

## Vliv koeficientu přenosu tepla na pájení přetavením

M. Hurban<sup>1</sup>, I.Szendiuch<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Rehm Česká republika s.r.o., Náměstí S. Freuda 4, Příbor

<sup>2</sup> Ústav mikroelektroniky, VUT v Brně, Technická 10, Brno

E-mail: rehm@reflow.cz, szend@vutbr.cz

### Anotace:

Pájení přetavením je v současné době nejvíce používanou metodou spojování součástek do elektronických sestav. Vlastní pájení dnes probíhá při teplotách kolem 235 - 245°C, což klade významné požadavky na účinnost přenosu tepla z pájecího stroje na výrobek. Mnohé součástky jsou při těchto teplotách již na hranici svého použití, proto přesné nastavení a regulace teploty (teplotního profilu) hraje velkou roli pro spolehlivý a efektivní výrobní proces.

Koeficient přenosu tepla je důležitým prvkem celého procesu, v podstatě ukazuje, jaká je efektivita pájecího stroje z pohledu přenosu energie. Vliv na uvedený koeficient má především mechanické uspořádání pájecího stroje. Tento článek se věnuje teorii koeficientu přenosu tepla a s tím spojenými procesy, které mají zásadní vliv na efektivní pájecí proces.

Reflow soldering is nowadays the most used method of connecting electronic components into product.

Soldering itself is done at temperatures between 235°C - 245°C. Effectiveness of heat transfer is a very important part of the process. This temperature is very high for some components and precise temperature adjustment and regulation (profiling) is leading part of reliable and effective production process.

Heat transfer coefficient is essential for the whole process, in fact it shows effectiveness of the soldering process from energy transfer point of view. The main influence onto this coefficient has the mechanical construction of the soldering machine. This article describes some basics of heat transfer theory and processes, needed for effective soldering process.

### ÚVOD

Už ve druhé polovině minulého století začal proces pájení nabývat stále většího významu při výrobě elektrických a elektronických výrobků. Především potom rozmach strojové výroby, rozvoj mikroelektroniky a následné tendence zmenšování součástek (SMT) vedly k vývoji a zavedení pájení přetavením do výrobních procesů. Při velikosti některých dnešních součástek ani jiný způsob výroby v podstatě už nepřichází do úvahy.

Přenos tepla z pájecího stroje na výrobek lze provést několika různými způsoby. Lze jej realizovat buď infračerveným zářením, vedením tepla (kondukcí) nebo konvekcí.

Nejpoužívanější je konvekce, nejčastěji vynucená. To znamená, že teplo se předává zahřátým proudícím médii (vzduch, dusík), které je pomocí ventilátorů hnáno na výrobek, kde předává teplo a tím pájí. Rychlost proudění média je jedním z rozhodujících faktorů pro účinnost předávání tepla, tedy ovlivňuje námi zkoumaný koeficient přenosu tepla. Proudění musí být laminární, jinak hrozí (v případě turbulentního proudění) vznik příčných sil, které mohou pohnout součástkami, které se za běžných okolností vlivem viskozity a jisté lepivosti pájecí pasty nepohnou. Samozřejmě na tuto situaci má vliv i geometrie a celkové rozměry součástek. Proto je důležité, aby výrobci pájecích strojů umožnili

regulaci proudění, nejlépe pro každý pájecí program separátně. Toho dosahují buď skupinovým řízením ventilátorů pomocí frekvenčních měničů nebo řídí každou topnou zónu zvlášť pomocí tzv. EC motorů, tedy elektronicky řízených motorů. Tyto jsou schopné dávat i zpětnou informaci o svém chodu, stavu svých komponent (např. z pohledu vibrací apod.), o své teplotě. Tím se dostáváme na další stupeň řízení, tzv. Průmysl 4.0. Predikce údržby podle konkrétního vytížení a zatížení, statistika celého procesu je tak na mnohem vyšší úrovni, než tomu bylo dosud.

V dnešních pájecích zařízeních je nejčastěji přenos tepla realizován pomocí proudění horkého plynu přes děrovanou desku ve směru kolmém k pájenému výrobku. Geometrie a vzdálenost zmíněné desky potom určuje m.j. účinnost přenosu tepla, tedy ovlivňuje zkoumaný koeficient přenosu tepla. Několik příkladů bude uvedeno dále v textu tohoto článku.

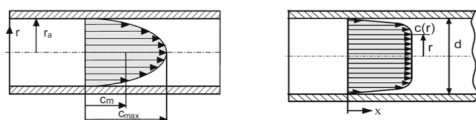
### KOEFICIENT PŘENOSU TEPLA

Od roku 2006 se direktivou EU zavedlo do výroby pájení s použitím bezolovnatých slitin. To se vyznačuje především vyššími procesními teplotami oproti dřívějším metodám pájení. Vzhledem ke stavbě a materiálům některých součástek se tyto již nachází na hranic svého fyzikálního použití. Například elektrolytické kondenzátory mívaly bod

varu použitého elektrolytu v oblasti kolem 215°C. Pokud tedy při pájecím procesu používáme teploty přes 235°C, je to již překročení vhodných podmínek pro dané součástky. I jiné typy součástek jsou velmi blízko svých teplotních limitů. Takzvané procesní okno se použitím bezolovnatých pájek velmi zmenšilo. Musíme se takříkajíc "vejít" do teplot potřebných pro správné tavení použité slitiny (hlavně z hlediska smáčivosti) a zároveň nepřekročit hraniční hodnoty použitých součástek nebo alespoň zkrátit toto překročení na minimum. Samozřejmě vyšší teploty znamenají také vyšší příkon strojů, tedy vyšší náklady na energii. Pokud se podaří vlastní přenos tepla udělat efektivnějším, při stejném nebo menším příkonu bude možné zvládnout celý pájecí proces v rámci požadované specifikace. Specifikace, kterou určují výrobci součástek a pájecích slitin.

Cílem mojí práce je nepřímé změření a porovnání koeficientu přenosu tepla v závislosti na konstrukci a konfiguraci topné zóny toho kterého pájecího stroje. Neomezuje se pouze na jednoho výrobce, ale klade si za cíl nezávislé porovnání účinnosti použité metody ve spojení s konkrétním strojem.

Jak již bylo vzpomenuto, zásadní vliv na účinnost přenosu tepla proudícím plynem má skutečnost, zda se jedná o laminární nebo turbulentní proudění - viz následující obr. 1.



Obr. 1 - Laminární vs. turbulentní proudění [4]

Koeficient přenosu tepla se dá popsat rovnicí

$$\frac{dQ}{dt} = F_c = \alpha_K \cdot A \cdot (T_o(t) - T_p(t)) \quad (1) [1]$$

kde A je plocha tělesa (výrobku), t je čas,  $\alpha$  je koeficient přenosu tepla,  $T_o$  je teplota uvnitř pájecího stroje (pece) a  $T_p$  je teplota zkoumaného výrobku.

Koeficient přenosu tepla je velmi komplexní parametr, který závisím m.j. na hustotě použitého média, rychlosti proudění a vlastnostech povrchu, který ohříváme. Např. rozdíl v přenosu tepla pro různě světlé povrchy je znám velmi dobře z doby, kdy se používal ohřev pomocí infrazářičů. Tam byl ten vliv odrazivosti povrchu velmi znát. Zatímco světlá součástka se sotva nahřála na pájecí teplotu, tmavá součástka byla již přehřátá či, v nejhorsím případě, byla už poškozená teplem. Podobný efekt se projevuje i při pájení pomocí vynucené konvekce. Naštěstí ne v takovém velkém rozsahu. I tak rozdíl teploty mezi světlým a tmavým prvkem může dosáhnout 3K!

Jak bylo uvedeno, intenzita přenosu tepla závisí i na hustotě použitého média. Proto také hodnota koeficientu přenosu tepla pro pájení v parách (samostatná technologie na principu konvekce) dosahuje několikanásobku hodnoty známé z pájení horkým plynem.

Pro nejčastěji používané pájení přetavením pomocí proudícího vzduchu nebo dusíku dosahujeme hodnoty  $25 - 70 \frac{W}{m^2K}$ . Pro pájení pomocí galdenu (perfluoropolyeteru) ale dosahujeme podstatně vyšší účinnosti, tam se pohybujeme v rozsahu až do  $300 \frac{W}{m^2K}$ .

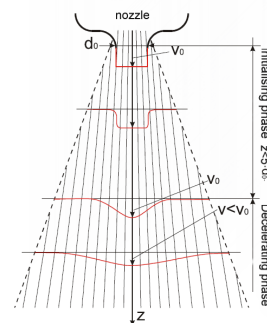
Pokud si pro zjednodušení v procesu pájení některé parametry nahradíme konstantou, můžeme rovnici (1) upravit použitím tzv. hmotnostního toku na tvar

$$q_m = \int_A \rho \cdot v \cdot dA \quad (2)$$

v je rychlost proudění,  $\rho$  hustota média, A plocha. V minulosti docházelo k pokusům vyjádřit koeficient přenosu tepla jednoduchou rovnicí. Následující tvar rovnice je odvozen empiricky na základě měření. Rozhodně není úplně jednoduchý a hlavně funguje jen v úzkém rozsahu stabilních parametrů. Vlivem změny teploty se změní např. i hustota použitého média a celá rovnice se tím pádem stane nepřesnou.

$$\alpha = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \left(\frac{D}{l}\right)^2} \cdot \left(1 - 2,2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \left(\frac{D}{l}\right)^2}\right)}{1 + 0,2 \cdot \left(\frac{H}{D} - 6\right) \cdot \sqrt{\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \left(\frac{D}{l}\right)^2}} \cdot Re^{\frac{2}{3}} \cdot Pr^{0,42} \cdot \left[1 + \left(\frac{\frac{H}{d}}{0,6 \sqrt{\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \left(\frac{D}{l}\right)^2}}\right)^6\right]^{-0,05} \quad (3) [1]$$

Jednotlivé prvky rovnice v podstatě popisují mechanickou stavbu děrované desky, kterou proudí horký plyn, který nahřívá výrobek a zajišťuje tak dosažení potřebného pájecího profilu. V úvahu se bere průměr děr, jejich osová vzdálenost, vzdálenost od výrobku, započtení Prandtlůva a Reynoldsova podobnostního čísla (speciální, poměrná čísla, užívaná např. při konstrukci letadel apod.), viz obr. 2.



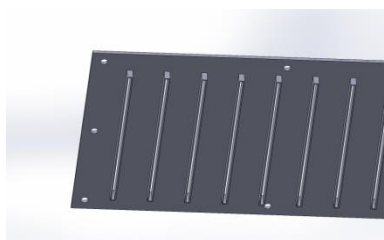
Obr. 2 - Schematické znázornění proudění plynu z jedné trysky [1]

Proud horkého plynu prochází dvěma základními stádii. Do vzdálenosti cca 5 x d, kde d je průměr otvoru v desce, přes kterou proudí plyn, mluvíme o fázi inicializační. V ní se rychlost proudění v podstatě nemění a zůstává stejná v celém průřezu. Postupně dochází k rozdělení tohoto hlavního proudu a mluvíme o fázi zbrzdování.

V praxi to může potom vypadat tak, že u použitého průměru 4,5mm prochází pásmo inicializační do vzdálenosti cca 22mm od topné zóny (její rozdělovací desky).

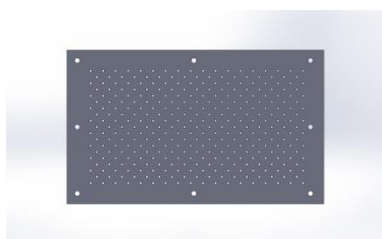
Hustota plynu se mění s teplotou a to tak, že v rozsahu teplot od 100°C do 200°C se změnila hustota až o 8%, což, pochopitelně, má vliv na přesnost výpočtů např. s použitím rovnice (3). Samozřejmě se mění hustota hlavně ve směru svislé osy Z, v osách x a y podstatně méně. Nejen hustota média je limitujícím prvkem pro přesný výpočet koeficientu přenosu tepla. Neméně důležitým prvkem pro měření je mechanická a teplotní setrvačnost systému. Otázka jak moc to ovlivní vlastní pájecí proces je stále otevřená a je předmětem mnoha zkoumání.

Výrobci pájecích pecí se snaží designem procesních komor dosáhnout co nejlepšího přenosu tepla na výrobek. Někdo volí řešení příčných slotů, viz obr. 3,



Obr. 3 - Příčné sloty pro přenos tepla z topné zóny na výrobek

jiný dává přednost řešení s děrovanou deskou, osázenou maticí zahlužených otvorů, viz obr. 4.



Obr. 4 - Řešení rozdělení proudícího plynu děrovanou deskou

Samostatnou kapitolou je vnitřní stavba jednotlivých topných zón, která musí zajistit důkladné promíchání ohřátého plynu (vzduchu, dusíku) tak, aby přes výše uvedené děrované desky šlo teplo co možná nerovnoměrněji k výrobku, který je třeba zapájet. Stabilita profilování, i v příčném směru, má významný vliv na kvalitu pájení a zabrání některým negativním jevům, jako např. thombstone efektu. K tomu dochází buď nevhodnou geometrií

součástky, špatně provedeným procesem sítotisku nebo nerovnoměrným ohřevem.

## ZÁVĚR

Spočítat koeficient přenosu tepla matematickými metodami je možné, ale vzhledem k dynamicky se měnícímu procesu je přesnost značně problematická, jak ukazuje i stručný popis faktorů vlivu. Nejčastěji se koeficient zjišťuje pomocí měření, kdy se ohřívá mechanický prvek (kostička kovu apod.) a koeficient přenosu tepla se vyhodnocuje z chování celého systému. Výsledkem je průměrná hodnota za celou dobu měření.

Důležitým prvkem výše uvedených testů a měření je měření průtoku plynu směrem k výrobku. Tento proud ovlivňuje zásadním způsobem přenos tepla.

Dalším krokem mé práce je návrh a stavba měřicího přípravku, který tato měření umožní provádět za reálné situace, průchodem pájecím zařízením za podmínek, které jsou nastavené pro pájení. Tedy za teplot, přesahujících 230°C. Návrh byl již proveden a v současné době probíhá stavba prototypu. Vlastní měřicí prvek je odladěn a připravený k použití.

Cílem práce bude porovnat různé typy děrovaných polí (desek) a posouzení jejich vlivu na uvedený koeficient přenosu tepla. Vzhledem k nastupujícímu "zelenému údělu" (Green Deal) je to aktuálnější, než kdy předtím. Nárůstem cen energií tyto snahy určitě ještě posílí. Snaha o optimalizaci spotřeby pro pájení, tento jeden z významných výrobních procesů, nabyde velké důležitosti.

## LITERATURA

- [1] Illés, P., Harsányi, G.: Thermal characterization of solid structures during forced convection heating, University of electronics technology, Budapest, Hungary, 2011
- [2] Rehm Thermal Systems, firemní prezentace a výsledky měření
- [3] Bell, H.: Fundamentals of reflow soldering, part 1, Fundamentals of materials technology in the field of soldering, Rehm Thermal Systems, Germany, 2010, interní dokument firmy Rehm
- [4] Bell, H.: Fundamentals of reflow soldering, part 2, Reflow soldering methods Rehm Thermal Systems, Germany, 2012, interní dokument firmy Rehm
- [5] <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=26>
- [6] Szendiuch, I.: Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů. Brno, VUTIUM, 2006. 379 s., ISBN 80-214-3292-6.E.