Pevnost jednotlivých slitin na bázi cín-bismut samozřejmě také závisí na obsahu bismutu ve slitině. Vliv obsahu bismutu na tahové vlastnosti slitiny je znázorněn na obrázku 2.5. Modrá křivka ukazuje maximální pevnost v tahu, tedy při jakém tlaku dojde k roztržení zkoumaného vzorku. Červená křivka ukazuje, k jakému prodloužení došlo v bodě přetržení. Z grafu je patrné že s rostoucím podílem bismutu ve slitině, slitina tvrdne a dochází k menšímu prodloužení. [2]



Obrázek 2.5 Tahové vlastnosti slitin bismutu a cínu. [2]

V důsledku výše zmíněných vlivů, jako je vyšší křehkost než u bezolovnatých pájek, nebo mechanismy růstu intermetalické vrstvy vyplývá, že hlavním problémem eutektické BiSn slitiny je její velmi špatná odolnost proti mechanickým šokům a nárazům. A tato odolnost se navíc zhoršuje stárnutím spoje. Proto se tato slitina nehodí pro aplikace vyžadující spolehlivost jako je například letectví či vesmírné aplikace. [2]

3. PÁJECÍ SLITINY BISMUT-CÍN DRUHÉ GENERACE

Jak již bylo zmíněno, pájecí slitiny na bázi bismut-cín nemají příliš dobré mechanické vlastnosti pájeného spoje. Největším problémem je jejich křehkost, malá schopnost se elasticky deformovat a tím způsobená náchylnost na poškození mechanickým šokem, jako je například pád výrobku na zem. Právě tyto problémy se snaží vyřešit pájecí slitiny BiSn druhé generace. Tyto pájky vycházejí převážně z eutektické slitiny BiSn, která je legována dalšími kovy, nanočásticemi, nebo je součástí pájecí pasty epoxidová pryskyřice působící jako lepidlo. [6]

3.1 Vliv na teplotu tavení

Přidáním malého množství dalších kovů do slitiny se samozřejmě změní její vlastnosti včetně teploty tání. Nejčastěji se používají prvky jako stříbro, měď, titan, indium, antimon, kobalt, nebo zinek, které tvoří řádově až 10 % hmotnosti slitiny. Až na indium vede přidání dalšího kovu vždy ke zvýšení teploty tavení, tyto teploty ovšem stále nepřekračují 183 °C Sn-37Pb. Teploty tavení a tuhnutí vybraných slitin jsou vypsány v tabulce 3.1. [6]

Tabulka 3.1. Teploty tání a tuhnutí vybraných BiSn pájek se příměsí kovů. [6]

	Tuhnutí [°C]	Tání [°C]
Sn-58Bi	130,2	139,0
Sn-58Bi-1Ti	139,1	143,4
Sn-58Bi-0,1Ag	136,2	139,7
Sn-58Bi-0,5Ag	135,7	138,2
Sn-58Bi-1Ag	137,0	142,0
Sn-58Bi-4.0Ag	138,1	145,5
Sn-58Bi-2.0In	129,8	135,0
Sn-20Bi-10In	143,0	193,0
Sn-58Bi-0.5Co	140,1	145,0

Jako aditiva se běžně používají také nanočástice jako (Y_2O_3 , TiO_2 , SnO_2 , Cu, nebo Ni). Přidání těchto aditiv nemá na teploty tavení a tuhnutí zásadní vliv a při koncentracích až do 3 % hmotnosti ji ovlivní jen řádově jen asi o 1 °C. [6]

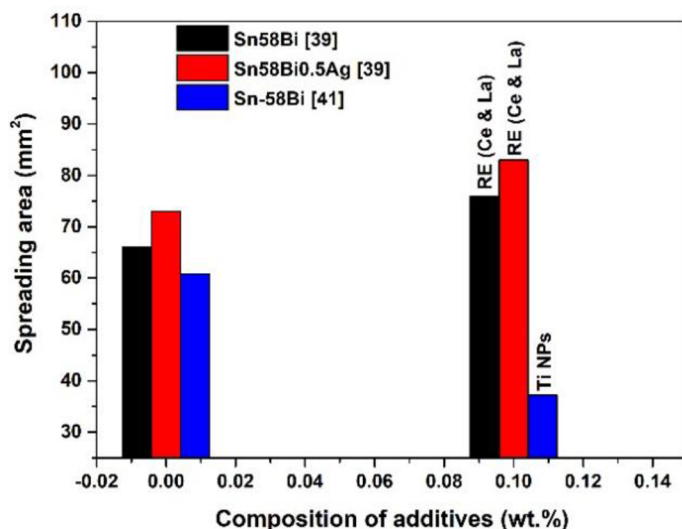
3.2 Vliv na smáčení

Smáčení má velký vliv na formování a následně na kvalitu pájeného spoje, jak již bylo zmíněno Sn-58Bi na většině povrchových úprav zaostává jak za olovnatou, tak za

bezolovnatou konkurencí. Zlepšení smáčecích vlastností je tak důležité proto, aby bylo možné použitelnost těchto slitin rozšířit. Smáčecí vlastnosti jsou opět ovlivněny aditivy, stejně jako tomu bylo u teplot tání slitin. [6]

Přidáním stříbra do Sn-58Bi se zmenšuje úhel smočení a smáčivost se dále mírně zlepšuje s rostoucí koncentrací stříbra. To však neplatí v ochranné dusíkové atmosféře, kde má zvyšující se koncentrace opačný efekt. Přidáním mědi do Sn-58Bi se výrazně zlepši smáčení při pájení na měděných ploškách, to je způsobeno tím, že se měď koncentruje na povrchu destičky, zmenšuje smáčecí úhel a zlepšuje teplotní spolehlivost spoje. Další vhodná aditiva pro lepší smáčení jsou indium při hmotnostním podílu do 4 % a antimon při hmotnostním podílu do 2 %. [6]

Na rozdíl od teploty tavení, kterou přítomnost nanočástic neovlivnila, je jejich vliv na smáčecí proces mnohem zásadnější. Přítomnost 1 % Y_2O_3 zlepšuje smáčení o 20 % oproti čisté Sn-58Bi, ale dalším zvyšováním koncentrace se smáčivost již zhoršuje. Toto platí pro příměsi nanočástic obecně, protože s jejich rostoucí koncentrací v pájce zvyšují její viskozitu a tím zhoršují schopnost pájky se správně roztékat, což jednak sníží plochu, na kterou je pájka schopna se roztéct, a zároveň zvýší smáčecí úhel. Stejně jako v případě Y_2O_3 , tak i příměs částic SnO_2 zlepšuje smáčení, pokud je příměs ve správném množství. Smáčení lze také zlepšit přidáním už 0,03 % uhlíkových nano trubic, pokud však koncentrace překročí 2 %, dojde k zásadnímu nárůstu poruch pájených spojů. Stejný vliv má přidání částic vzácných zemin (RE), jako je lanthan a cer. Nanočástice titanu mají přesně opačný efekt a smáčení zásadně zhoršují již při minimální koncentraci. [6]

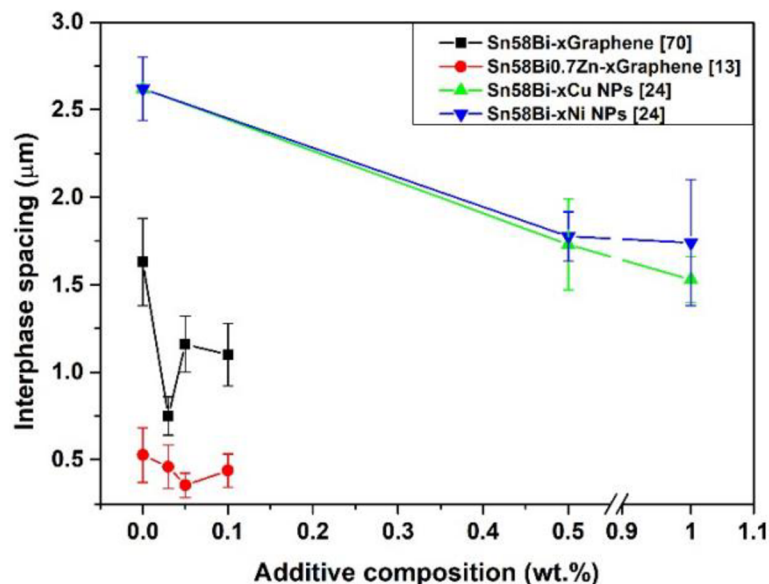


Obrázek 3.1 Smáčecí vlastnosti Sn-58Bi slitin s příměsí nanočástic. [6]

3.3 Vliv na vnitřní strukturu

Vnitřní struktura Sn-58Bi je tvořena lamelami na cín bohaté vodivé fáze a na bismut bohaté křehké fáze, jak již byl znázorněno na obrázku 2.2. Na tuto vnitřní strukturu mají samozřejmě vliv aditiva přidávaná do Sn-58Bi. Přidáním india, které se v tomto případě váže na okraje fáze bohaté na bismut a zvětšuje tak podíl fáze bohaté na cín, se zlepšuje vodivost pájky. Přidání stříbra způsobí tvorbu intermetalické sloučeniny Ag_3Sn , která má negativní dopad na vodivost. Další možností je přidání titanu, čímž se vytvoří částičky Ti_6Sn_5 , které se rovnoměrně rozprostřou v objemu pájky. Stejně jako titan působí také měď. Lze tedy tvrdit, že přidání 0,5 % stříbra, antimonu, india, nebo niklu a 1 % titanu, nebo mědi zjemňuje vnitřní strukturu pájky.

Vnitřní strukturou dokážou také zjemnit příměsi nanočástic kovů (měď a nikl), nanokeramika (Al_2O_3 a SiC), nebo nanočástice intermetalických sloučenin (Cu_6Sn_5). Tyto částice působí jako jádra, kde začíná tuhnutí pájky, a tuhnutí tak začíná na více místech, než by tomu bylo bez přítomnosti nanočástic. Zrna jednotlivých fází jsou tak menší a uniformní a přechody mezi fázemi jsou tenčí, což vede k jemnější struktuře než v případě čisté Sn-58Bi. Závislost vzdálenosti mezi fázemi na koncentraci nanočástic můžeme vidět na obrázku 3.2. [6]

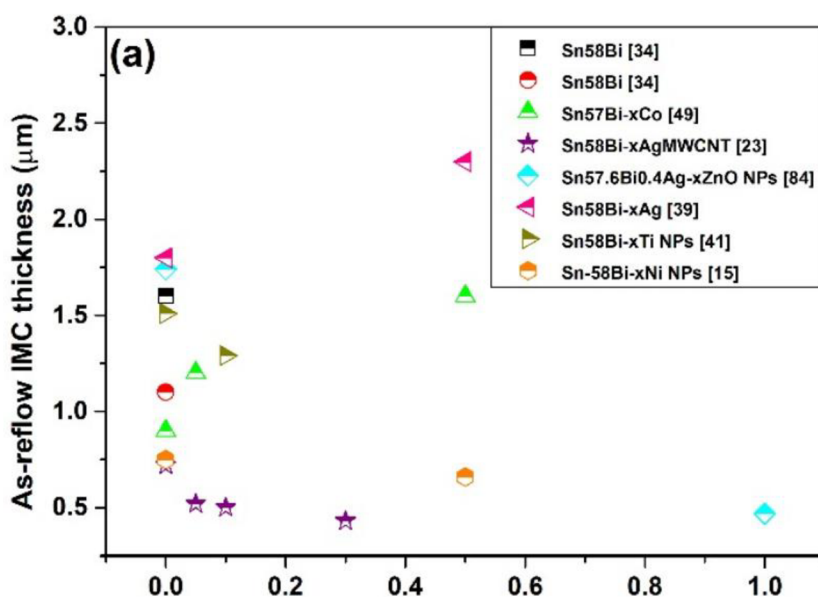


Obrázek 3.2 Závislost vzdálenosti mezi fázemi na koncentraci nanočástic. [6]

Aditiva samozřejmě ovlivňují také vlastnosti intermetalické vrstvy, a to jak při jejím samotném vzniku, tak při jejím stárnutí. Obecně platí, že největší vliv mají aditiva, která jsou sama schopna vytvářet intermetalické sloučeniny s materiálem na povrchu pájecí plošky, tedy mědi nebo niklem. Přidáním již 0,5 hmotnostních % india do slitiny je možné zásadně omezit růst intermetalické vrstvy a vrstvy fáze bohaté na bismut nad intermetalickou vrstvou, a to jak při vzniku, tak při stárnutí. Je to způsobeno tím, že indium dokáže nahradit cín při intermetalické reakci za vzniku Cu_6In_5 , místo Cu_6Sn_5 , intermetalická vrstva je tak tenčí a na jejím přechodu do objemu pájky je dostatek cínu, nevniká tam tedy oblast takřka čistého bismutu. [6]

Obdobný efekt má přidání niklu do slitiny, ten v intermetalické reakci dokáže nahradit měď za vzniku Ni_6Sn_5 , místo Cu_6Sn_5 . Přidání niklu sice nemá větší vliv na tloušťku vrstvy při jejím formování, ale dokáže zpomalit její růst při stárnutí až o 18 %. Přidání stříbra má také pozitivní účinek, stříbro se při pájení koncentruje na povrchu měděné pájecí plošky, čímž omezuje přístup pájky k mědi a opět je omezen růst intermetalické vrstvy a vrstvy bismutu při stárnutí. Tloušťka intermetalické vrstvy se může s kovovými aditivami řádově pohybovat okolo 4 μm . [6]

Tloušťku intermetalické vrstvy samozřejmě ovlivní také příměs nanočástic, jejich vliv je zobrazen na obrázku 3.3, kde můžeme vidět závislost tloušťky intermetalické vrstvy na koncentraci aditiva. Jednotlivé slitiny jsou označeny barevně a v jejich složení je proměnná koncentrace aditiva označena písmenem x. Aditiva označená NPs jsou nanočástice, MWCNT jsou uhlíkové nanotrubičky a ty bez označení jsou pouze příměsí kovů. [6]

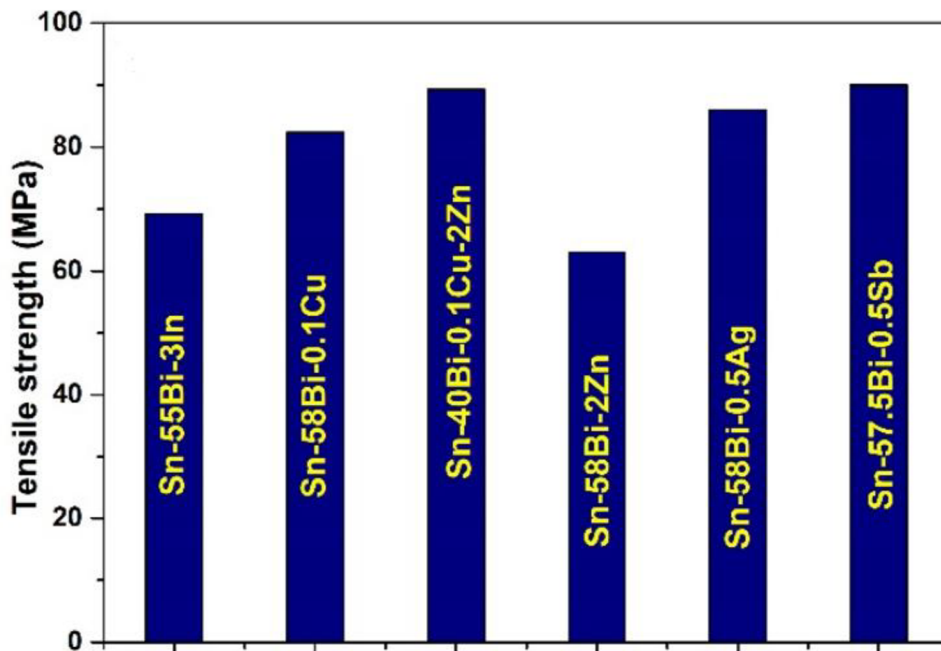


Obrázek 3.3 Vliv aditiv na tloušťku intermetalické vrstvy po přetavení. [6]

3.4 Vliv na mechanické vlastnosti

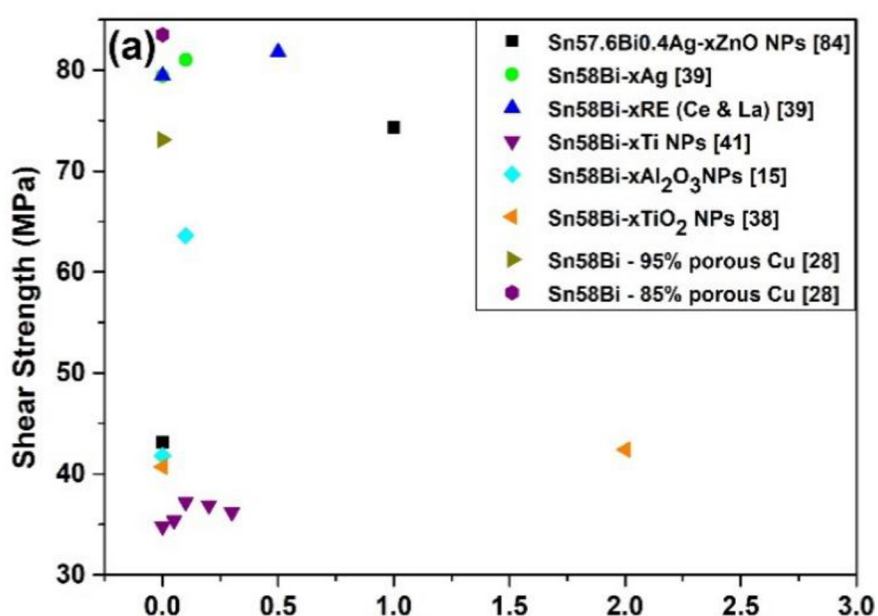
Jako měřítko pevnosti slitiny se používá mez pevnosti v tahu a ve stříhu (smyku). Pevnost v tahu udává, jakou silou, respektive tlakem, je třeba materiál táhnout, aby prasknul. Pevnost ve stříhu udává silu (tlak), jakou je potřeba tlačit proti sobě v opačném směru, aby materiál prasknul. Dalším parametrem je prodloužení, které udává, o kolik % původní délky se materiál dokáže zdeformovat předtím, než praskne. Právě prodloužení je klíčový parametr pro hodnocení odolnosti proti mechanickému šoku, což je největší slabina BiSn slitin. Mechanické vlastnosti jsou porovnávány se slitinou Sn-37Pb, s pevností v tahu 35 MPa a prodloužením mírně přesahujícím 40 %. Eutektické složení Sn-58Bi vykazuje pevnost v tahu okolo 60 MPa a prodloužení nižší než 40 %. [6]

Příměsi stříbra, mědi a zinku mechanické vlastnosti ovlivňují především zvýšením pevnosti v tahu, oproti tomu zásadní vliv jak na pevnost v tahu, tak na prodloužení vykazují příměsi india a niklu s přesně opačnými efekty. Příměs niklu způsobí vznik intermetalických sloučenin Ni_3Sn_4 v objemu pájky, způsobí tak nárůst meze pevnosti v tahu a sníží prodloužení na pouhých 15 % při koncentraci 0,5 % niklu. Indium působí opačně, po přidání 0,5 % india do Sn-58Bi se sníží mez pevnosti na 45 MPa a prodloužení se zvýší na až 65 %, tato slitina je tedy velmi kujná. Při vyšší koncentraci india se však mechanické vlastnosti opět zhoršují. Na obrázku 3.4 můžeme vidět hodnoty pevnosti v tahu vybraných slitin. [6]



Obrázek 3.4 Pevnost v tahu slitin Sn-58Bi s kovovými aditivami. [6]

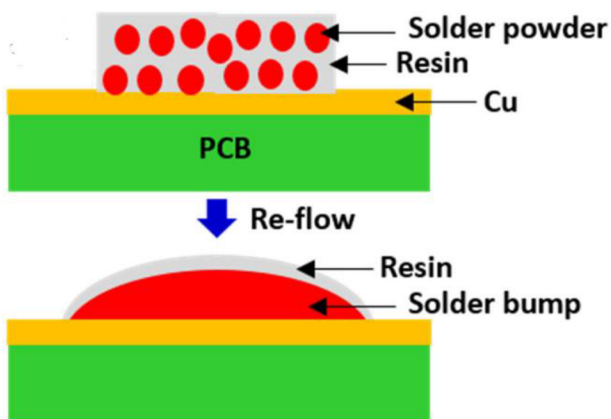
Přidání nanočástic do slitiny Sn-58Bi má pozitivní vliv na pevnost ve stříhu. Nanočástice stříbra mění vlastnosti pájky v závislosti na jejich velikosti, jako optimální se ukazují částice velikosti 76 nm, které zvyšují pevnost ve stříhu o 18,9 % oproti Sn-58Bi bez aditiv. Dalším možným aditivem jsou poniklované uhlíkové nanotrubičky, které zlepšují mechanické vlastnosti, pokud se jejich koncentrace pohybuje v okolí 0,05 %. Další zvyšování koncentrace má za následek zhoršení mechanických vlastností. Na obrázku 3.5 můžeme pozorovat vliv nano aditiv na mechanické vlastnosti pájky. Aditiva označena jako NPs jsou nanočástice, aditiva označena jako RE jsou vzácné zeminy (rare earths) jako je lanthan a cer. [6]



Obrázek 3.5 Pevnost ve stříhu pájecích slitin BiSn a nanoaditiv. [6]

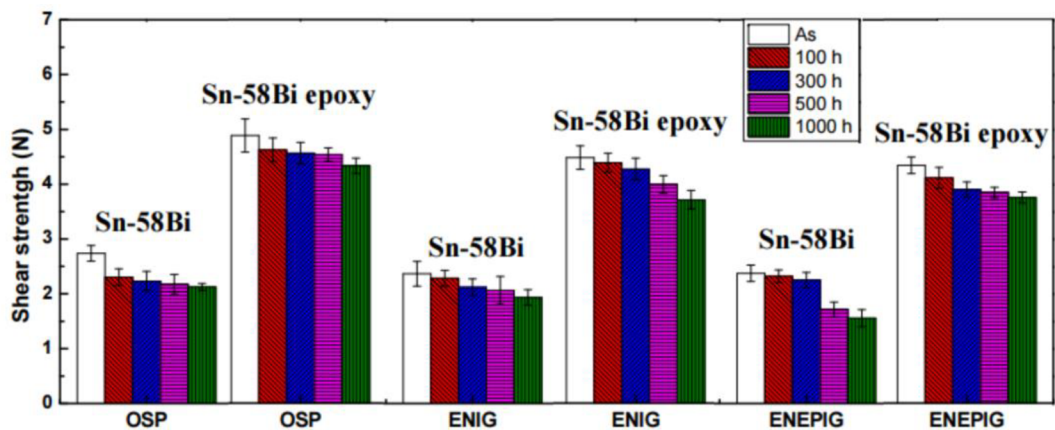
3.5 Pájecí pasty s epoxidovými pryskyřicemi

Další možností, jak zlepšit problematické vlastnosti BiSn pájek, tedy tvrdost a křehkost, je použití těchto past. Výsledný spoj tak má lepší mechanické vlastnosti, lepší odolnost proti nárazu a lépe snáší teplotní cyklování. Do pájecí pasty je přidává epoxidové pryskyřice, které se během přetavení dostávají na povrch pájeného spoje, kde vlivem teploty dochází k jejich vytvrzení a následně poskytují pájenému spoji dodatečnou podporu. Tento děj můžeme vidět na obrázku 3.6. Zlepšení pevnosti ve stříhu pro pájené spoje na různých povrchových úpravách můžeme vidět na obrázku 3.7. Použití těchto past je možné pouze v kombinaci s nízkoteplotní slitinou jako například Sn-58Bi, která se přetavuje při dostatečně nízkých teplotách tak, aby nedošlo k degradaci epoxidu.



Obrázek 3.6 Přetavení pájecí pasty s příměsí epoxidu. [6]

Tato technologie má však mnohá úskalí, prvním problémem je, že takto zhotovené spoje nelze jednoduše opravovat, protože epoxidovou vrstvu nelze jednoduše odpájet. Dalším problémem je, že přidáním epoxidu se na desku plošných spojů dostává další materiál, který může mít jinou teplotní roztažnost než deska, součástky, či pájené spoje. Může tak vznikat další tepelné pnutí na sestavě.



Obrázek 3.7 Vliv epoxidové vrstvy na pevnost pájených spojů ve stříhu, na různých povrchových úpravách a době stárnutí. [6]

4. MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ

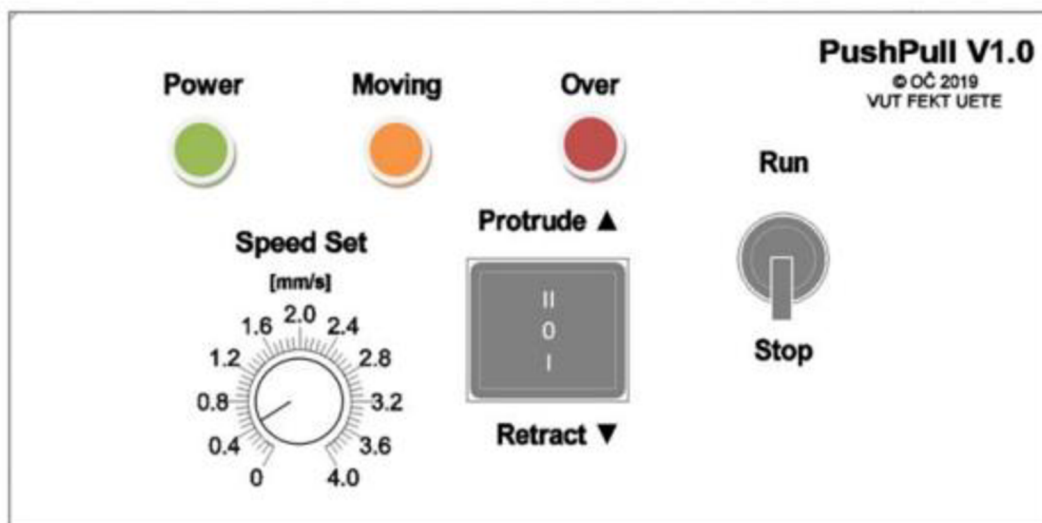
4.1 Měřicí pracoviště PushPull V1.0

Toto pracoviště, určené k měření pevnosti pájených spojů, je vyrobeno ze stojanu na vrtačku Wolfcraft 5027000 zajišťujícího horizontální posuv. Tento posuv zajišťuje lineární attenuátor ovládaný řídicí jednotkou PushPull V1.0 navrhnou Ing. Ondřejem Čechákem. Tato jednotka umožňuje ovládat rychlost posuvu (od 0,4 mm/s do 4 mm/s) a také směr posuvu. Pokud dojde k přetížení attenuátoru, řídicí jednotka se sama vypne. [7]

Na stojanu je připevněn trhací mechanismus, jenž je vybaven digitálním siloměrem MARK-10 M5-100, ten je připojen do počítače skrz rozhraní USB. Výsledky měření zaznamenává program MESURgauge stejného výrobce jako siloměr. Pracoviště je také vybaveno mechanismem pro uchycení DPS. K určení správné polohy DPS slouží kamera umístěna na trhacím mechanismu, která opět komunikuje s počítačem a programem MicroCapture. Pracoviště je schopno měřit jak pevnost v tahu (pro THT součástky), tak pevnost ve stříhu (pro SMT součástky). V této práci bylo pracoviště použito výhradně pro měření pevnosti ve stříhu. [7]



Obrázek 4.1 Pracoviště pro měření pevnosti pájených spojů [7]



Obrázek 4.2. Řídící jednotka PushPull V1.0 [7]

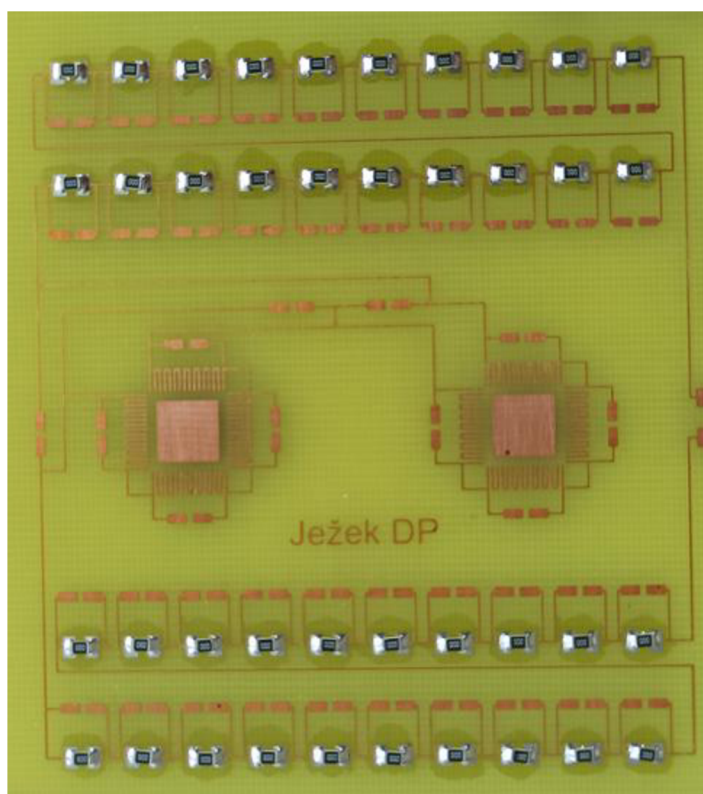
4.2 Nastavení měření pevnosti stříhem

Desky byly do mechanismu upevněny tak, aby byl trhací hrot kolmo k trhané součástce, a aby byl co možná nejbliže k povrchu DPS, ale nebyl s ním v kontaktu (ideálně 0,1 mm). Tato vzdálenost byla určována právě pomocí kamery. Rychlost posuvu byla nastavena na 0,4 mm/s, tedy nejpomalejší možný chod. Další nastavení probíhalo v měřicím softwaru MESURgauge, kde byl nastaven práh pro začátek měření na 5 N, proto začínají všechny grafy pevnosti spoje právě na 5 N. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 50 měření za sekundu, což je nejvyšší rychlost, s jakou dokáže zařízení měřit. Naměřená data byla následně exportována do formátu .xlsx.

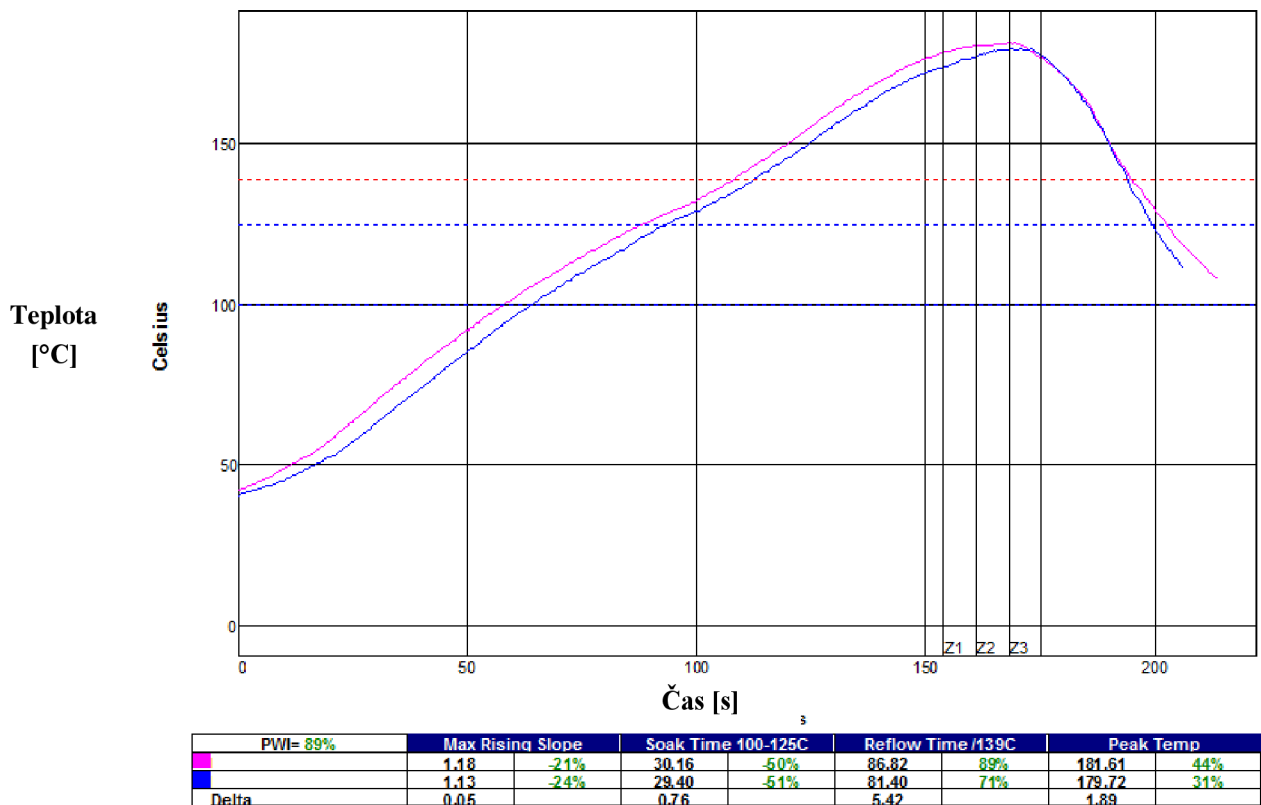
4.3 Testované vzorky

Postupem panel plating byly vyrobeny testovací DPS, při jejichž výrobě nebyla použita žádná povrchová úprava ani nebyla nenesena nepájivá maska. Přes šablonu se následně na pájecí plošky, určené pro osazení SMT součástek velikost 0805, natiskla pájecí pasta PF 602-P30. Jedná se o pastu s eutektickou slitinou Sn-58Bi, v pastě je použito tavidlo typu ROL0, tedy tavidlo na bázi přírodní pryskyřice (kalafuny) pouze s minimální aktivací bez halogenidů. [8]

Na každou desku se následně manuálně osadilo 40 keramických rezistorů (0805) s odporem 0Ω . Desky byly zapájeny ve dvouzónové přetavovací peci se spodním ohřevem. Pec využívá k ohřevu infračervené záření a přirozenou konvekci. Teplota spodního ohřevu byla nastavena na $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$, horní zóna předehřevu na $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a horní zóna přetavení na $280 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Rychlost pásu byla nastavena na 20. Přístrojem KIC 2000 byl změřen teplotní profil, který můžeme vidět na obrázku 4.4. Profil byl měřen na desce identické s deskami použitými na testování, tuto desku můžeme vidět na obrázku 4.3. Termočláanky byly umístěny na krajních na opačných krajích na horní a spodní řadě tak, aby bylo jasně možné pozorovat vliv tepelné kapacity desky. Proto je růžová křivka teplejší, jedná se termočlánek na přední straně desky, který tak do pece vstupoval dříve než termočlánek označen modře.



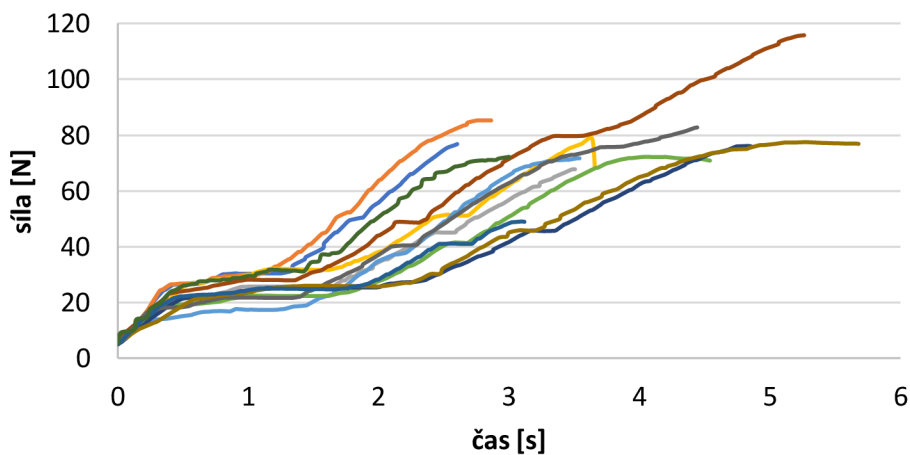
Obrázek 4.3 Testovací DPS.



Obrázek 4.4 Teplotní profil pájení přetavením.

4.4 Nepřesnosti měření

Měření tímto postupem však vykazuje výrazný rozptyl hodnot, které měření činí takřka neprůkazným. Rozptyl naměřených průběhů můžeme pozorovat na obrázku 4.5, jednotlivé průběhy se od sebe liší řádově až o 50 N a z takového měření tedy nelze vyvozovat žádné závěry.



Obrázek 4.5 Kontrolní měření pro zlepšení přesnosti.

Po podrobné inspekci zařízená byly nalezeny tři nejpravděpodobnější příčiny těchto nepřesností. Nedostatečně pevné uchycení desky v držáku zařízení, nedostatečně pevné uchycení držáku trhací hlavy a velmi obtížně a nekonzistentní nastavování vzdálenosti trhací hlavy od povrchu desky.

4.5 Konstrukční úpravy zařízení

Deska je v zařízení umístěna do drážek v hliníkových profilech, které jsou následně fixovány na podložku pomocí šroubů. Původně byly použity imbusové šrouby o průměru 6 mm, což znamenalo, že pro upevnění desky byl potřeba nástroj. Tyto šrouby byly vyměněny za šrouby s křídlovou hlavou, což umožnilo pevné uchycení desky bez použití nástroje. O další fixaci desky se starají další šrouby, které desku napínají právě v místě, kde dochází k odtrhu součástky. Deska je tedy napínána pouze ve třech bodech, což by potenciálně mohlo způsobit pnutí a ovlivnit výsledky měření. Mezi testovanou desku a napínací šrouby byl umístěn kovový plát, který zajistí rovnoměrné rozložení napínací síly po celé své ploše. Stále je tak možné testovat pouze desky s jednostrannou montáží.

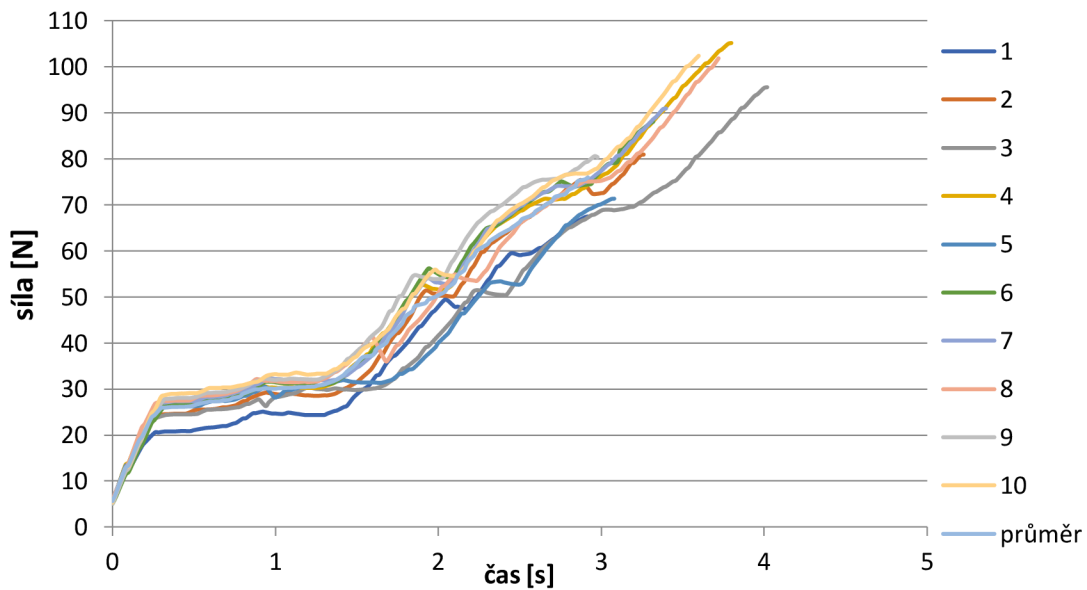
Dále došlo k výměně držáku trhací hlavy, ten byl původně tvořen hliníkovým profilem, který byl na jedné straně přišroubován k siloměru, na jeho druhé straně byla umístěna trhací hlava. Upevnění do siloměru bylo realizováno závitem nedostatečné délky, což mělo za následek viklání držáku, který se ve své spodní části mohl pohybovat až o 2 cm na stranu. Tento držák byl nahrazen originálním držákem dodávaným k siloměru. Držák je tedy nyní tvořen nerezovou tyčí na koncích opatřenou závitů pro uchycení. Tato výměna vyřešila problémy s nežádoucími pohyby trhací hlavy. Výměna držáků o rozdílných délkách také znamenala, že se změnil rozsah měření. Bylo potřeba změnit umístění siloměru na zařízení, který je nyní upevněn o 15 cm níže. V důsledku toho je nyní možné odtrhávat součástky v cele délce držáku uchycení desky.



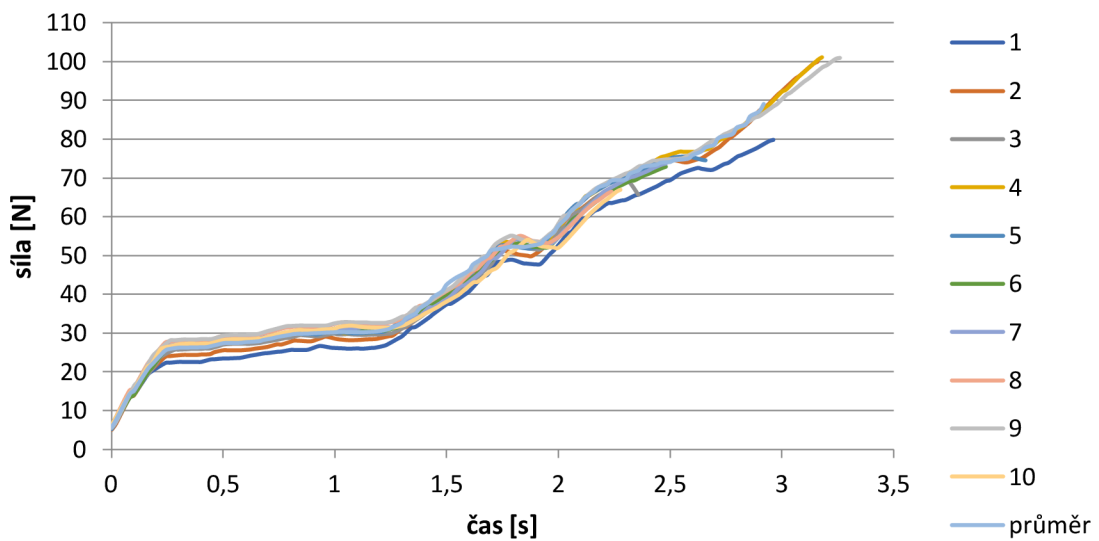
Obrázek 4.6 Pracoviště pro měření pevnosti pájených spojů, před úpravami bez kamery (vlevo) a po úpravách (vpravo).

Nastavení vzdálenosti trhací hlavy od povrchu desky lze provést dvěma způsoby, zaprvé posunem celého držáku desky, který je upevněn dvěma imbusovými šrouby, nebo zadruhé větším napnutím měřené desky. Pro co možná nejpřesnější nastavení této vzdálenosti byla použita kamera. Vzhledem k tomu, že přesnou polohu je potřeba nastavovat pro každou součástku individuálně a obě metody jsou buďto velmi nepřesné, nebo způsobí další napínání desky, dochází opět ke zvětšování rozptylu. Bylo proto experimentováno, jakou sílu naměří zařízení, pokud dojde ke kontaktu trhací hlavy s povrchem desky z materiálu FR4. Opakované pozorování naměřených sil při různé úrovni napínání desky ukázalo, že tření mezi trhací hlavou a deskou je velmi malé a řádově nepřesahuje 3 N (měření síly při odtrhu součástky začíná až při 5 N).

Následně byly odtrženy dvě řady rezistorů, u první řady byla nastavena vzdálenost trhací hlavy a desky co nejpřesněji na 0,1mm, v druhém případě byla trhací hlava v trvalém kontaktu s povrchem desky. Z obrázku 4.7 a 4.8 je patrné, že individuální nastavování trhací hlavy zanáší do měření další rozptyl. Všechna další měřená tedy byla provedena s trhací hlavou v přímém kontaktu s deskou. Z tohoto důvodu není na zařízení umístěna kamera, které již není potřebná.



Obrázek 4.7 Kontrolní měření se vzdáleností hlavy 0,1mm



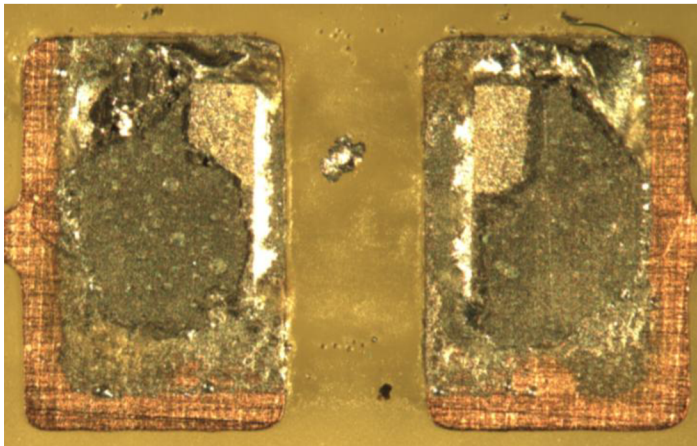
Obrázek 4.8 Kontrolní měření s hlavou v kontaktu s deskou

5. MECHANIZMY ODTRŽENÍ SOUČÁSTEK

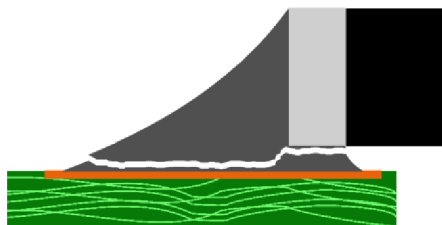
Kromě absolutní hodnoty síly potřebné k přetržení pájeného spoje a průběhu této síly v čase vynesené do grafu byly pájecí slitiny porovnávány také podle toho, jakým způsobem došlo k přetržení spoje. U každé utržené součástky (až na výjimky, které se během trhání zcela zničily) bylo zdokumentováno, jakým způsobem byla utržena. Ve všech případech lze mechanismus odtržení rozdělit do tří skupin.

5.1 Odtrh od intermetalické vrstvy na pájecí ploše

V těchto případech vedla vzniklá prasklina podél intermetalické vrstvy na pájecí ploše, místy zůstala v prasklině i část intermetalické vrstvy z terminálu keramického rezistoru. Síla těchto odtrhů se pohybovala řádově okolo 100 N. Takovýto odtrh můžeme pozorovat na obrázku 5.1, je na něm jasně viditelná tmavě šedá část, kde došlo k prasknutí na intermetalické vrstvě pájecí plošky, a lesklejší část, kde došlo k odtržení od niklového terminálu rezistoru. V horní části plošek můžeme vidět zbytky povrchu pájeného spoje.



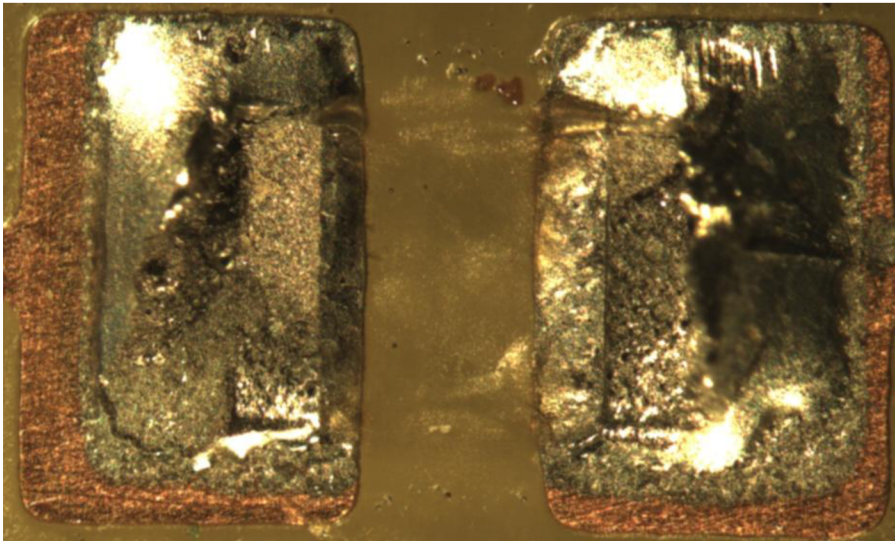
Obrázek 5.1 Odtrh od intermetalické vrstvy



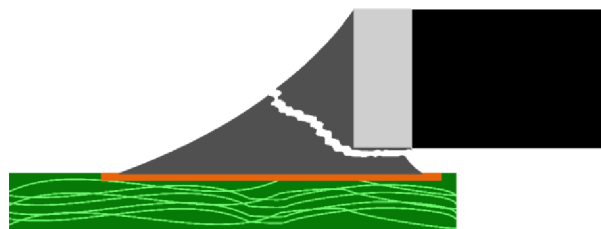
Obrázek 5.2 Ilustrace odtrhu od intermetalické vrstvy

5.2 Odtrh v objemu pájeného spoje

V těchto případech vedla vzniklá prasklina podél intermetalické vrstvy na terminálu součástky a dále pokračovala skrz objem pájeného spoje. V případech, kdy byly takto utrženy obě strany rezistoru, se síla potřebná k přetržení pohybovala řádově okolo 75 N. K prasknutí pájky v objemu spoje docházelo mnohem méně často. Vzhledem k tomu, že se tento způsob odtrhu vyskytoval u pájek Sn-58Bi s nejmenší frekvencí a k přetržení docházelo při nižších silách stříhu, lze předpokládat, že k přetržení došlo kvůli nějakému skrytému defektu uvnitř spoje, například výskytu voidů. Na obrázku 5.3 můžeme opět pozorovat lesklou část praskliny, tedy intermetalickou složku z niklového terminálu součástky, a dále také zbytek praskliny v objemu pájky. Na pájecích ploškách zůstalo značné množství pájky.



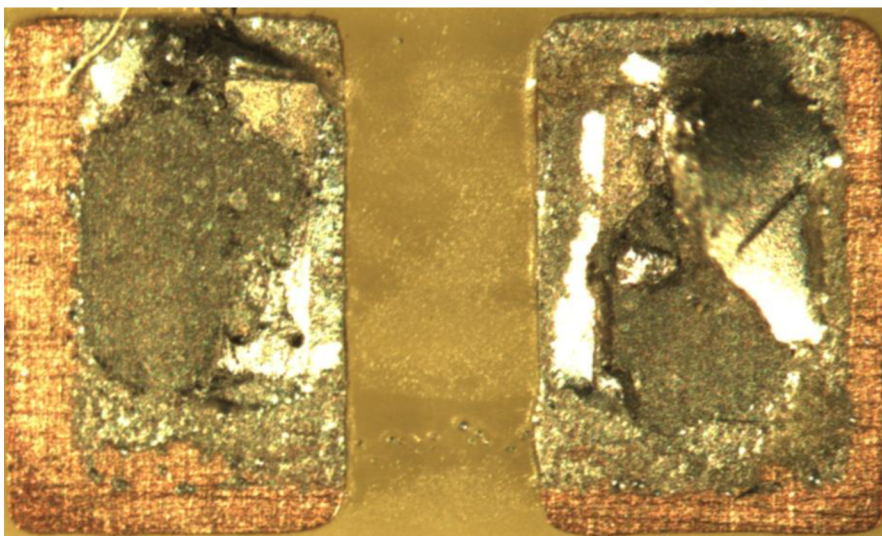
Obrázek 5.3 Odtrh v objemu pájeného spoje



Obrázek 5.4 Ilustrace odtrhu v objemu pájeného spoje

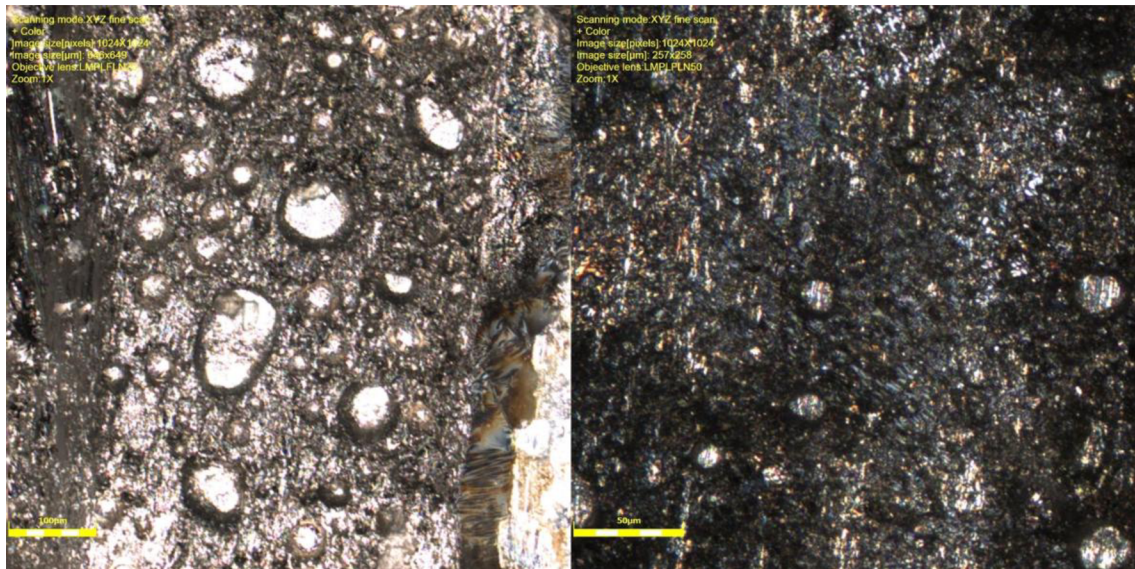
5.3 Kombinovaný odtrh

V těchto případech došlo k tomu, že se na jedné straně součástky utrhla intermetalická vrstva a na druhé došlo ke vzniku praskliny v objemu pájky, jak je vidět na obrázku 5.5. Síla potřebná k takovému odtrhu se řádově pohybovala okolo 85 N, tedy výše než u prasknutí v objemu spoje. Zbytek pájky vždy zůstal v horní části pájecí plošky (součástky byly trhány ze shora dolů). V případě obrázku 5.5 tedy s největší pravděpodobností došlo k tomu, že došlo k prasknutí v intermetalické vrstvě na levé pájecí plošce. Následně, když už součástku na levé straně nic nedrželo, vznikla kroutivá síla, které způsobila prasknutí v objemu spoje na straně pravé.



Obrázek 5.5 Kombinovaný odtrh

Struktura praskliny byla pozorována na laserovém skenovacím mikroskopu. Typické praskliny můžeme pozorovat na obrázku 5.6, kde se na levé straně nachází fotka odtrhu od intermetalické vrstvy terminálu součástky. Vyznačuje se svou lesklostí, která je způsobena přítomností niklu, a také velkým množstvím voidů velkých až 90 μm . Přítomnost velkého množství voidů byla typická pro tuto intermetalickou vrstvu, což je pravděpodobně důvodem, proč velice často docházelo k prasknutí spoje právě podél ní. Na pravé straně je vyobrazen odtrh od intermetalické vrstvy na pájecí plošce. Na těchto vrstvách se vyskytovalo mnohem menší množství voidů velikosti do 20 μm . K odtrhu od této intermetalické vrstvy dochází v důsledku její křehkosti a procesu vylučování bismutu na jejím povrchu, tento proces je popsán v teoretické části práce.



Obrázek 5.6 Odtrh od intermetalické vrstvy na terminálu rezistoru (vlevo) a od pájecí plošky (vpravo) vyfocen laserovým skenovacím mikroskopem.

6. VLIV IZOTERMICKÉHO STÁRNUTÍ

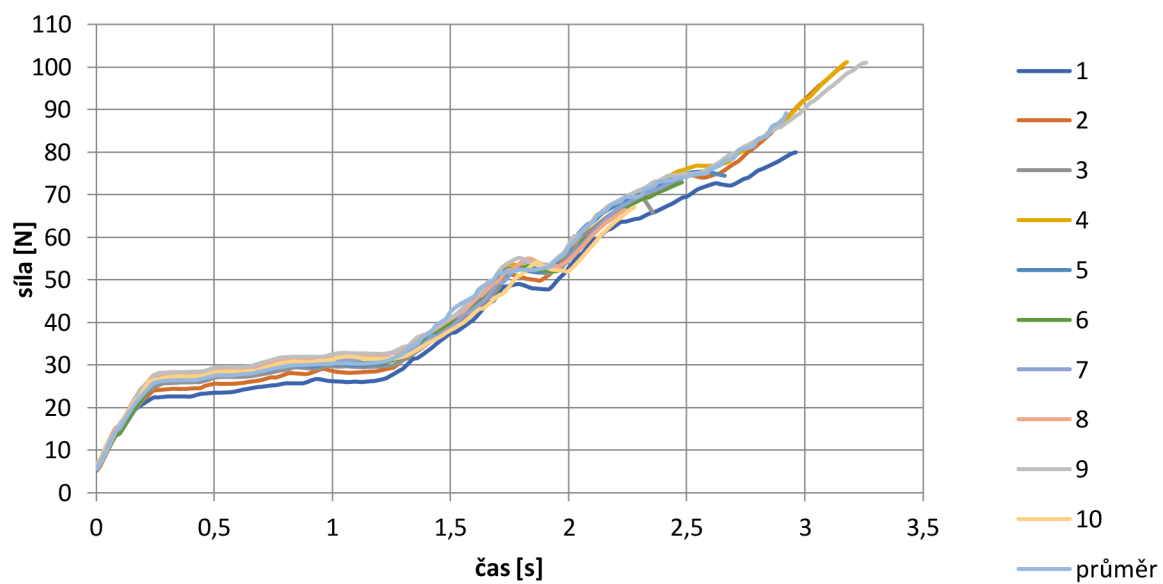
6.1 Metodika izotermického stárnutí

Pro testování vlivu izotermického stárnutí na vlastnosti pájených spojů z pájecí pasty (PF 602-P30) byl zopakován experiment, který již proběhl v rámci semestrálního projektu, tedy předtím, než došlo k úpravám na měřicím zařízení, a jeho výsledky je tedy na místě ověřit. Postupem popsáním výše v kapitole „Testované vzorky“ byla vyrobena deska plošných spojů. Následně byla odtrhnuta jedna řada rezistorů (10 kusů), byly zaznamenány časové průběhy síly a rezistory byly uchovány pozdější analýzu mechanismu odtrhu pod mikroskopem a focením. Následně byla deska umístěna do sterilizátoru Chirana, kde stárнула 24 hodin při teplotě 90 °C. Opět byla odtržena jedna řada rezistorů a rezistory byly uchovány. Dále byla deska umístěna do mrazicího zařízení Elcold 130L, kde stárнула 7 dní při teplotě -40 °C.

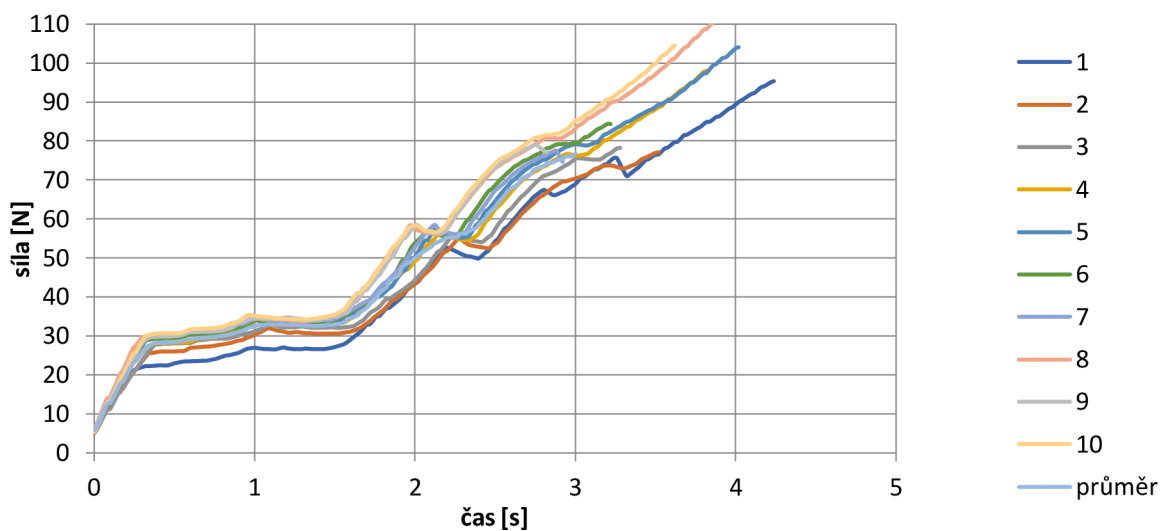
Z naměřených dat byly vytvořeny časové průběhy v grafech a do tabulky 5 byly zapsány hodnoty síly při prasknutí. V této tabulce jsou barevně odlišeny jednotlivé mechanismy odtrhu, které se uplatnily u jednotlivých součástek. U součástek označených červeně oba spoje praskly v objemu, u oranžově označených součástek došlo ke kombinovanému odtrhu a u žlutých oba spoje praskly v intermetalické vrstvě. Časové průběhy síly při trhání můžeme pozorovat na obrázcích 6.1, 6.2 a 6.3.

Tabulka 6.1 Mez pevnosti ve stříhu desky při izotermickém stárnutí

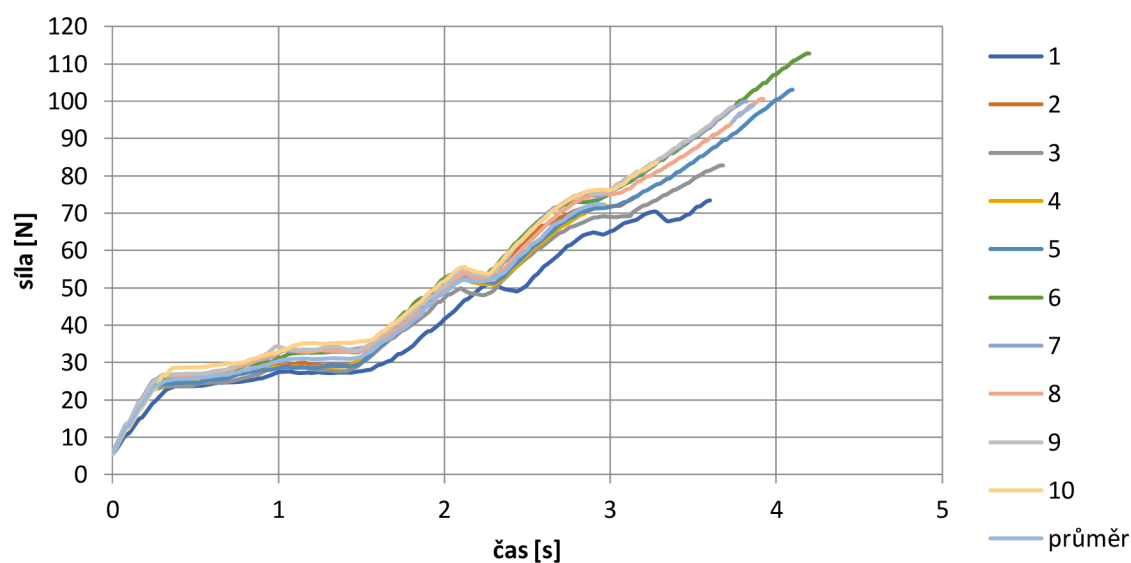
xxx	Mez pevnosti ve stříhu [N]										xxx
číslo rezistoru na desce	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr [N]
po zapájení	79,9	100	65,7	74,5	72,9	72,9	73,8	66,4	101	67	77,4
po 24h/90°C	95,4	77,2	78,3	97,9	104,1	84,3	74,6	112,3	77,2	104,6	90,6
po 7d/-40°C	73,4	74,7	82,7	71,5	104,3	112,7	99,9	100,5	98,5	83,5	90,2



Obrázek 6.1 Průběh síly v čase při trhání součástek ihned po zapájení

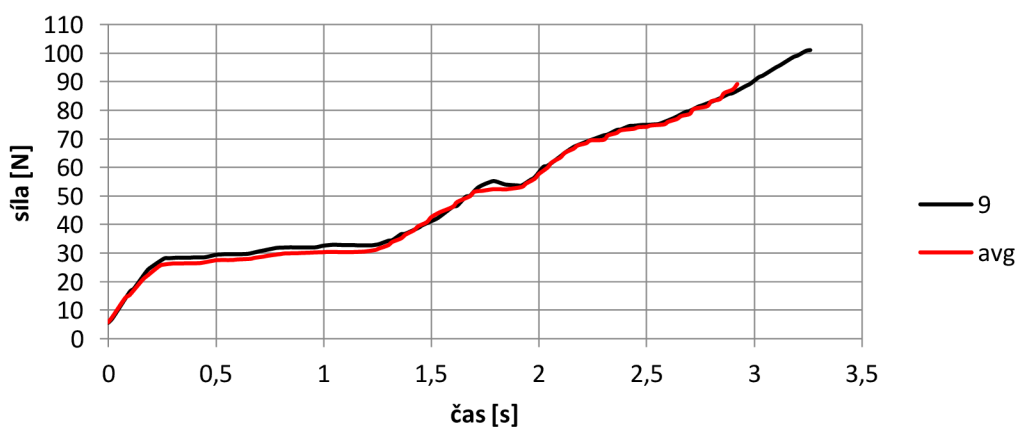


Obrázek 6.2 Průběh síly v čase při trhání součástek po stárnutí při 90°C

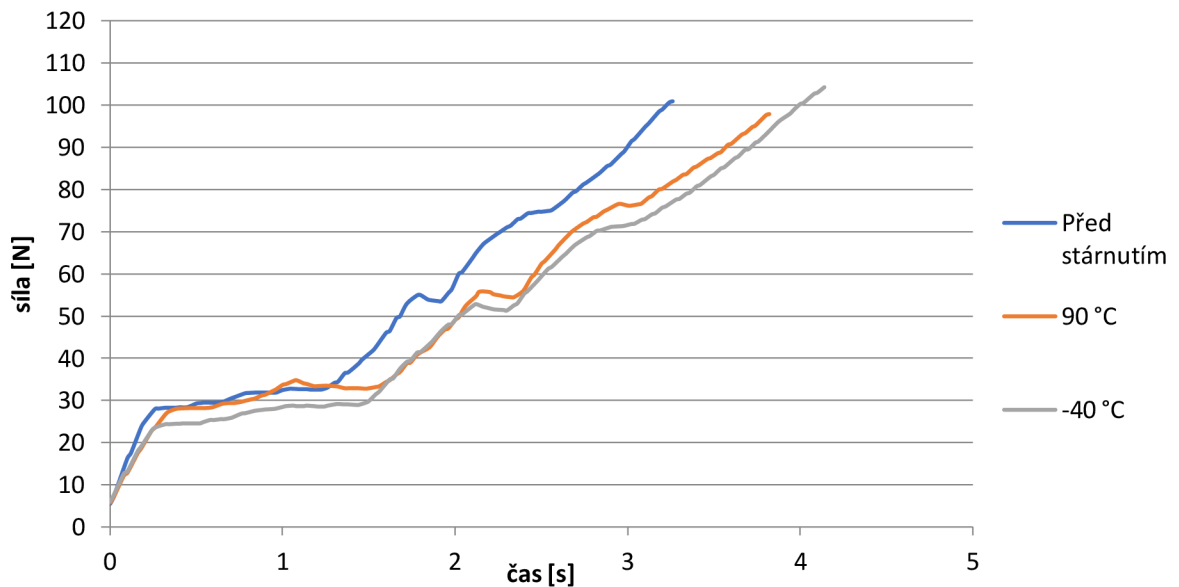


Obrázek 6.3 Průběh síly v čase při trhání součástek po stárnutí při -40°C

Aby bylo možné průběhy z jednotlivých etap srovnat, je třeba vybrat typický průběh. Toho bylo docíleno tak, že se vypočítal aritmetický průměr jednotlivých hodnot času a síly a vzniknul tak průměrný průběh. Vzhledem k tomu, že průběhy nejsou identické, tak v průměrném průběhu došlo k vyhlazení některých důležitých částí křivky. Proto byly s průměrným průběhem postupně porovnávány všechny ostatní průběhy a ten, u kterého byla pozorována nejpřesnější shoda, byl použit jako typický průběh své etapy stárnutí. Ukázka výběru pro čerstvé vzorky je možno vidět na obrázku 6.4, kde byl jako reprezentativní zvolen rezistor číslo 9.



Obrázek 6.4 Výběr typického průběhu z řady průběhů před stárnutím.



Obrázek 6.5 Porovnání typických průběhu při izotermickém stárnutí.

6.2 Zhodnocení výsledků

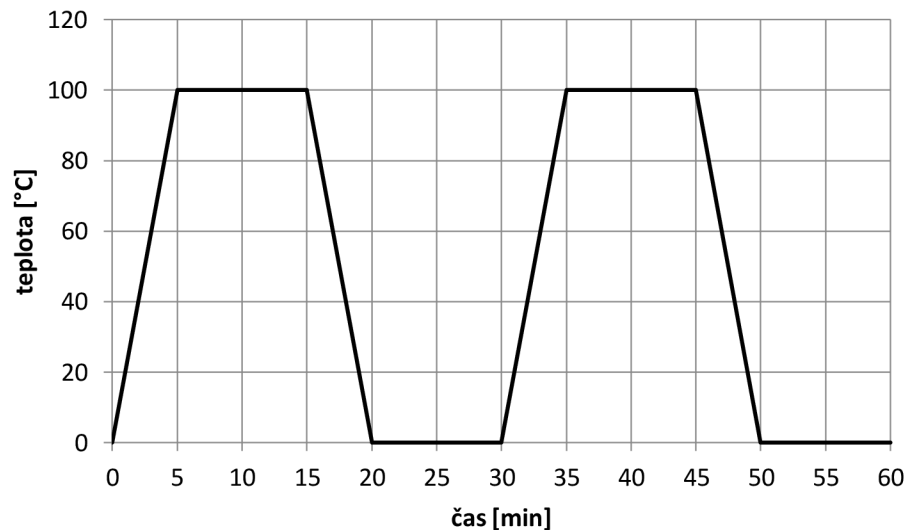
Průměrné hodnoty meze pevnosti ve stříhu v tabulce 6.1 ukazují nárůst po stárnutí při 90°C o 13,2 N, po stárnutí v chladu se tato hodnota již prakticky nezměnila. Po stárnutí v teple také došlo k nárůstu odtrhů od intermetalické vrstvy na plošce a ubylo případů odtrhu v objemu spoje. Tento jev lze vysvětlit růstem intermetalické vrstvy na pájecí plošce, což je této u pájecí slitiny očekávatelné. Stárnutí v chladu ani v tomto případě nemělo znatelný vliv. Pokud porovnáme časové průběhy trhání na obrázku 6.5, vidíme, že po stárnutí v teple došlo k prodloužení oblasti tečení a další stárnutí v mrazu již opět nemělo žádný vliv na časový průběh síly. Hlavním problémem bismutových pájecích slitin je jejich křehkost a tím způsobená malá odolnost proti mechanickým rázům. Prodloužení oblasti tečení a celková menší strmost průběhů ukazuje na to, že došlo ke snížení křehkosti spoje. Dá se tedy tvrdit, že krátkodobé izotermické stárnutí při teplotě 90°C má pozitivní vliv na mechanické vlastnosti pájeného spoje. Stárnutí v mrazu však podle tohoto měření nijak dále nezměnilo vlastnosti spojů.

7. VLIV TEPLOTNÍHO CYKLOVÁNÍ

7.1 Metodika teplotního cyklování

Pro tyto zkoušky byly vyrobeny 4 desky, opět identickým postupem zmíněným výše. Byly srovnávány 2 pájecí pasty, obě se stejnou slitinou Sn-58Bi, tedy eutektickou slitinou cín-bismut. Tyto pasty se liší pouze v tavidle, PF602-P30 obsahuje tavidlo ROL0 a PF602-P obsahuje tavidlo typu ROL1. Desky zapájené PF602-P30 byly označeny jako 2.a a 2.b, desky zapájené PF602-P byly označeny 2.c a 2.d.

Zrychleného stárnutí bylo dosaženo teplotním cyklováním. Použitý teplotní profil cyklování pochází z normy IPC-SM-785, která se zabývá zrychleným stárnutím a zkouškami spolehlivosti, pájených spojů u součástek určených pro povrchovou montáž. Cyklování probíhalo v třicetiminutových cyklech v rozmezí teplot 0 °C až 100 °C. Teplotní extrémy byly vždy drženy po dobu deseti minut a změna teploty byla 20°C za minutu. Ideální průběh cyklování se zobrazuje na obrázku 7.1. Jednotlivé měření proběhlo vždy po 350 cyklech, což je zhruba týdenní odstup. Tento profil cyklování udává norma pro zkoušky spojů do náročnějších aplikací, jako například telekomunikace, automotive, letectví nebo vesmírné aplikace. [9]



Obrázek 7.1 Nastavený teplotní profil cyklování.

7.2 Měření před teplotním cyklováním

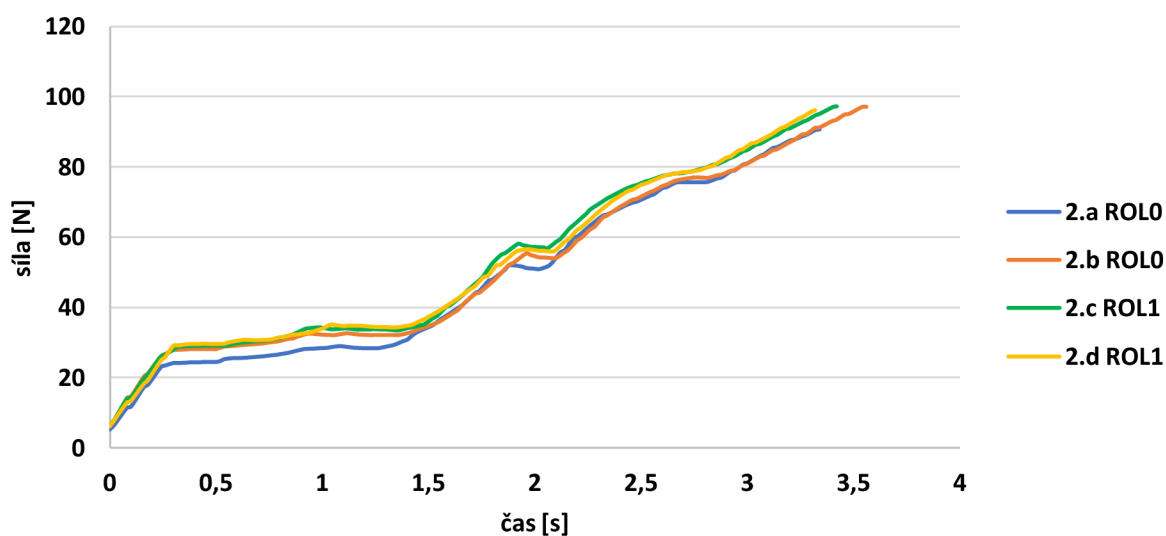
Než byly desky podrobeny teplotnímu cyklování, byla z každé desky odtržena jedna řada deseti rezistorů. Byly zaznamenány průběhy síly v čase, konkrétní hodnoty meze pevnosti a mechanismy odtrhu u všech součástek. Součástky byly označeny a uchovány. Aby bylo možné vlastnosti jednotlivých desek srovnat, byl u každé řady rezistorů vypočítán průměrný průběh, podle kterého byl vybrán průběh jednoho konkrétního rezistoru.

V tabulce 7.1 jsou zaznamenány meze pevnosti jednotlivých součástek. Opět jsou barevně odlišeny rezistory podle uplatněného mechanismu odtrhu. U červeně označených rezistorů došlo k přetržení v objemu spoje, u oranžově označených, které převládají, došlo ke kombinovanému odtrhu a žlutě označené se odtrhly od intermetalické vrstvy na ploše. Průměrné hodnoty se ve všech případech pohybují blízko 90 N.

Tabulka 7.1 Mez pevnosti před teplotním cyklováním.

číslo rezistoru	Mez pevnosti ve stříhu [N]										průměr [N]
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
2.a ROL0	84	100,6	86	90,6	86,3	86,3	92,3	91,5	110,4	90,1	91,8
2.b ROL0	71,8	90,1	97,2	90,1	93,4	93,4	84,9	100,6	114	78,9	91,4
2.c ROL1	72,3	78,8	74,6	97,3	85,1	85,1	103,8	72,5	84,3	113,7	86,8
2.d ROL1	71,9	74,7	72,3	95,4	94,7	94,7	106,4	72,3	88,1	111,1	88,2

Na obrázku 7.2 jsou vykresleny typické průběhy pro jednotlivé desky, průběhy jsou si velice podobné a žádné se nijak zásadně neliší od ostatních. Stejně tak nebyl mezi deskami pozorován žádný rozdíl ve výskytu různých mechanismů odtrhu. Zatím tedy nebyl pozorován žádný rozdíl mezi mechanickými vlastnostmi pájených spojů obou past.



Obrázek 7.2 Typické průběhy síly v čase při trhání součástek na deskách před teplotním cyklováním.

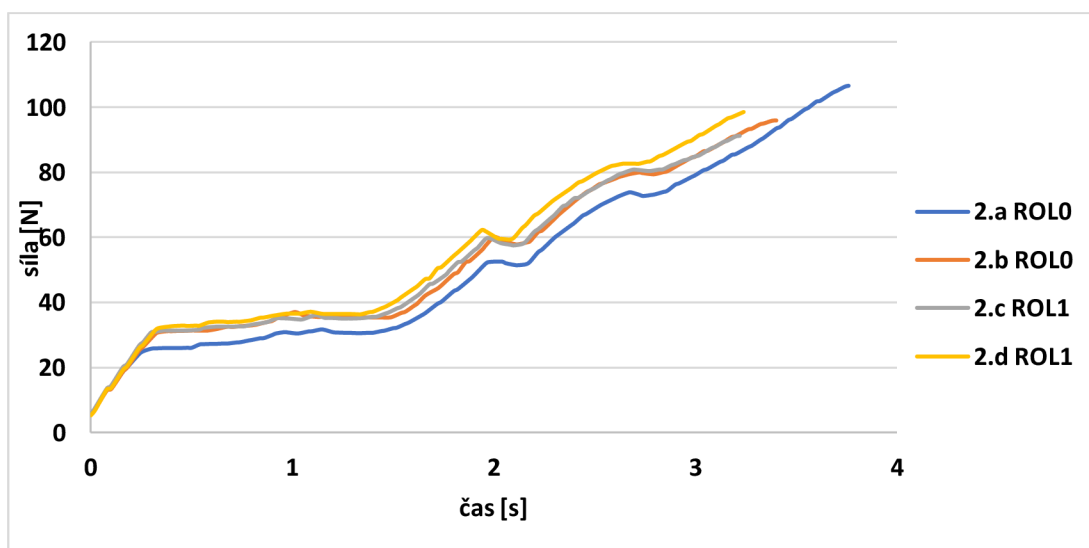
7.3 Měření po 350 cyklech

Z každé desky byla odtržena jedna řada deseti rezistorů. Byly zaznamenány průběhy síly v čase, konkrétní hodnoty meze pevnosti a mechanismy odtrhu u všech součástek. Součástky byly označeny a uchovány. Aby bylo možné vlastnosti jednotlivých desek srovnat, byl u každé řady rezistorů vypočítán průměrný průběh, podle kterého byl vybrán průběh jednoho konkrétního rezistoru.

Tabulka 7.2 Mez pevnosti 350 teplotních cyklech.

číslo rezistoru	Mez pevnosti ve stříhu [N]										průměr [N]
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
2.a ROL0	110,7	88,2	75,5	108,8	78,1	78,1	106,7	73,2	119,6	100,7	94,0
2.b ROL0	85	62,6	95,9	78,5	96,3	96,3	81,4	49,5	57,7	71,9	77,5
2.c ROL1	109,8	91,3	73,7	84,4	95,4	95,4	76,7	115,9	78	80,6	90,1
2.d ROL1	76,2	103,7	81	85,8	77,4	77,4	75,9	103,3	112,3	86,7	88,0

V tabulce 7.2 jsou zaznamenány hodnoty meze pevnosti konkrétních součástek, tyto hodnoty jsou barevně označeny podle mechanismu odtrhu, který nastal stejně jako tomu bylo v tabulkách výše. Dále byly vypočítány průměrné hodnoty meze pevnosti jednotlivých řad. Na obrázku 7.3 jsou vyobrazeny typické průběhy jednotlivých desek a žádný z těchto průběhů se nijak výrazně neodlišuje. Srovnáme-li četnost výskytu jednotlivých mechanismů odtrhu, uvidíme, že na desce 2.a došlo k pěti případům prasknutí v objemu spoje, což je ve srovnání s ostatními vzorky více. Průměrné hodnoty meze pevnost se opět pohybují v okolí 90 N, až na desku 2.b, kde průměr klesnul na 77,5N. Vzhledem k tomu, že se typické průběhy nijak zvlášť neliší, nelze tvrdit, že by byl zásadní rozdíl v chování pájených spojů, a spíše se jedná o statistickou odchylku.



Obrázek 7.3 Typické průběhy síly v čase při trhání součástek na deskách po 350 cyklech.

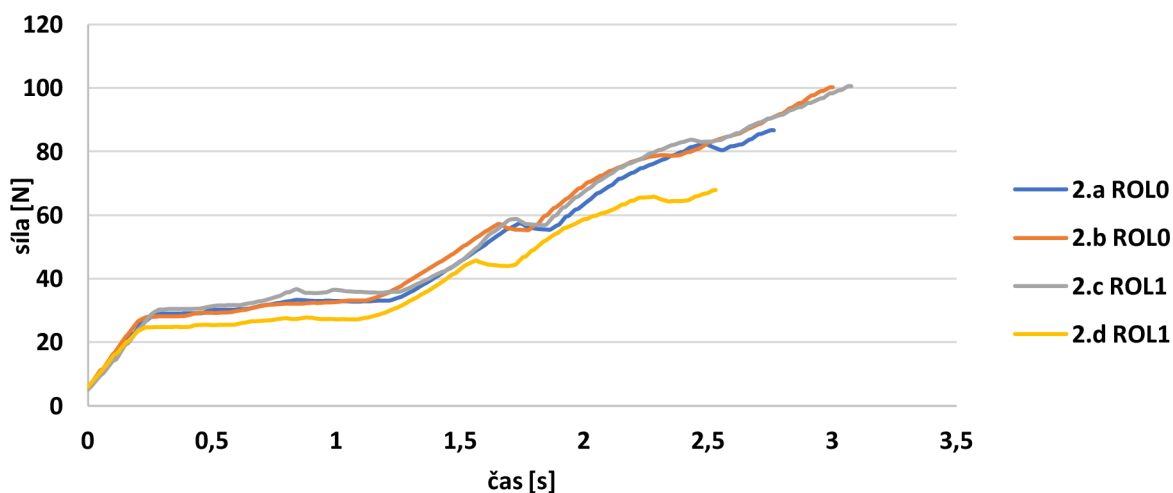
7.4 Měření po 700 cyklech

Z každé desky byla odtržena jedna řada deseti rezistorů. Byly zaznamenány průběhy síly v čase, konkrétní hodnoty meze pevnosti a mechanismy odtrhu u všech součástek. Součástky byly označeny a uchovány. Aby bylo možné vlastnosti jednotlivých desek srovnat, byl u každé řady rezistorů vypočítán průměrný průběh, podle kterého byl vybrán průběh jednoho konkrétního rezistoru.

Tabulka 7.3 Mez pevnosti 700 teplotních cyklech.

číslo rezistoru	Mez pevnosti ve stříhu [N]										průměr [N]
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
2.a ROL0	99,2	88,3	86,6	113,2	82,2	82,2	112	104,3	88,1	105	96,1
2.b ROL0	79,3	100,3	102,2	78,4	81	81	77,4	75	109,9	103,3	88,8
2.c ROL1	89,6	100,5	77,1	93,2	68,6	68,6	115,1	73,9	68,2	86,4	84,1
2.d ROL1	69	67,8	86,4	77,7	70,4	70,4	76,6	0	62,7	73,8	65,5

V tabulce 7.2 jsou zaznamenány hodnoty meze pevnosti konkrétních součástek, tyto hodnoty jsou barevně označeny podle mechanismu odtrhu, který nastal stejně, jak tomu bylo v tabulkách výše. Dále byly vypočítány průměrné hodnoty meze pevnosti jednotlivých řad. Na obrázku 7.3 jsou vyobrazeny typické průběhy jednotlivých desek.



Obrázek 7.4 Typické průběhy síly v čase při trhání součástek na deskách po 700 cyklech.

Žádná z desek se nijak neodlišuje od ostatních, co se týče výskytu mechanismů odtrhů. Průměrné hodnoty meze pevnosti se u prvních tří desek nezměnily a stále se pohybují v okolí 90 N, stejně tak i jejich průběhy si stále odpovídají. Rozdílné výsledky však pozorujeme na desce 2.d, která má nižší průměrnou hodnotu meze pevnosti a zároveň se její průběh drží v nižších hodnotách. Lze tedy tvrdit, že u prvních tří desek došlo ke ztvrdnutí a zkřehnutí oproti desce 2.d.

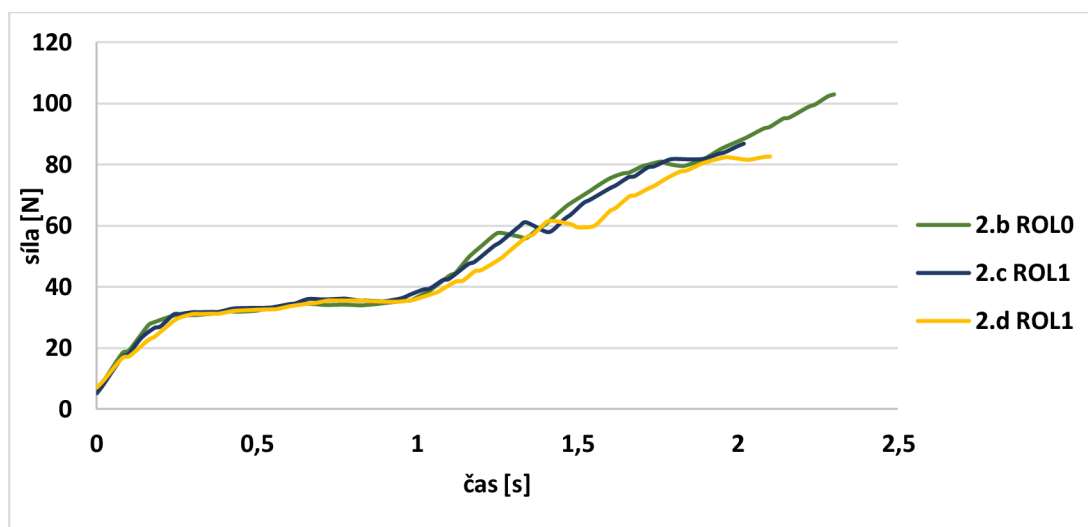
7.5 Měření po 1050 cyklech

Z každé desky byla odtržena jedna řada deseti rezistorů. Byly zaznamenány průběhy síly v čase, konkrétní hodnoty meze pevnosti a mechanismy odtrhu u všech součástek. Součástky byly označeny a uchovány. Aby bylo možné vlastnosti jednotlivých desek srovnat, byl u každé řady rezistorů vypočítán průměrný průběh, podle kterého byl vybrán průběh jednoho konkrétního rezistoru. V tomto případě byla bohužel ztracena data průběhu síly a meze pevnosti měřená desce 2.a. Údaje o uplatněném mechanismu odtrhu jsou však k dispozici.

Tabulka 7.4 Mez pevnosti po 1050 teplotních cyklech.

číslo rezistoru	Mez pevnosti ve stříhu [N]										průměr [N]	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
2.a ROL0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.b ROL0	99,6	104,2	120,6	101,4	105,3	105,3	84,6	107	69,2	71	96,8	
2.c ROL1	104,8	78	72,2	81,4	63,7	63,7	76	108,5	86,8	60	79,5	
2.d ROL1	82,7	71,9	99	106,5	56,4	56,4	81,5	71,3	59,9	83,8	76,9	

V tabulce 7.2 jsou zaznamenány hodnoty meze pevnosti konkrétních součástek, tyto hodnoty jsou barevně označeny podle mechanismu odtrhu, který nastal stejně, jak tomu bylo v tabulkách výše. Dále byly vypočítány průměrné hodnoty meze pevnosti jednotlivých řad. Na obrázku 7.3 jsou vyobrazeny typické průběhy jednotlivých desek.

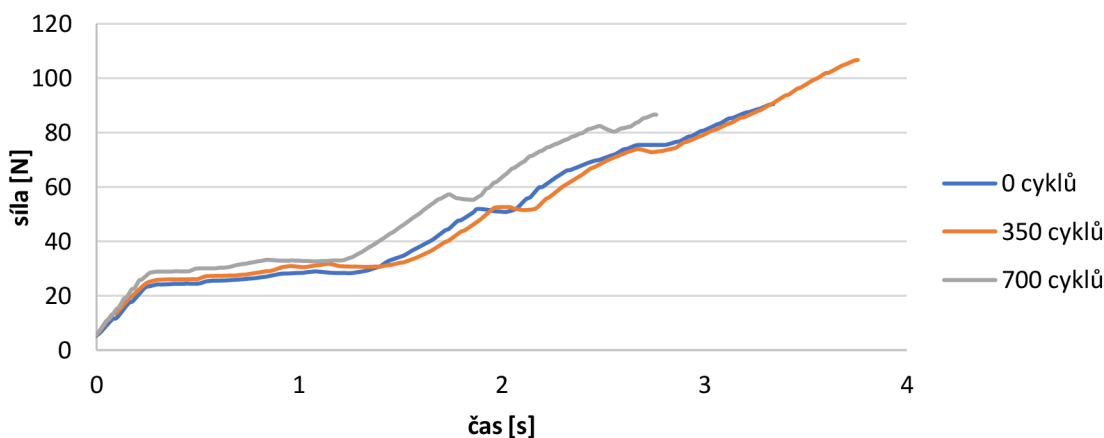


Obrázek 7.5 Typické průběhy síly v čase při trhání součástek na deskách po 1050 cyklech.

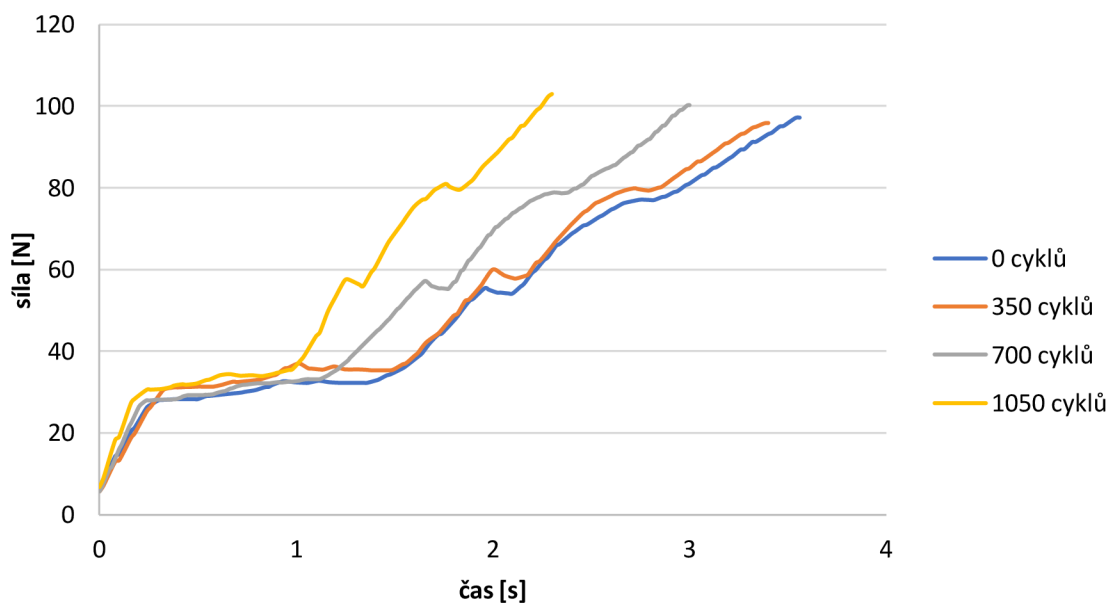
Při srovnání četnosti mechanismů odtrhu se žádný vzorek nijak zvlášť neliší od ostatních, můžeme však pozorovat značný nárůst případů odtrhu od intermetalické vrstvy na pájecí plošce oproti předchozím případům. Průběhy se již začínají mírně odlišovat, stejně tak se zvětšil rozptyl průměrných hodnot odtrhu. Stále se však ovšem nejedná o dostatečně velké odchylky, aby bylo možné říci, že se vlastnosti vzorků nějak zásadně liší.

7.6 Změny vlastností desek v průběhu stárnutí

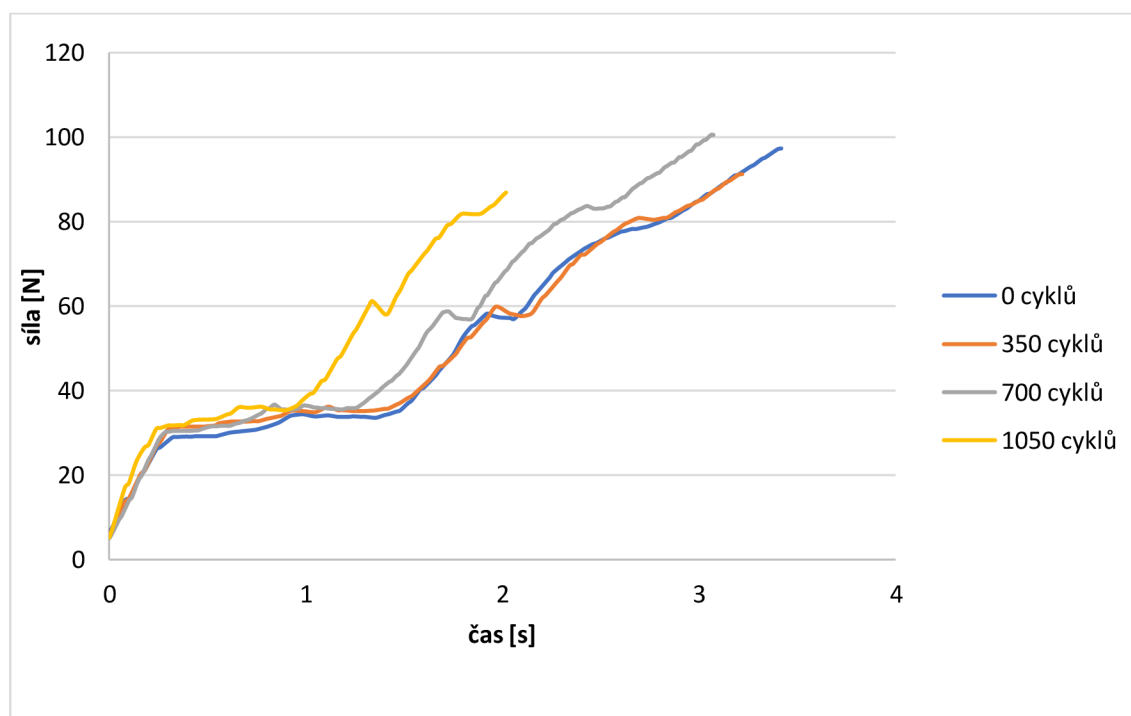
V předcházející části práce bylo ukázáno, že teplotní cyklování mělo na všechny vzorky obdobný účinek a že se mechanické vlastnosti spojů vytvořených oběma pastami od sebe nijak zásadně neliší. Jak ovšem můžeme pozorovat na obrázcích 7.6, 7.7, 7.8 a 7.9, typické průběhy se během cyklování měnily. Je zde jasně patrný trend zkracování oblasti tečení a strmější průběh oblasti plastické deformace. Po 700 cyklech je tato změna patrná na všech vzorcích kromě desky 2.d, kde ke změně zatím nedošlo. Po 1050 cyklech je již tato změna patrná na všech vzorcích kromě desky 2.a jejíž data byla ztracena.



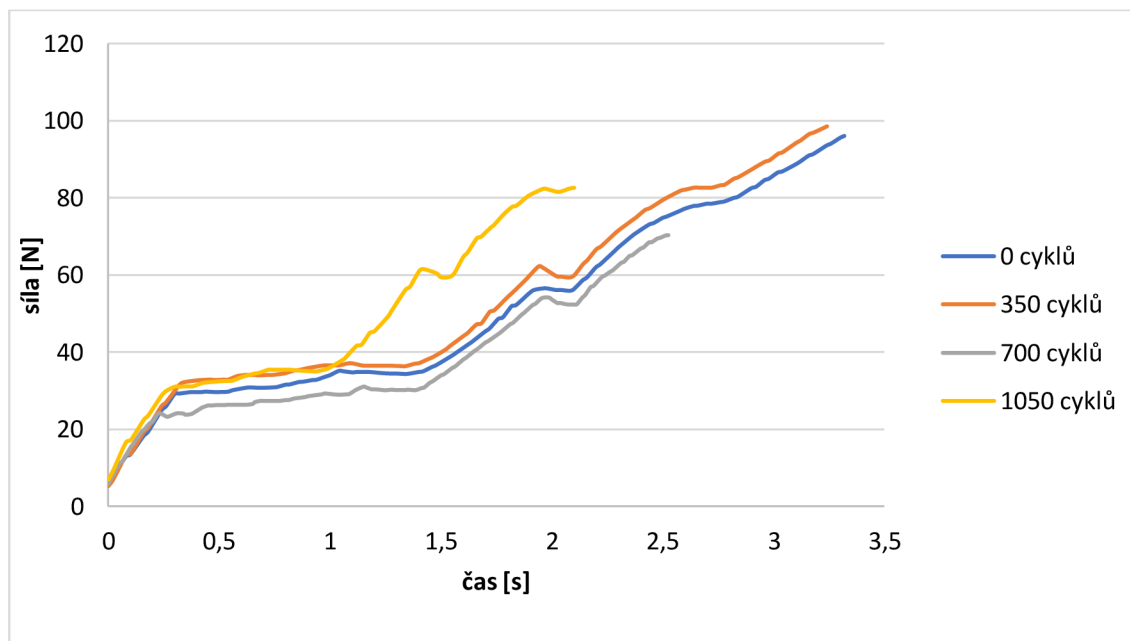
Obrázek 7.6 Typické průběhy síly v čase při trhání rezistorů v jednotlivých etapách cyklování (deska 2.a ROL0)



Obrázek 7.7 Typické průběhy síly v čase při trhání rezistorů v jednotlivých etapách cyklování (deska 2.b ROL0)



Obrázek 7.8 Typické průběhy síly v čase při trhání rezistorů v jednotlivých etapách cyklování (deska 2.c ROL1)

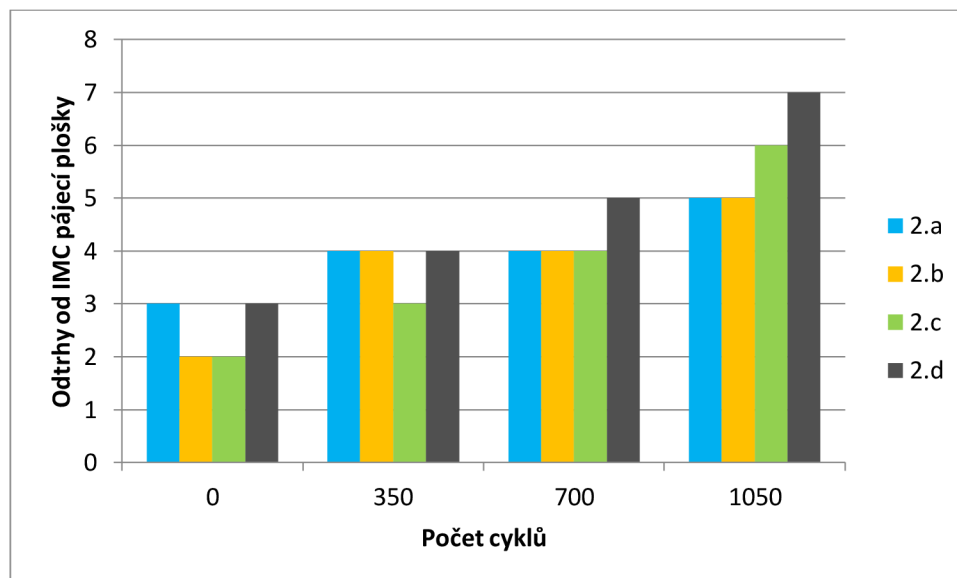


Obrázek 7.9 Typické průběhy síly v čase při trhání rezistorů v jednotlivých etapách cyklování (deska 2.d ROL1)

Byl také pozorován nárůst četnosti odtrhu od intermetalické vrstvy na plošce s tím, jak postupovalo cyklování. Počet těchto odtrhů je zaznamenán v tabulce 7.5 a vykreslen v grafu na obrázku 7.10.

Tabulka 7.5 Počet odtrhů od intermetalické vrstvy na pájecí plošce.

	0 cyklů	350 cyklů	700 cyklů	1050 cyklů
2.a ROL0	3	4	4	5
2.b ROL0	2	4	4	5
2.c ROL1	2	3	4	6
2.d ROL1	3	4	5	7



Obrázek 7.10 Počet odtrhů od intermetalické vrstvy na pájecí plošce podle počtu cyklů.

7.7 Zhodnocení výsledků

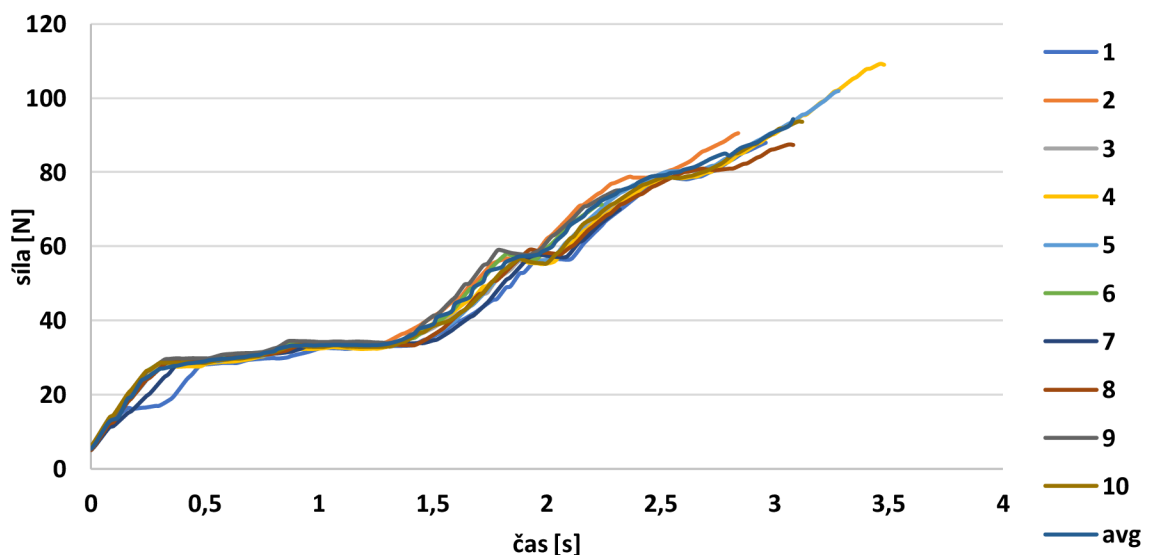
Na základě naměřených průběhů, na kterých lze pozorovat zkracování oblasti tečení a růst strmosti oblasti plastické deformace, můžeme usoudit, že pájka v průběhu stárnutí, v tomto případě v důsledku teplotního cyklování, postupně ztrácí houževnatost a křehne. Na základě pozorování mechanismů odtrhů, kde byl pozorován nárůst počtu případů odtrhu od intermetalické vrstvy na pájecí plošce, lze soudit, že došlo k růstu intermetalické vrstvy. Růst intermetalické vrstvy je pro tyto slitiny typický, navíc se vlivem růstu IMC postupně spotřebovává cín v její blízkosti a dochází k vylučování čistého bismutu, který je velmi křehký. Tento jev je i s ilustracemi podrobněji popsán v teoretické části práce. Právě tento jev byl při tomto experimentu s největší pravděpodobností pozorován.

8. SROVNÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PÁJENÝCH SPOJŮ

V tomto experimentu byly srovnávány mechanické vlastnosti pájených spojů několika pájecích past s různými slitinami a aditivy. Konkrétně PF602-P30 (Sn-58Bi ROL0), PF602-P30 s příměsí nanočástic oxidu titaničitého (1 %), PF610 (SAC305 ROL0) s příměsí nanočástic niklu (0,06 %) a kobaltu (0,001 %). Dále byly testovány mechanické vlastnosti spojů opravovaných.

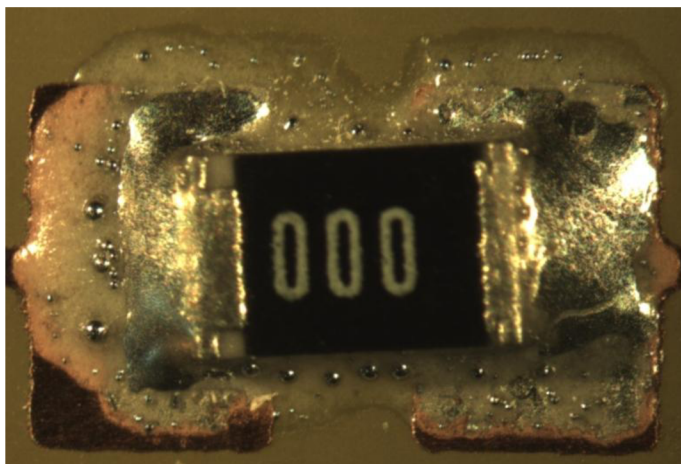
8.1 Vliv přidaných nanočástic oxidu titanu do Sn-58Bi pájky

Byla vyrobena jedna deska stejným postupem popsaným výše v kapitole testované vzorky, pouze za použití pájení pasty PF602-P30 (Sn-58Bi ROL0), PF602-P30 s příměsí nanočástic oxidu titaničitého (1 %). Následně byla odtržena jedna řada 10 rezistorů, byly zaznamenány průběhy síly v čase při odtrhu, mez pevnosti ve stříhu a mechanismy odtrhu u jednotlivých rezistorů. Součástky byly opět označeny a uchovány. Průběhy trhání můžeme vidět na obrázku 8.1. Pro srovnání s dalšími slitinami byl opět vypočítán průměrný průběh, podle kterého byl vybrán typický zástupce.



Obrázek 8.1 Průběh síly v čase při trhání součástek zapájených slitinou cín-bismut s příměsí nanočástic oxidu titanu.

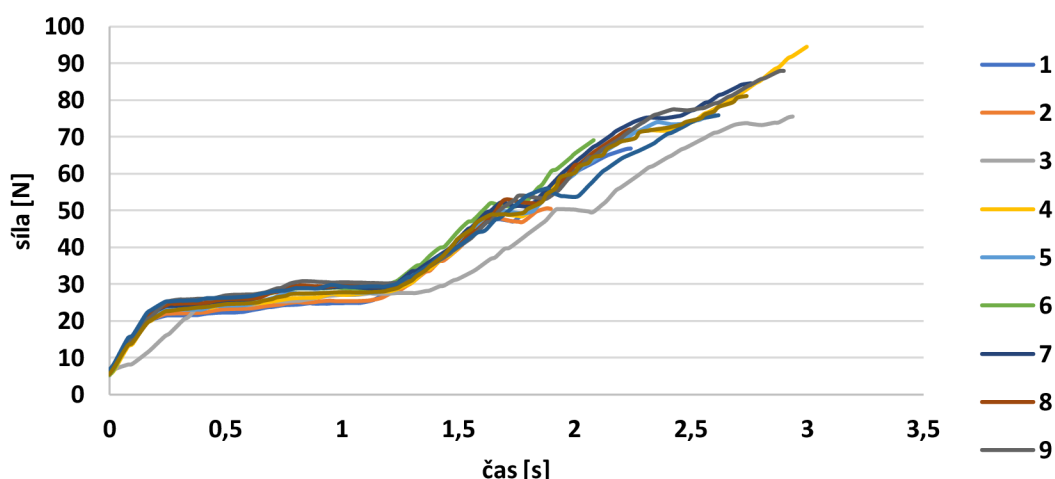
Po zapájení proběhla také optická kontrola kvality pájených spojů. Právě u této pájecí pasty došlo k největšímu výskytu kuliček pájky v okolí spoje a také bylo pozorováno velké množství tavidlových zbytků (obrázek 8.2). Oba tyto jevy byly pravděpodobně zapříčiněny stářím pájecí pasty.



Obrázek 8.2 Tavidlové zbytky vzniklé po pájení pastou PF602-P30 s příměsí oxidu titanu.

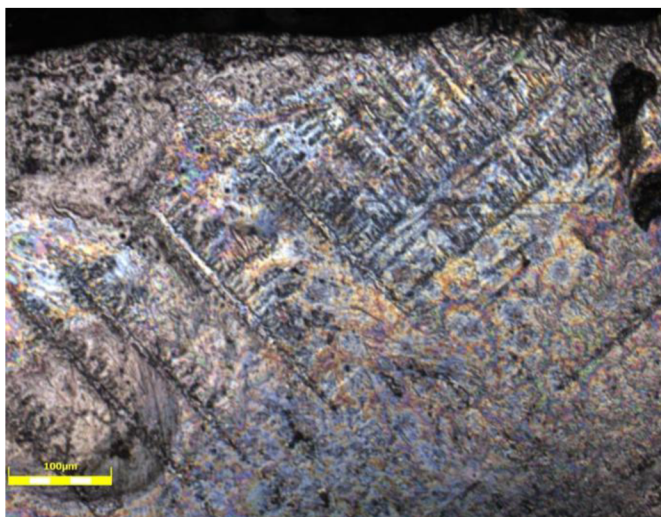
8.2 Vlastnosti Sn-58Bi při opravách na desce

Pro testování spolehlivosti bismutových slitin při provádění oprav, byla znovu použita deska dříve zapájena pastou PF602-P30, ze které již jednou byly odtrženy součástky. Zbytky pájky z pájecích plošek byly odstraněny pomocí odsávačky, následně byla deska očištěna izopropylalkoholem, znovu se natiskla pájecí pasta PF602-P30, osadily se nulové rezistory a deska byla zapájena přetavením. Následně byla odtržena jedna řada 10 rezistorů, byly zaznamenány průběhy síly v čase při odtrhu, mez pevnosti ve stříhu a mechanismy odtrhu u jednotlivých rezistorů. Součástky byly opět označeny a uchovány. Průběhy trhání můžeme vidět na obrázku 8.3. Pro srovnání s dalšími slitinami byl opět vypočítán průměrný průběh, podle kterého byl vybrán typický zástupce.



Obrázek 8.3 Průběh síly v čase při trhání znovu zapájených součástek.

Na ploškách takto zapájené desky byl pozorován jev, kdy se v rozích plošek objevovala drobná čtvercová struktura, která se v jiných případech nikdy neobjevila. Tato struktura byla pozorována laserovým skenovacím mikroskopem, výsledky tohoto pozorování se nacházejí na obrázku 8.4. Při bližším pozorování bylo pozorováno zbarvení této struktury, které přechází z odstínů žluté, přes modrou až do fialové. Čtvercová struktura s takovýmto zbarvením nápadně připomíná strukturu, která vzniká krystalizací kovového bismutu na obrázku 8.5. Dá se tedy předpokládat, že po tom, co v některých místech byla pájka přetavena potřetí, došlo k vyloučení a krystalizaci čistého bismutu na povrchu spoje.



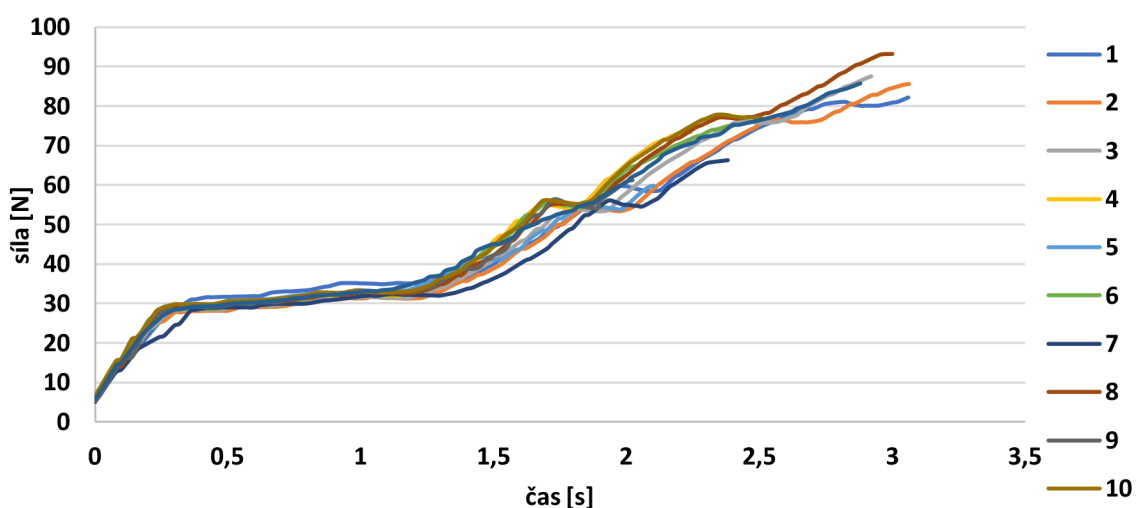
Obrázek 8.4 Struktura na okraji pájecí plošky zaznamenána laserovým skenovacím mikroskopem.



Obrázek 8.5 Krystalický bismut [10]

8.3 SAC 305 s příměsí niklu a kobaltu

Stejně jako v předchozích případech byly zapájeny nulové rezistory rozměru 0805 na měděné pájecí plošky bez povrchové úpravy. V tomto případě byl při pájení použit teplotní profil vhodný pro tento druh slitiny. Následně byla odtržena jedna řada 10 rezistorů, byly zaznamenány průběhy síly v čase při odtrhu, mez pevnosti ve stříhu a mechanismy odtrhu u jednotlivých rezistorů. Součástky byly opět označeny a uchovány. Průběhy trhání můžeme vidět na obrázku 8.6. Pro srovnání s dalšími slitinami byl opět vypočítán průměrný průběh, podle kterého byl vybrán typický zástupce. [11]



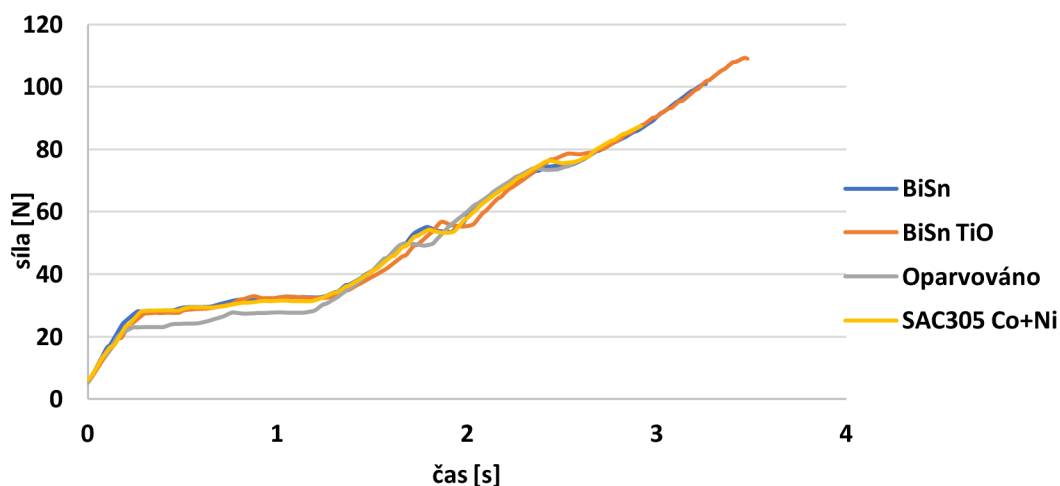
Obrázek 8.6 Průběh síly v čase při trhání součástek zapájených slitinou SAC 305 s příměsí niklu a kobaltu.

8.4 Srovnání vlastností pájek

Pro srovnání vlastností jednotlivých slitin byly do tabulky 8.1 napsány hodnoty meze pevnosti ve stříhu naměřené na jednotlivých rezistorech a vypočítány průměrné hodnoty pro jednotlivé slitiny. V tabulce je dále opět barevně odlišeno, jaký mechanismus odtrhu se u dané součástky uplatnil. Na grafu na obrázku 8.6 můžeme pozorovat typické průběhy odtrhu. Jako zástupce eutektické slitiny Sn-58Bi byla vybrána data naměřena deska označena jako 2.a před teplotním cyklováním.

Tabulka 8.1 Srovnání meze pevnosti ve stříhu jednotlivých slitin.

číslo rezistoru na desce	Mez pevnosti ve stříhu [N]										průměr [N]
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
BiSn	71,8	90,1	97,2	90,1	93,4	93,4	84,9	100,6	114	78,9	91,4
BiSn +TiO ₂	87,9	90,6	74,8	109	101,9	71,2	69,9	87,3	75,2	93,6	86,1
Opravovaná DPS	66,8	50,5	75,6	94,5	76,4	69,1	84,5	72,1	87,9	75,9	75,3
SAC305 Co+Ni	82,2	85,6	87,5	73,4	59,9	75	66,3	93,3	61,3	76,6	76,1



Obrázek 8.7 Typické průběhy síly při trhání součástek zapájených danou slitinou.

Jak můžeme vidět na obrázku 8.7, naměřené průběhy se nijak zásadně neliší, což je především u slitiny SAC305 nečekané. Vzhledem k tomu, že tato slitina má naprosto odlišné složení a pájecí profil od pájek bismutových, dalo by se očekávat, že při trhání bude docházet k odlišné deformaci a tím i průběhu, což se však nestalo. U pájek bismutových se dá očekávat, že průběhy budou podobné a odlišnosti jejich

mechanických vlastností budou hodnoceny na základu mechanismů odtrhu a meze pevnosti ve stříhu.

Přidání nanočástic oxidu titanu nemělo žádný pozorovatelný vliv na změnu chování spoje. Hodnoty neměřené ta desce zapájené touto slitinou se nijak neliší od hodnot naměřených na deskách bez částic titanu před izotermickým stárnutím nebo teplotním cyklováním. Stejně tak četnost výskytů mechanismů odtrhů se neliší natolik, aby bylo možné z toho vyvozovat jasné závěry.

U desky opravované však již můžeme pozorovat změny oproti deskám zapájeným napoprvé. Očekávání od tohoto experimentu bylo, že několikanásobným přetavením dojde k zásadnímu růstu intermetalické vrstvy na plošce. To by se projevilo zvýšeným výskytem odtrhů od pájecí plošky a také snížením průměrné hodnoty odtrhu. Pozorován však byl pravý opak, kdy sice došlo ke znatelnému snížení meze pevnosti řádově o 15 N oproti deskám pájeným napoprvé, byl však pozorován značný nárůst odtrhů v objemu pájky. Vzhledem k tomu že strmost průběhu trhání je stejná jako u ostatních případů, můžeme vyloučit, že by to bylo způsobeno zvýšenou křehkostí pájky. Pravděpodobně se uvnitř spojů vyskytl nějaký defekt např. voidy, které by mohly způsobovat takovéto odtrhy.

ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce byly provedeny technické úpravy na měřicím zařízení pro měření pevnosti pájených spojů a byl tak úspěšně snížen rozptyl měření tohoto zařízení. Dále pak bylo dohromady vyrobeno 8 desek plošných spojů bez použití povrchových úprav a na každou desku bylo zapájeno 40 rezistorů za použití příslušné pájecí pasty a teplotního profilu v přetavovací peci.

Dohromady bylo v jednotlivých experimentech odtrženo 240 rezistorů. U každého z nich byla zaznamenána mez pevnosti ve stříhu, průběh síly v čase během trhání a způsob, jakým došlo k odtrhnutí součástky. Na základě těchto parametrů byly hodnoceny mechanické vlastnosti pájených spojů v jednotlivých experimentech.

Byly provedeny 3 experimenty. V prvním byl zkoumán vliv izotermického stárnutí na mechanické vlastnosti pájených spojů tvořených slitinou Sn-58Bi. Ve druhém experimentu byl sledován vliv teplotního cyklování na mechanické vlastnosti pájených spojů tvořených slitinou Sn-58Bi za použití různých tavidel. Ve třetím experimentu byly srovnávány mechanické vlastnosti nízkoteplotních bismutových pájecích slitin se slitinou typu SAC305.

Zkouška izotermickým stárnutím probíhala tak, že z desky zapájené slitinou Sn-58Bi byla odtržena 10 rezistorů, proběhlo stárnutí při 90 °C po dobu 24 hodin a byla odtržena další sada rezistorů. Následně deska stárнула při -24 °C po dobu sedmi dnů. Z této zkoušky vyplývá, že krátkodobé vystavení této slitiny vyšší teplotě dokáže mírně zlepšit její mechanické vlastnosti, konkrétně byl pozorován mírný nárůst houževnatosti. Další pokračování stárnutí v mrazu naopak nemělo pozorovatelný vliv na mechanické vlastnosti spojů.

Dále proběhla zkouška zrychleného stárnutí za použití teplotního cyklování. Jednotlivé cykly trvaly 30 minut mezi teplotami 0 °C a 100 °C. Vždy po 350 cyklech byla odtržena jedna sada rezistorů z každé ze čtyř desek. Cyklování končilo na 1050 cyklech. Celkem byly testovány 4 desky, na dvou byla použita pájecí pasta s tavidlem ROL0 a na druhé dvě pasta s tavidlem ROL1, obě se slitinou Sn-58Bi. Mezi tavidly nebyl pozorován žádný rozdíl. Již po 700 cyklech však byla jasně pozorovatelná změna mechanických vlastností spojů, která se dále zvětšila po 1050 cyklech. V průběhu cyklování jasně docházelo ke zkracování oblasti tečení a ke zvyšování strmosti v oblasti plastické deformace, z čehož lze usoudit, že postupně docházelo ke křehnutí pájky. Dále se v průběhu cyklování zvyšoval výskyt počtu odtrhů od intermetalické vrstvy na pájecí

plošce, což vypovídá o růstu této vrstvy. Oba pozorované jevy jsou pro nízkoteplotní bismutové slitiny typické.

V poslední části byly srovnávány vlastnosti různých pájecích slitin, eutektické slitiny Sn-58Bi, též slitiny použité na opravovanou desku, též slitiny s příměsí 1 % nanočástic oxidu titaničitého a pájkou SAC305 s příměsí nanočástic niklu a kobaltu. Ve všech případech obsahovala pájecí pasta tavidlo typu ROL0. Vliv nanočástic titanu na mechanické vlastnosti spojů nebyl pozorován. Na opravované desce došlo ke snížení meze pevnosti ve střihu a přibylo odtrhů v objemu pájky, průběh síly při trhání však zůstal stejný. Stejně tomu bylo také u pájky SAC305, v tomto případě se jedná o velice překvapivý výsledek, vzhledem ke kompletně odlišnému složení této slitiny. Tato slitina není primárním tématem této práce, bylo by však dobré toto téma důkladněji probádat.

Pro další pokračování práce by bylo dobré prozkoumat vliv aditiv, jako např. oxid titaničitý, na mechanické vlastnosti spoje při teplotním cyklování. Dále by bylo zajímavé pozorovat růst intermetalické vrstvy u bismutových pájek druhé generace během stárnutí na mikrovýbrusu. Pro další měření by bylo vhodné použít desky, které byly vyrobeny, osazeny a zapájeny profesionálně, což by dále snížilo rozptyl měření a zvýšilo aplikovatelnost experimentu. Vhodné by také bylo provést další technické úpravy měřícího zařízení, které by umožnily trhání součástek z desek s oboustrannou montáží, což momentálně kvůli mechanismu uchycení desky není možné.

LITERATURA

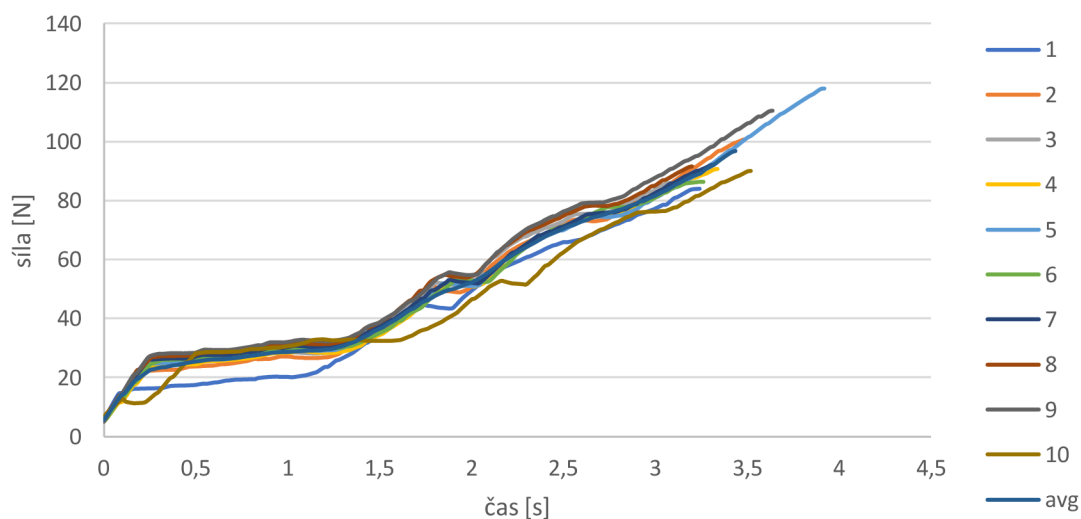
- [1] PUTTLITZ, Karl J. a Kathleen A. STALTER, ed. Handbook of lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies. New York: Eastern Hemisphere Distribution, 2004. ISBN 0-8247-4870-0.
- [2] Low-Temperature Soldering [online]. U.S.A.: BR Publishing, 2018 [cit. 2021-11-12]. ISBN 978-0-9998648-4-5. Dostupné z: <http://iconnect007.com/my-iconnect007/books/lts>
- [3] STARÝ, J., ZATLOUKAL, M., Montážní a propojovací technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FEKT, Brno, 2015, 272s
- [4] AMD Epyc 7702 delidded.jpg. Wikipedia [online]. 2019 [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:AMD_Epyc_7702_delidded.jpg
- [5] WANG, Fengjiang, Ying HUANG, Zhijie ZHANG a Chao YAN. Interfacial Reaction and Mechanical Properties of Sn-Bi Solder joints. Materials [online]. 2017, 10(8), 920 [cit. 2021-11-16]. DOI: 10.3390/ma10080920. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/10/8/920>
- [6] KANG, Hyejun, Sri Harini RAJENDRAN a Jae Pil JUNG. Low Melting Temperature Sn-Bi Solder: Effect of Alloying and Nanoparticle Addition on the Microstructural, Thermal, Interfacial Bonding, and Mechanical Characteristics. Metals [online]. 2021, 25 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/2/364>
- [7] ČECHÁK, O., Zkušební zařízení na měření pevnosti pájeného spoje. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2019. 74 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [8] PF 602-P30 HALOGEN-FREE SOLDER PASTE. ULBRICH [online]. [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: <https://www.ulbrich.cz/pf-602-p30-halogen-free-solder-paste>
- [9] IPC-SM-785: Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments. 1992.
- [10] Bismut. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Bismut>
- [11] MATRAS, J. Aplikace reaktivních nanočástic do SAC pájecí pasty. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Seznam symbolů a zkratk

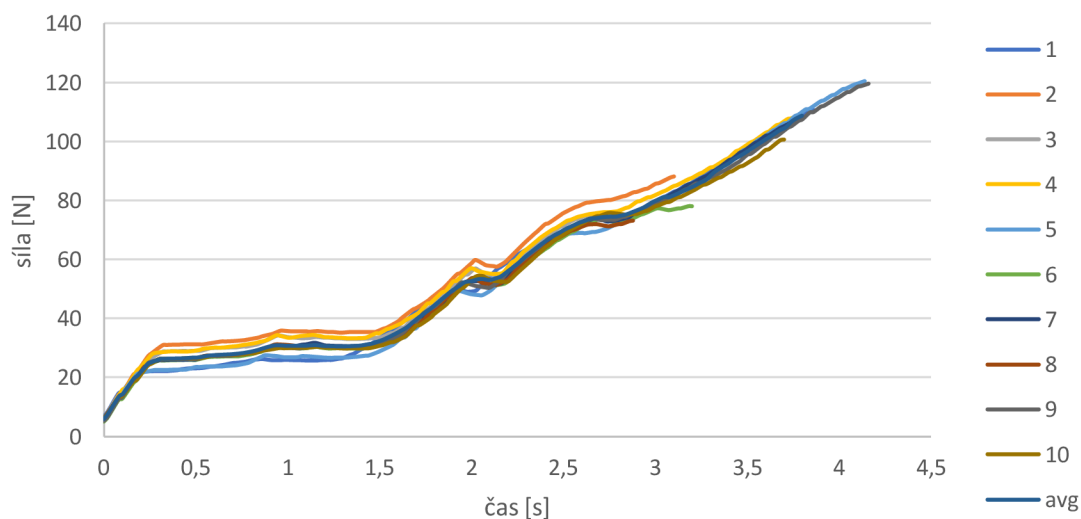
Zkratky:

PbSn	pájecí slitina z olova a cínu
SAC	pájecí slitina z cínu stříbra a mědi
BiSn	pájecí slitina z bismutu a cínu
SnIn	pájecí slitina z cínu a india
BiIn	pájecí slitina z bismutu a india
PCB (DPS)	deska plošných spojů (printed circuit board)
SMT	povrchová montáž (surface mount technology)
SMD	součástka pro povrchovou montáž (surface mount device)
THT	technologie zástrčné montáže (through hole technology)
ENiG	povrchová úprava (electroless nickel immersion gold)
NPs	nano částice (nano particles)
MWCNT	uhlíkové nano trubice (multi-walled carbon nanotubes)
RE	kovy vzácných zemin (rare earths)
IMC	Intermetalické sloučenina (intermetallic compound)

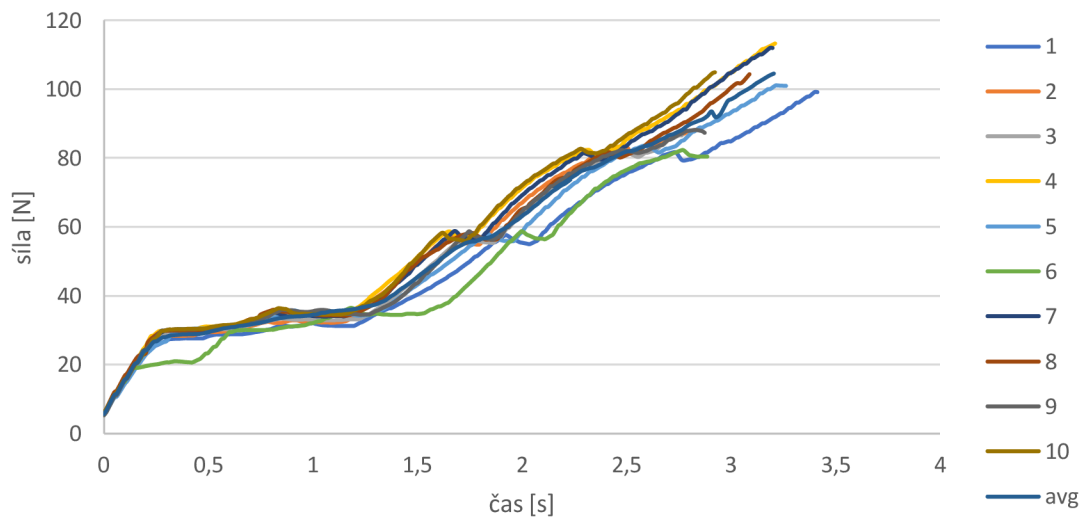
Příloha A - Průběhy Síly v čase při trhání, naměřené během teplotního cyklování.



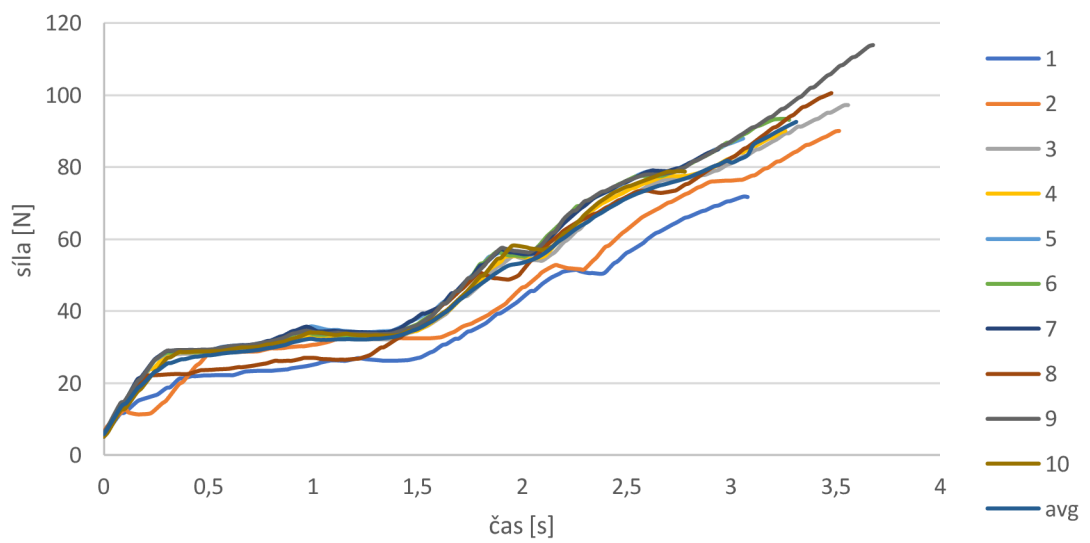
8.8 Průběhy síly v čase neměřené na desce 2.a po 0 cyklech



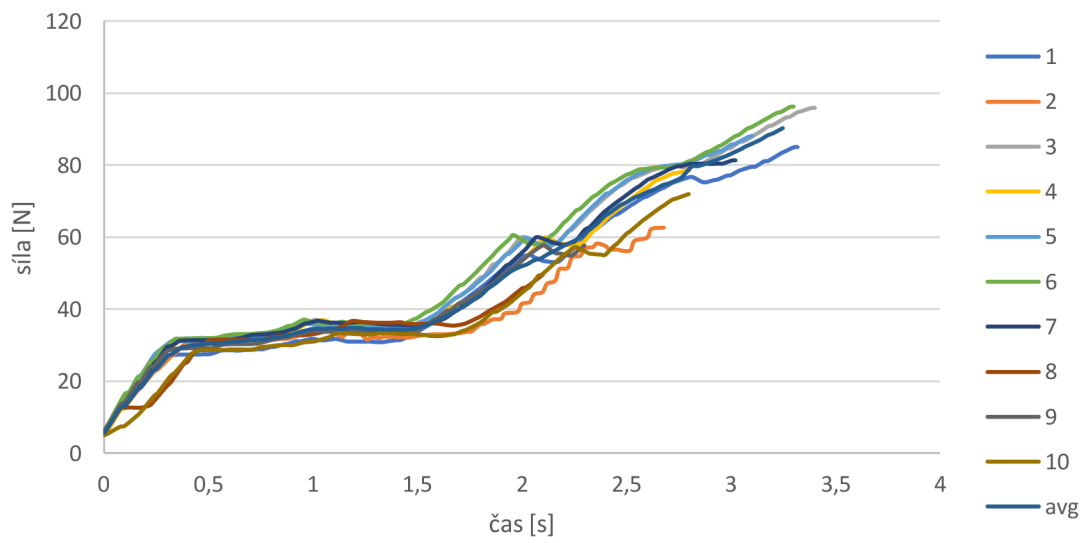
8.9 Průběhy síly v čase neměřené na desce 2.a po 350 cyklech



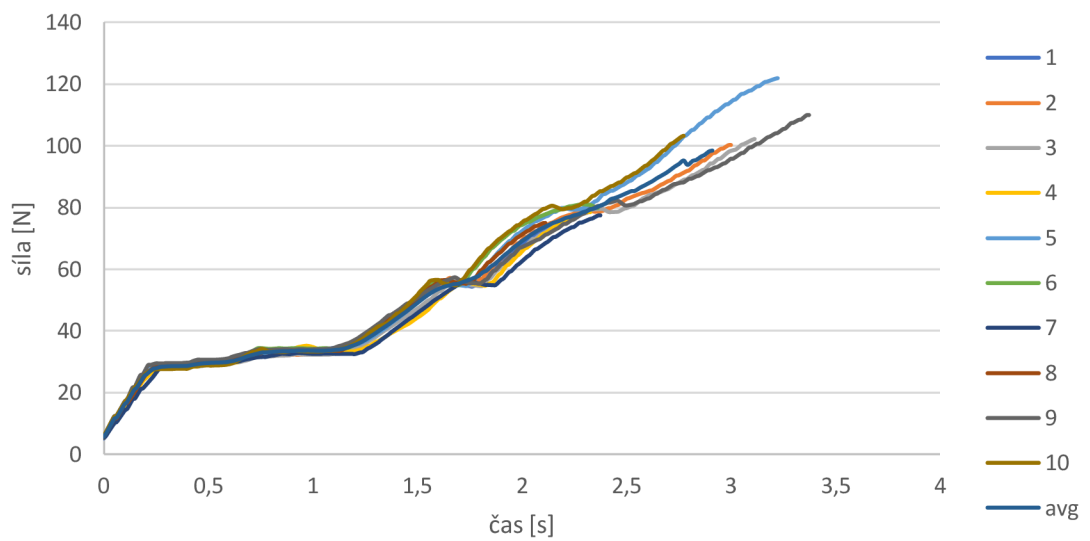
8.10 Průběhy síly v čase neměřené na desce 2.a po 700 cyklech



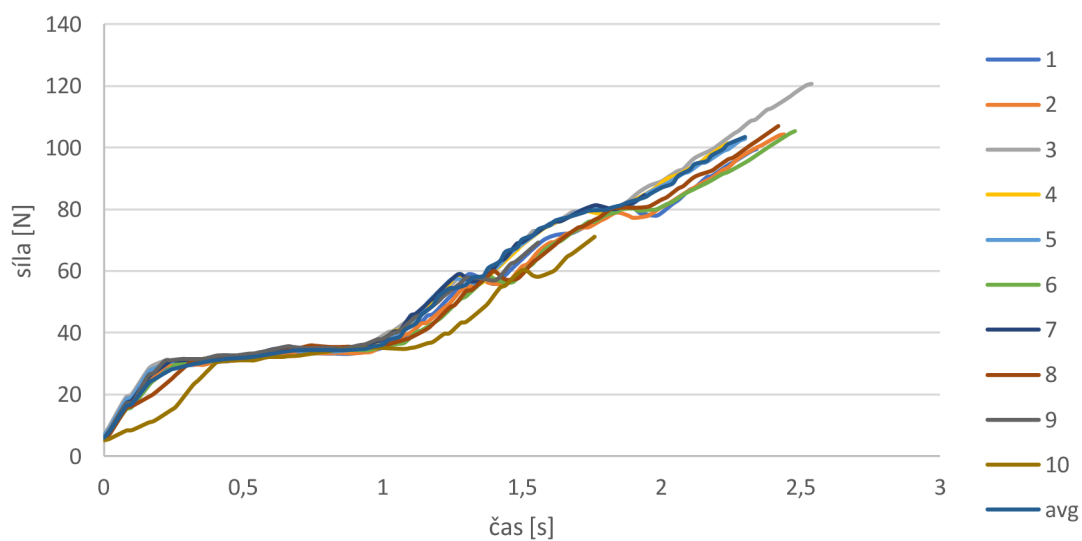
8.11 Průběhy síly v čase neměřené na desce 2.b po 0 cyklech



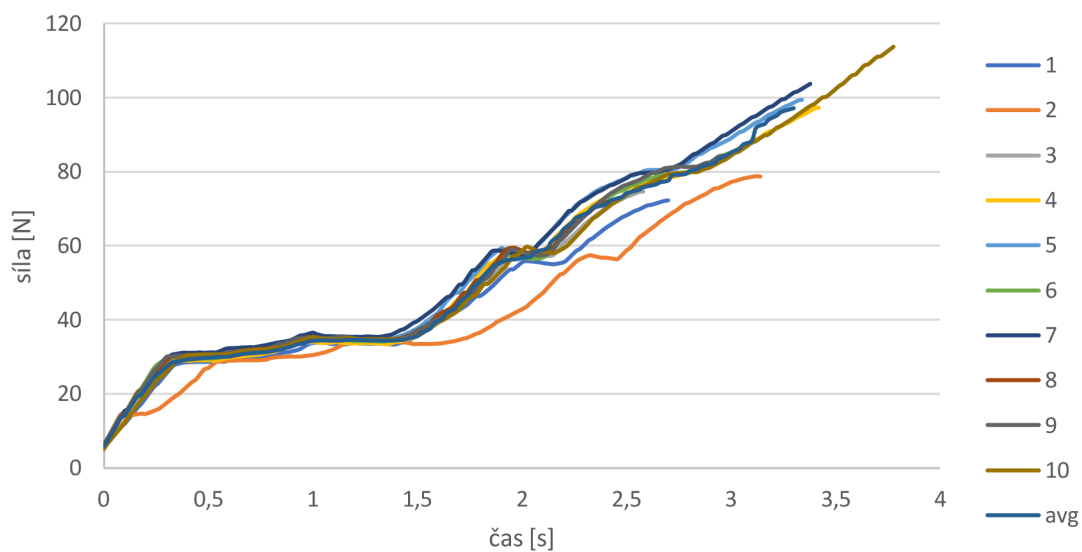
8.12 Průběhy síly v čase neměřené na desce 2.b po 350 cyklech



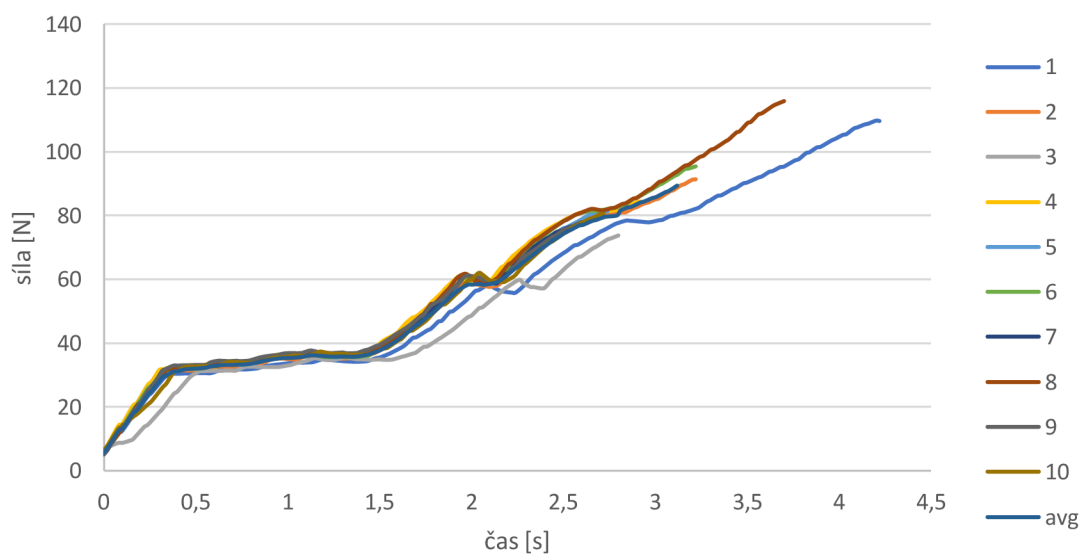
8.13 Průběhy síly v čase neměřené na desce 2.b po 700 cyklech



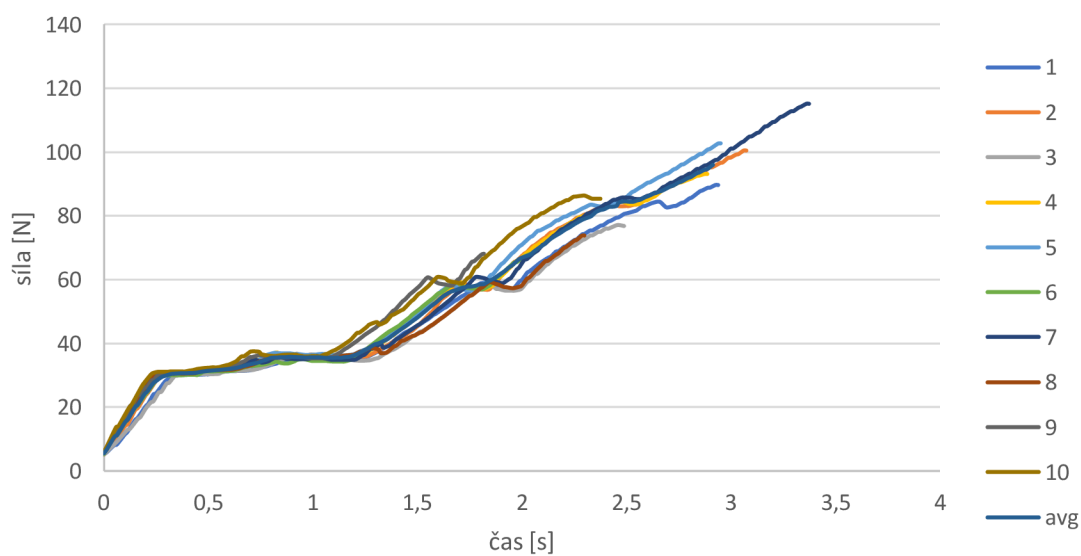
8.14 Průběhy síly v čase neměřené na desce 2.b po 1050 cyklech



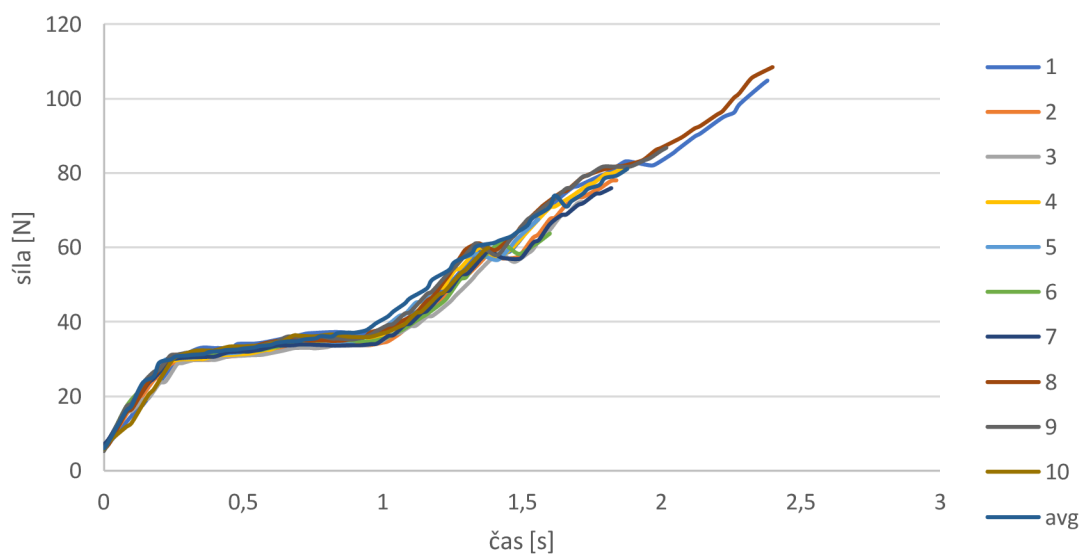
8.15 Průběhy síly v čase neměřené na desce 2.c po 0 cyklech



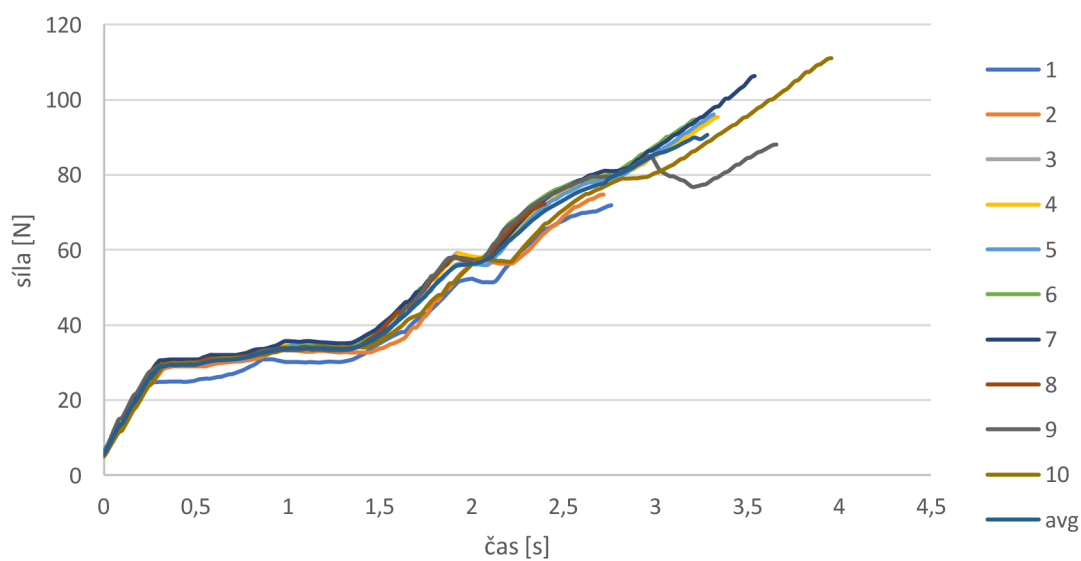
8.16 Průběhy síly v čase neměřené na desce 2.c po 350 cyklech



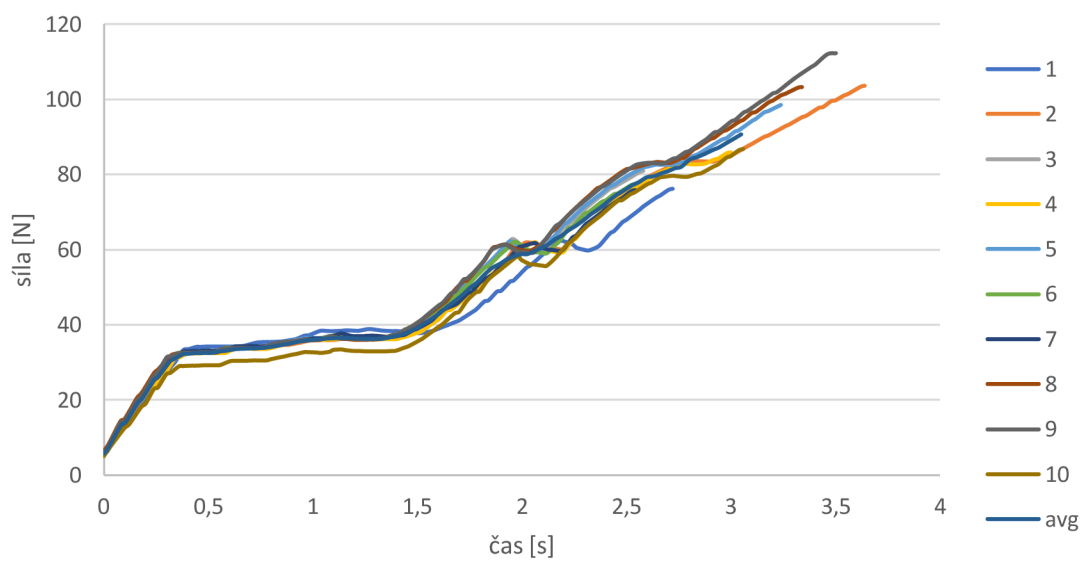
8.17 Průběhy síly v čase neměřené na desce 2.c po 700 cyklech



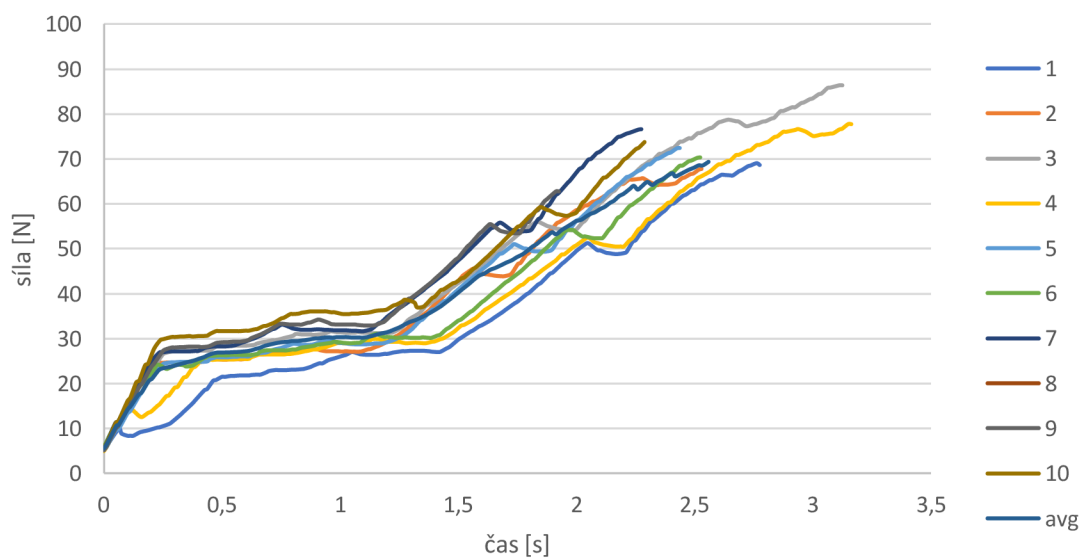
8.18 Průběhy síly v čase neměřené na desce 2.c po 1050 cyklech



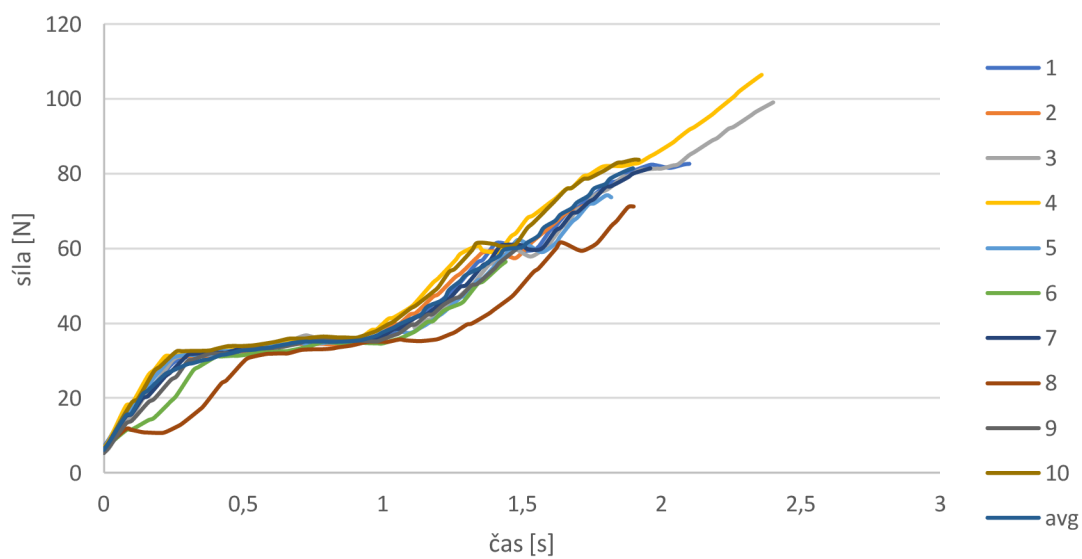
8.19 Průběhy síly v čase neměřené na desce 2.d po 0 cyklech



8.20 Průběhy síly v čase neměřené na desce 2.d po 350 cyklech



8.21 Průběhy síly v čase neměřené na desce 2.d po 700 cyklech



8.22 Průběhy síly v čase neměřené na desce 2.d po 1050 cyklech