

TVORBA WHISKERŮ PŘI MĚKKÉM PÁJENÍ V ELEKTRONICE

Pavel Žák

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie**

1. Úvod

Výroba elektrických zařízení s výrobcem objektivně deklarovanou a současně zákazníkem akceptovanou mírou spolehlivosti je jedním ze základních předpokladů ekonomické úspěšnosti každého výrobce. Míru spolehlivosti každého produktu určujeme již jeho vývojovou koncepcí – konstrukcí a vhodnou volbou materiálů a komponent adekvátní požadované míře spolehlivosti a současně i vhodnou volbou a zejména trvalou stabilitou všech technologických postupů realizace produktu. Na základě dlouholetých zkušeností z oblasti investiční elektrotechniky lze říci, že jednou třetinou ovlivňují výslednou spolehlivost produktu pracovní vývoje a konstrukce, ale dvěma třetinami vhodná volba a následně především trvalá stabilita jejich výrobní realizace. Zde je na místě si uvědomit, že nejčastější „součástíou“ v elektrických zařízeních je vodivý spoj a tím i přes nástup nových technologií (lisování, narážení, vodivá lepidla atd.) stále zůstává spoj pájený pájkami na bázi slitin cínu. V tomto případě, požadavkem na téměř stoprocentní eliminaci olova ze slitin pájek, poněkud předběhla platná legislativní opatření technologický pokrok zvláště v oblasti výroby dlouhodobě spolehlivých elektrických zařízení. Podporou k udržení nebo snad dokonce zvyšování spolehlivosti produktů nejsou také snahy plošně nahrazovat galvanicky nanášené povrchové úpravy ze vzácných kovů u konektorových kontaktů nebo pájecích ploch desek plošných spojů povlaky z obecných kovů, zejména čistého a převážně z estetických důvodů galvanicky nanášeného lesklého cínu.

Tento legislativní požadavek na změnu technologie pájení i současný tlak na snížení cen povrchových úprav¹ přináší do průmyslové praxe relativně nový a ještě ne zcela doceněný poruchový mechanismus – reálnou možnost výskytu vodivých cínových whiskerů hrozící v celém exploatačním cyklu elektrického zařízení.

Problematika výskytu whiskerů je prokazatelně sledována již od roku 1946. V rámci poruchových analýz elektrických zařízení² byly v průběhu následujících let v podstatě náhodně detekovány výskyty whiskerů cínu i celé řady dalších chemických prvků, např. u zinku, kadmia a dále mnohem méně často na površích stříbra, železa, niklu a platiny a dalších kovů.

Již na počátku je proto nutno zdůraznit, že se zde skutečně nejedná pouze o problém týkající se měkkého pájení v elektrotechnice, ale problém týkající se i všech souvisejících technologií, které měkkému pájení předcházejí nebo na něj navazují. V každém případě se tedy jedná o široký záběr technologických aplikací, nejen o pájení součástek, ale i o problémy spojené jak s použitím konektorů, jejichž aktivní kontaktní plochy jsou pokovovány lesklým cínem³,

¹ Náhrady povrchových úprav z drahých kovů čistým cínem i v případech, kdy tato náhrada není funkčně adekvátní (např. v automobilovém průmyslu apod.

² Data o výskytech whiskerů jsou zcela nepochybně kvantitativně zkreslena, neboť poruchová analýza bývá i doposud prováděna většinou jen u elektrotechnických zařízení zvláštní důležitosti – zbrojní systémy, v medicíně např. implantovaná zařízení, řídicí systémy investičních celků apod., ale zcela výjimečně u tzv. spotřební elektroniky nebo „bílé“ techniky, která tvoří převážnou část produkce zařízení. Je zde na místě podotknout, že u produktů spotřební elektrotechniky není v současné době prioritou spolehlivost produktu, ale spíše jeho výrobní náklady.

³ Např. převážná většina konektorů užívaných renomovanými firmami v oblasti automobilového průmyslu.

tak obdobně i pájení čistým cinem pokovených a z ekonomických důvodů nepřetavovaných desek plošných spojů, pocínovaných vývodů a pouzder součástek apod.

Dále nutno konstatovat, že výzkum problematiky výskytu whiskerů a podmínek jejich samotného vzniku a existence je zatím na samém okraji zájmu výzkumných pracovišť. Ani ze strany průmyslu není tento výzkum nijak zvlášť podporován, zde je oprávněné riziko, že by každé z nově nalezených řešení představovalo přinejmenším vícenásledky do technologií nebo dokonce přímé ekonomické ztráty.⁴

Legislativně vynucený přechod k bezolovnatým technologiím jak u měkkého pájení, tak i v oblasti galvanických úprav povrchů, bez předchozí podpory vědeckého výzkumu, přinesl zvýšené riziko možnosti výskytu whiskerů. Nutnost vědeckými poznatky podloženého aktivního omezování výskytu whiskerů bude nepochybně pro řadu vysokoškolských pracovišť vysoce aktuální oblastí pro obory technologie a materiálového inženýrství.

2. Problematika whiskerů

Whiskery, jsou relativně mechanicky odolné krystaly z počátku svého růstu jehlicovité, v pokročilé fázi růstu pak spíše vláknité nepravidelné formy samovolně vyrůstající z povrchu kovu.

Do současnosti bylo zjištěno, že mohou vyrůstat z povrchů mnoha kovů: nejčastěji z cínu, zinku, kadmia a antimonu. Mnohem méně se vyskytují u stříbra, železa, niklu a platiny a dalších kovů.

3. Nepříznivé účinky whiskerů

Výskyt whiskerů představuje velmi závažné nebezpečí pro správnou funkci a spolehlivost elektronických zařízení. Růst whiskerů byl prozatím pozorován zejména u vývodů elektronických součástek, na kovových krytech a EMI stínících prvků, na povrchu galvanicky upravených desek plošných spojů a zejména pak mezi kontaktními špičkami konektorů. Stupeň rizika destrukčních vlivů whiskerů na funkci zařízení významně roste se stupněm miniaturizace součástek i zařízení. Doposud bylo možno pozorovat zejména tyto základní formy poruch:

Trvalý elektrický zkrat.

Elektricky vodivý whisker může vytvořit elektrický zkrat spojením dvou vodičů, se vzájemně různými potenciály. Tento jev nastává zejména v elektrických obvodech s velkou impedancí a relativně malým napětím. Experimentálně bylo zjištěno, že whiskerem může protékat trvale proud o velikosti přibližně 10 mA.

Krátkodobý elektrický zkrat.

Při krátkodobém zkratu může whiskerem téct proud větší než 50 mA, navíc není předem jisté přerušení whiskeru jeho přetavením nebo odpařením. Proudová odolnost whiskerů je zatím experimentálně prakticky neověřitelná vzhledem k ještě nezvládnuté reprodukovatelné metodice přípravy konzistentních souborů vzorků se stabilními fyzikálními vlastnostmi.

Vznik volně se pohybujících úlomků whiskerů.

V aplikacích, kde se vyskytují mechanické vibrace nebo šoky, může dojít ke vzniku volně se pohybujících úlomků whiskerů. Ty poté mohou znehodnotit optické soustavy, poškodit mikromechanické struktury MEMS⁵ nebo mohou opakovaně způsobit nahodilé elektrické zkraty mezi vývody elektronických součástek, špiček konektorů nebo vodičů s dočasnými případně i nevratnými důsledky pro funkci zařízení.

⁴ Za současného nepříliš příznivého stavu světové ekonomiky jsou tyto vícenásledky obtížně promítnutelné do ceny produktů.

⁵ MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) je kombinace mikroelektroniky a mikromechaniky, která je vyráběna metodou leptání z křemíkového základu.

Vznik elektrického oblouku odpařením whiskeru po zkratu.

Při specifických obvodových podmínkách, zejména za sníženého atmosférického tlaku může dojít při zkratu k vypaření materiálu whiskeru a k následnému zažehnutí výboje. Takto může výbojem protékat špičkový proud o velikosti několika set ampér, dokud nedojde k zhasnutí oblouku. Toto nebezpečí je mimořádně vysoké v případě elektronických zařízení provozovaných za sníženého atmosférického tlaku, např. u vesmírné, letecké nebo raketové elektronické výstroje.

4. Mechanismus vzniku a růstu cínových whiskerů

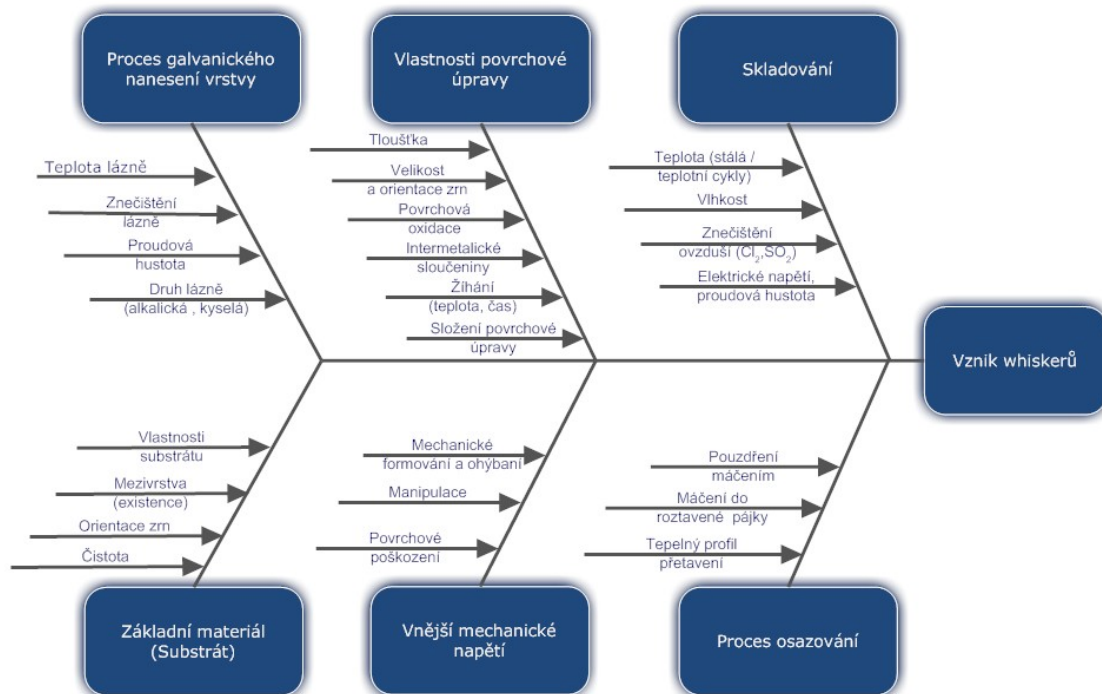
I přes mnohaletý výzkum (již více než 50 let) whiskerů není doposud formulována univerzální teorie popisující mechanismus jejich vzniku. Mezi základní faktory ovlivňující jejich vznik patří:

- napětí v tlaku v povrchových vrstvách materiálové struktury,
- atomová difúze,
- rekrystalizace.

Většina studií potvrzuje, že snaha uvolnit vnitřní napětí uvnitř povrchové cínové vrstvy je hlavní příčinou vzniku krystalizačních zárodků whiskerů a jejich pozdějšího růstu. Zatím existují tři základní teorie vzniku whiskerů,

- dislokační teorie,
- teorie povrchové energie,
- rekrystalizační teorie.

Souhrn jednotlivých faktorů, které ovlivňují vznik whiskerů byl autorem pro přehlednost a kategorizaci jednotlivých vlivů zpracován formou Ishikavova diagramu (obr. 4.1)



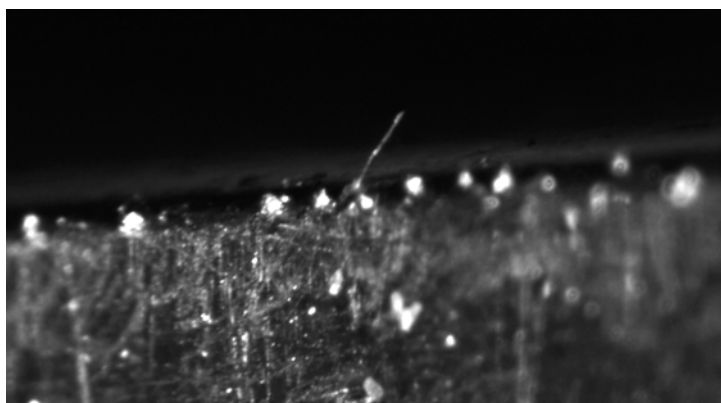
Obr. 4.1 Ishikavův diagram faktorů ovlivňujících vznik whiskerů

5. Experimentální výsledky

V rámci experimentální části diplomové práce se podařilo, pravděpodobně poprvé v tuzemsku, cíleně vypěstovat cínové whiskery již v relativně krátké době 53 dní, přičemž první příznaky jejich růstu byly nalezeny již po 16 dnech.

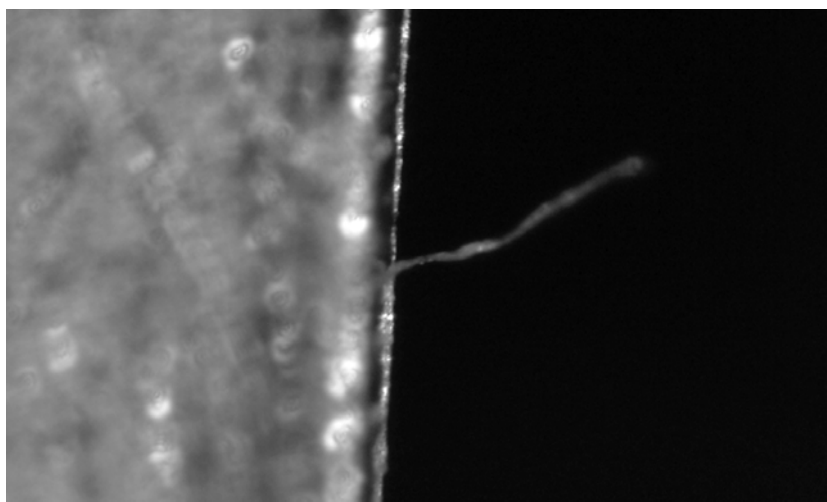
Experimentální část byla koncipována s cílem stabilizovat podmínky experimentu k dosažení jeho reprodukovatelnosti jako základu dalšího pokračování prací na řešení této problematiky na zadávající katedře.

Na následujícím obrázku je vidět klasický příklad růstu whiskerů o délkách až 0,5 mm, které vyrostly na hranách vzorků mosazi s mezivrstvou Cu po expozici suchým teplem a 940 hodinách. Na obr. 6. 4 je zřetelné jak se whisker vyrůstající ze základny větví. Další zárodky jsou zřejmé po délce hrany vzorku.



Obr. 5.1 Hrana vzorku (expozice suché teplo 940 hodin – 40 dní)

Na dalším obrázku je vidět whisker prozatím o délce 1,1 mm, který vyrostl na hraně vzorku CuSn 8 bez mezivrstvy Cu po expozici suchým teplem a 1128 hodinách.



Obr. 5.2 Hrana vzorku (expozice suché teplo 1128 hodin – 47 dní)

Jako velice dobře koncipované a v podstatě zcela nezbytné pro možnou identifikaci a obrazové záznamy whiskerů se ukázalo vybavení mikroskopického pracoviště zadávající katedry od firmy OLYMPUS, které s malými doplňky může dobře posloužit k dalšímu rozvoji laboratorní techniky pro tuto problematiku, včetně mikropreparace jednotlivých whiskerů.

Na rozdíl od Brittona (1974) [2] byly úspěšně vypěstovány cínové whiskery na mosazi s Cu mezivrstvou, hypotézu o ochranné schopnosti Cu vrstvy galvanicky nanesené na mosazi lze tedy vyloučit. Tuto skutečnost lze také vysvětlit tím, že v průběhu let doznalo výrazných

změn chemické složení galvanických lázní minimálně vyřazováním kyanidových technologií při nanášení Cu. Kyanidové technologie sice vytvářely Cu vrstvy vynikajících vlastností, ale objektivně nejsou slučitelné s ochranou zdraví obyvatelstva ani životního prostředí.

Lze říci, že universální teorii o ochranném vlivu mezivrstev v soustavě „základní materiál – mezivrstva – čistý cín“ nelze zatím formulovat. Hlavní příčinu můžeme vidět ve velmi široké variabilitě prvních dvou prvků soustavy zapříčiněné širokým spektrem základních materiálů i velkým počtem konfekčních galvanických lázní lišících se často řadou chemických přísad zvyšujících přilnavost vrstev, jejich lesk apod. Leskutvorné přísady do galvanických lázní pro nanášení lesklého cínu jsou většinou nejen obchodním tajemstvím jejich výrobců, ale ještě častěji katalyzátorem tvorby whiskerů. Zásadní význam zde má zabudování organických sloučenin z galvanické lázně do struktury cínové vrstvy. Mimořádné riziko zde přinášejí právě leskutvorné přísady, které jsou obvykle organické látky s velkou molekulou obsahující větší počet vzájemně vázaných benzenových jader. I u základních materiálů platí totéž, jeho vlastnosti a chemické složení mohou být určující pro míru náchylnosti k tvorbě whiskerů v soustavě.

Experimenty byla prokázána hypotéza, že whiskery vyrůstají vždy z jednoho zárodečného bodového zdroje. Dále, že zejména při rostoucí délce nezachovávají vždy lineární směr, ale mohou být rozmanitě tvarovány.

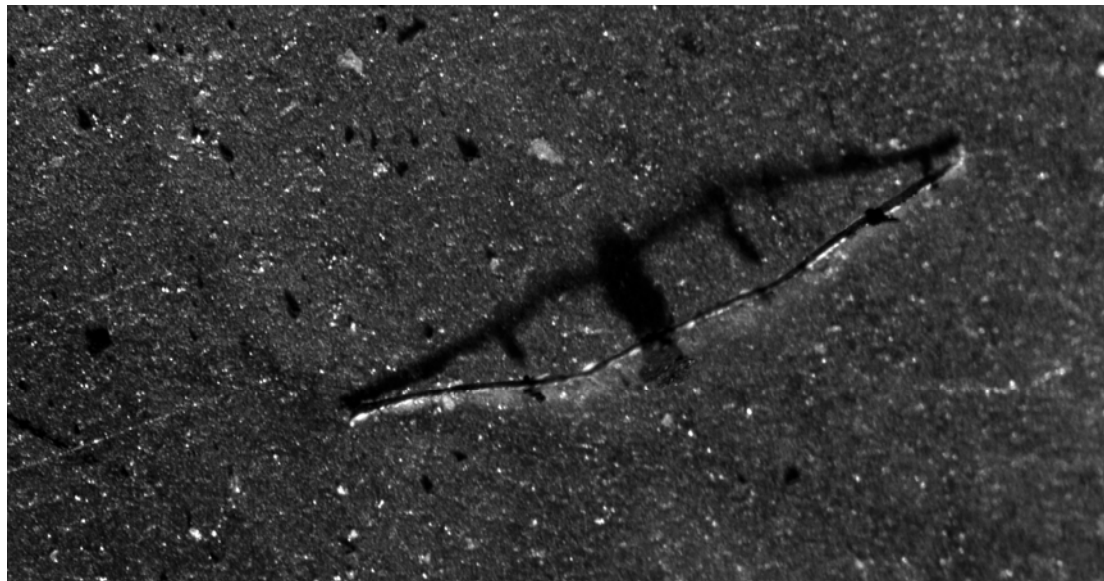
Neúčinnost nebo malá účinnost Ni mezivrstev je zaviněna především jejich nehomogenitou. Z cenových důvodů (včetně rostoucích cen elektrické energie) si zákazníci prosazují minimální tloušťky vrstev obecně a u Ni a Sn vrstev zvlášť. Kvůli nákladovým úsporám tak rychle klesá výsledná spolehlivost produktů. Tento trend je v současnosti zvláště zřejmý v automobilovém průmyslu.

Jednoznačně byla potvrzena hypotéza [3], že whiskery rostou nejrychleji v rozmezí teplot $20 \div 75$ °C s maximem mírně nad rekrystalizační teplotou cínu (30 °C), tj. při teplotě 50 °C. Teplotu 50 °C lze nadále považovat za experimentální optimum, navíc výhodné i pro malé energetické nároky na provoz klimatických komor.

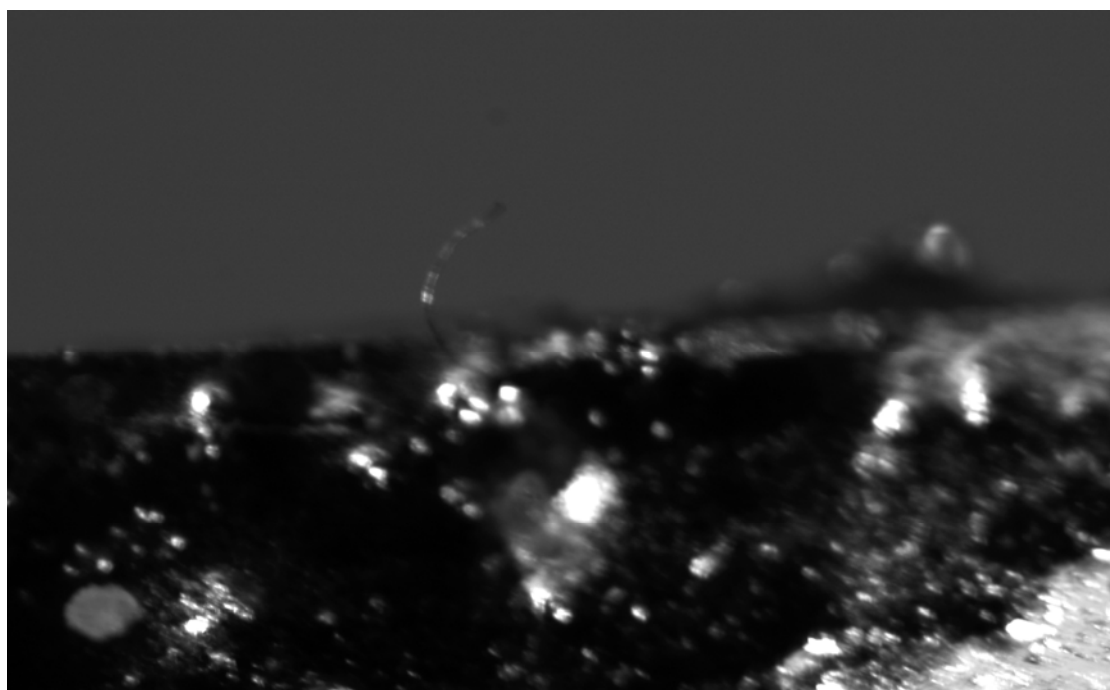
Mezi metody omezení růstu cínových whiskerů je možno doporučit aplikaci vrstev čistého cínu s tloušťkou větší než $8 \div 10$ μm, dle možnosti zavést žihání vrstev při teplotách okolo 150 °C (pokud možno v ochranné atmosféře). Zákaznický trend je však v současné době dle autorova průzkumu volba tloušťek $1 \div 2$ μm, což je v přímém rozporu s úsilím o minimalizaci případů vzniku a růstu whiskerů. S naprostou jistotou lze říci, že whiskery se v zařízení nebudou tvořit nikdy při teplotách nad 150 °C a pod – 40 °C.

Jediným obecně platným doporučením pro omezení tvorby whiskerů je nepoužívat čistý cín, což je považováno za jednu z nejbezpečnějších metod zamezení tvorby whiskerů. Rozhodovací proces pro minimalizaci rizika jejich výskytu je graficky znázorněn je znázorněn na diagramu obr. 5. 3

Vzorky z materiálu CuSn8 40 × 22 × 0,3 mm byly máčeny do lázně roztavené pájky s použitím tavidla TL – X33F⁶. Referenční vzorek P 1 byl nanesen galvanicky.



Obr. 5.4 Plocha vzorku P 1, galvanicky nanesená vrstva Sn 1,21 μm (84 000 cyklů)

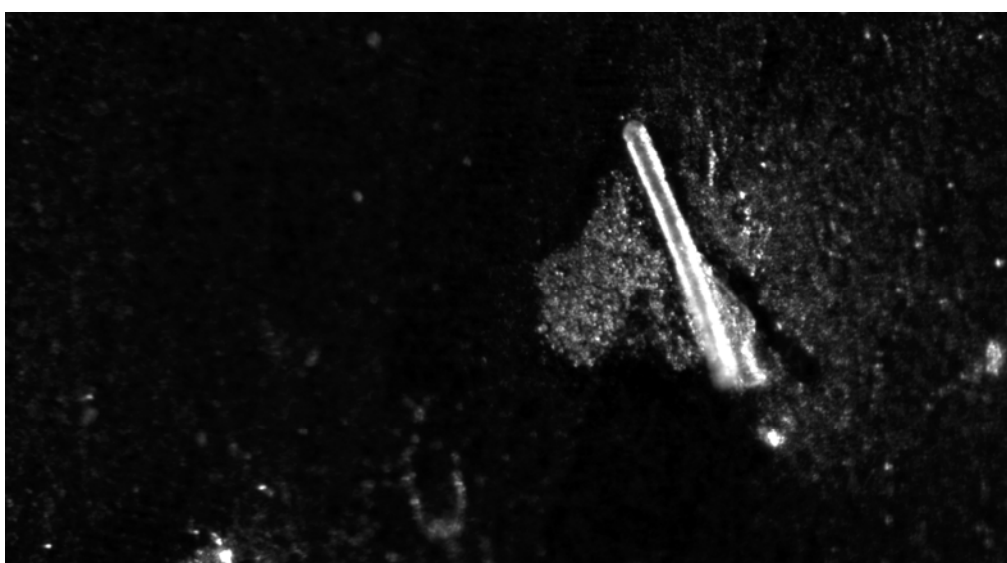


Obr. 5.5 Plocha vzorku P 4, pájka Sn97Cu3 (84 000 cyklů)

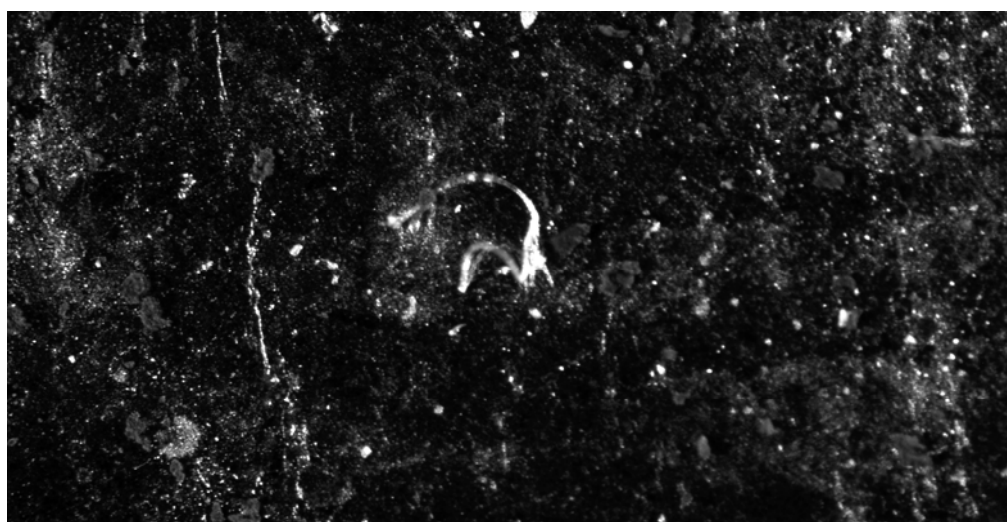
⁶ Výrobce ECS Tools Benešov výrobní číslo šarže 29238



Obr. 5.6 Plocha vzorku P 6, pájka Sn99Cu1 (84 000 cyklů)



Obr. 5.7 Plocha vzorku P 7, pájka Sn95,5Ag3,8Cu0,7 (84 000 cyklů)



Obr. 5.8 Plocha vzorku P 8, pájka Sn95,5Ag3,8Cu0,7 (84 000 cyklů)

6. Závěr

Závěrem lze konstatovat, proces pájení bezolovnatými pájkami nelze považovat z hlediska budoucí spolehlivosti zařízení za zcela zvládnutý. Autor nepovažuje použití bezolovnatých pájek za vhodné zejména u zařízení, na nichž závisí bezpečnost provozu elektrického zařízení, jako jsou např. jaderné technologie, ovládací soustavy elektráren nebo rozvodných soustav, ale u takových „maličkostí“ jak jsou např. kardiostimulátory nebo inzulinové pumpy apod. Již možnost výskytu whiskerů v elektrickém zařízení investiční povahy představuje v řadě případů neúnosné riziko pro jeho spolehlivý provoz i provozní spolehlivost velkých vzájemně provázaných celků. U spotřební techniky představuje naopak výhodný zdroj příjmů pro servisní organizace.

7. Seznam literatury

- [1] ŽÁK, PAVEL. *Tvorba whiskerů při měkkém pájení v elektronice*. Diplomová práce. ČVUT fakulta elektrotechnická, katedra elektrotechnologie. Praha 2008.
- [2] BRITTON, S. C. *Spontaneous Growth of Whiskers on Tin Coatings: 20 Years of Observation*. Transactions of the Institute of Metal Finishing, Vol. 52, pp. 95-102, April 3, 1974.
- [3] VO, N.; TSURIYA, M. *Whisker Assessment of Tin-Based Finishes for Leadframe Packages*. Proceedings of the ECO Design Japan Symposium, pp. 120-123, December 2002.