

**Proiectarea pentru fabricație –
Design for manufacturing****2.5. Cum lipim robotizat componentele cu montare pe suprafață? Tehnologia de lipire pe suprafață****Tehnologia de lipire prin retopire (*reflow/double reflow soldering*)**

Tehnologia de lipire prin retopire (*reflow/double reflow soldering*) este cel mai răspândit mijloc de asamblare a componentelor cu montare pe suprafață (SMD), pe una sau ambele fețe ale plăcilor cu cablaj imprimat (PCB). Deoarece această tehnologie este dedicată asamblării componentelor SMD, se mai numește tehnologie de montare pe suprafață (*surface mount technology - SMT*). În principiu constă în depunerea (*printing*) pastei de lipit (*solder paste*) pe suprafețele neprotejate ale circuitelor imprimate de pe suprafețele plăcilor, corespunzătoare terminalelor (*pad*), plantarea precisă a componentelor cu terminale pe paduri și lipirea printr-un proces de retopire (*reflow/double reflow soldering - process*). Retopirea se realizează într-un cuptor specializat SMT (*SMT oven/reflow oven*) care conține mai multe zone în care poate fi controlată precis temperatura, dintre care minim 3 zone pentru încălzire și una sau mai multe pentru răcire. Prin cuptor plăcile plantate sunt transportate cu un sistem tip conveyor a cărui viteză de deplasare poate fi controlată. Pasta de lipire este o suspensie de pudră din aliaj de lipit într-o masă lichidă de flux cu vâscozitate ridicată. În cursul procesului de retopire particulele de aliaj se topesc între suprafețele terminalelor componentelor și a padurilor, unde că rezultat al răcirii, aliajul topit formează, prin solidificare, lipitura.

Tehnologia de lipire prin retopire poate fi utilizată pentru asamblarea componentelor cu terminale prin gaură (*pin in paste*). În acest scop se depune pasta pe o suprafață care include gaura, padul corespunzător și în exteriorul padului, pe o suprafață care să asigure volumul necesar pentru realizarea lipiturii (*over print*). Componenta se plantează prin gaurile corespunzătoare și este introdusă în cuptor unde va fi supusă procesului de lipire prin retopire. Pentru acest tip de lipire componentele trebuie să îndeplinească restricții privind temperatura maximă admisibilă.

Linia tehnologică de lipire prin retopire este utilizată pentru lipirea cu adeziv epoxidic a componentelor SMD pe partea inferioară a plăcilor ce urmează să fie lipite în val. În acest caz se utilizează mașina și tehnologia pentru depunerea pastei de lipire, cu dispozitive adaptate, înlocuindu-se pasta cu adeziv. Adezivul se depune într-o geometrie specifică în spațiul dintre paduri, sub componente. Componentele sunt plantate în aceleași condiții ca la plantarea în pastă și apoi plăcile având componentele plantate în adeziv sunt trecute prin cuptorul SMT unde are loc lipirea printr-un proces de polimerizare a adezivului în condiții de temperatură controlată.

Fața de tehnologia de lipire în val, tehnologia de lipire prin retopire oferă avantaje, de exemplu:

- permite asamblarea a unor componente mici și ușoare, oferind astfel posibilități de miniaturizare a echipamentelor electronice;
- permite asamblarea ambelor fețe ale plăcilor electronice automat, utilizând aceeași tehnologie;
- permite reducerea rezistenței conexiunilor și a inductanțelor parazite, controlul asupra parametrilor electrice ai circuitelor, cu implicații benefice privind realizarea echipamentelor electronice pentru înaltă frecvență;
- permite compensarea unor erori de plantare prin proprietatea de alinare a componentelor relativ la paduri datorită acțiunii tensiunii superficiale a pastei de lipit în stare lichidă;
- reducerea numărului de gauri în placă, implicit a complexității operațiunilor de prelucrare mecanică;
- permite obținerea unui comportament performant în raport cu solicitările mecano-climatice, ceea ce, alături de performanțele privind miniaturizarea, a extins aria de utilizare a echipamentelor electronice în domenii speciale ca de exemplu, auto, aviație, rachete;
- permite automatizarea completă a liniilor de producție.

Principalele dezavantaje sunt un rezultat direct al tendinței de miniaturizare și automatizare:

- dificultatea manipulării manuale a componentelor;
- dificultatea operațiunilor de lipire manuală;
- dificultatea operațiunilor de reparare la nivel de circuite și componente.

Fazele specifice tehnologiei de lipire prin retopire (depunerea pastei, plantarea componentelor și lipirea prin retopire) sunt realizate cu mașini specializate. Utilizarea unui sistem de transport comun tip conveyor pentru conectarea unei mașini pentru depunerea pastei pe suprafața plăcilor (*printer*), a unor mașini de plantare componente (*pick and place*), a unui cuptor SMT și a unor sisteme de alimentare

Proiectarea pentru fabricație – Design for manufacturing

cu plăci a printerului și de colectare a plăcilor asamblate la ieșirea din cuptor, permite configurarea unei linii tehnologice de lipire prin retopire a componentelor cu montare pe suprafață. La configurarea liniei se are în vedere numărul mare de componente pasive de mici dimensiuni (*chip*) în raport cu cele active. Pentru a asigura productivitatea liniei se utilizează minim două mașini de plantare, una fiind specializată pentru plantarea componentelor *chip*.



Fig. 2.5.1. Depunerea pastei

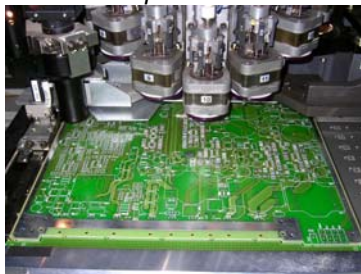


Fig. 2.5.2. Plantare componente



Fig. 2.5.3. Cuptor SMT

Fazele tehnologiei de lipire prin retopire, parametrii și variabile specifice

Fazele tehnologiei de lipire prin retopire, depunerea pastei, plantarea componentelor și lipirea, presupun o sumă de operații complexe astfel încât putem considera fiecare fază ca un proces complex, independent.

Depunerea pastei de lipit sau a adezivului

Sunt două moduri de lucru pentru mașinile de printare:

- independente (*off-line*), în cazul producției de serie mică și prototipuri;
- integrate într-o linie (*in-line*) de producție automatizată specific producției de serie medie și mare.

Procesul de depunere a pastei de lipit pe linia SMT este foarte important din punct de vedere al calității produsului final. Se consideră că aproximativ 70% din totalul defectelor înregistrate la asamblarea plăcilor pe linia SMT provin din procesul de printare. Pentru eliminarea lor este necesar să fie sub control parametrii și variabilele procesului. Pentru realizarea unui proces optim de depunere a pastei se prevede inspectia optică finală:

- manuală, executată de operator prin observare directă sau cu ajutorul unor instrumente optice

- automată, executată cu echipamente specializate integrate în structura liniei SMT.

Depunerea pastei de lipit pe suprafața padurilor se poate face prin următoarele metode:

- dispensare (*dispenser*). Distribuția pastei se face într-un număr variabil de picături, funcție de dimensiunea padului, prin utilizarea unui dispozitiv tip seringă, pasta având proprietăți reologice dedicate. Metoda poate fi utilizată prin montarea dispozitivului în mașina de plantare componente și prezintă avantajul costurilor reduse, deoarece nu necesită dispozitive auxiliare. Metoda nu poate fi utilizată pentru componente mici, deoarece volumul de pastă depus nu poate fi controlat suficient de precis și trebuie luat în considerare prețul pastei speciale, mai mare în raport cu cel al pastei pentru site și șabloane.

- serigrafie (*screen*). Metoda presupune utilizarea unei site din material textil special pe care se realizează prin metode fotografice mascarea cu excepția zonelor prin care se depune pasta prin întindere cu o lama de cauciuc. Se utilizează o mașină care să mențină sita la o înălțime determinată în raport cu suprafața plăcii. Costurile de fabricație sunt reduse, însă metoda nu permite utilizarea pe scară largă și precizia realizată este limitată.

- cu șablon (*stencil*). Metoda presupune utilizarea unui șablon realizat din metal în general, dar poate fi realizat și din plastic. În șablon sunt practicate deschideri corespunzătoare padurilor componentelor. Șabloanele realizate din plastic au o rezistență mecanică redusă și necesită măsuri de evitare a încărcării electrostatice. Pentru șabloanele din metal, pot fi utilizate tehnologiile de corodare chimică (fig. 2.5.4), taiere laser (fig. 2.5.5) sau electroformare (fig. 2.5.6).

Proiectarea pentru fabricație –
Design for manufacturing

Fig. 2.5.4. Corodare



Fig. 2.5.5. Electroformare



Fig. 2.5.6. Taiere Laser

Sabloanele realizate prin corodare prezintă în secțiune o reducere în plan median cu rezultate negative în procesul de depunere a pastei (fig. 2.5.4; fig. 2.5.7). Se poate obține o finisare superioară a pereților prin polizare electrochimică (fig. 2.5.8). Secțiunea optimă pentru șabloane este trapezoidală și poate fi obținută prin electroformare și tăiere cu laser (fig. 2.5.9).

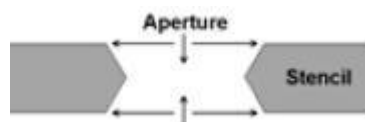


Fig. 2.5.7. Corodare

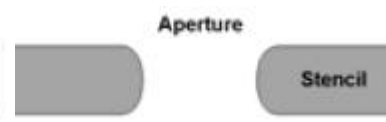


Fig. 2.5.8. Electropolizare

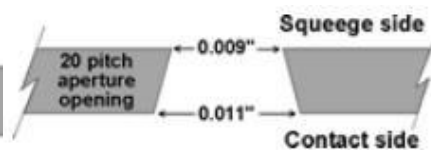


Fig. 2.5.9. Secțiune trapezoidală

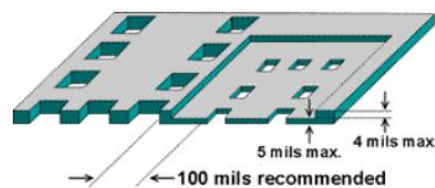


Fig. 2.5.10. Șablon în trepte

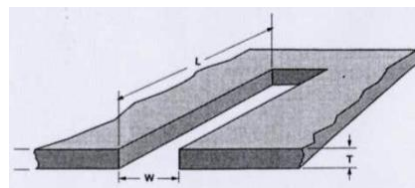


Fig. 2.5.11. Geometria deschiderii

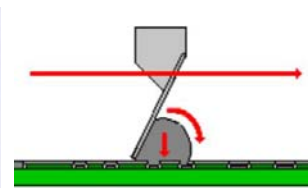


Fig. 2.5.12. Depunerea pastei

Prin corodare și electroformare se pot fabrica șabloane în trepte (fig. 2.5.10.) utile în situația unei mari diferențe de gabarit între componente și, în consecință, cu diferențe mari între suprafețele padurilor. Aceste diferențe fac dificilă depunerea optimă a pastei și o sită realizată în trepte poate oferi soluția optimă necesară pentru suprafețele mari cât și pentru cele mici, în condiția proiectării specifice pentru placa cu circuite imprimate.

Sabloanele tăiate laser sunt singurele care pot fi prelucrate ulterior pentru adăugarea sau mărirea unor deschideri, permit prelucrarea pe mașini la care datele pot fi transferate electronic, asigurându-se precizie și repetabilitate. Grosimea șabloanelor este între 100 - 200μm. Există posibilitate de fabricație mixta prin prelucrare laser a unor șabloane prefabricate prin corodare.

Pentru depunerea optimă a pastei este importantă relația între geometria padului și geometria deschiderii șablonului (fig. 2.5.11), datorită forțelor de tensiune superficială care apar la suprafețele de separare pad - șablon. Forța de tensiune superficială a pastei din deschidere trebuie să fie mai mare decât tensiunea superficială a pastei relativ la pereții deschiderii. La depunerea pastei prin utilizarea șabloanelor metalice, putem identifica trei etape. Într-o primă etapă pasta este transportată cu ajutorul unei lame metalice (*squeegee* - fig. 2.5.1) poziționate cu un unghi determinat fix, între 45 - 50° sau cu o casetă specială umplută cu pastă (*pro flow*). Mișcarea de transport imprimată de lamă sau casetă, determină formarea unui cilindru de pastă (interior în cazul casetei), ce are o mișcare de rotație în timp ce este deplasat pe suprafața șablonului (fig. 2.5.12). Diametrul optim pentru cilindru de pastă este de 15 - 20mm. În cursul etapei de transport, pasta umple deschiderile șablonului, ajungând în contact cu suprafața padului. Pasta va fi complet depusă în etapa următoare, de separare a șablonului de suprafața plăcii.

Conform IPC7525, se definesc coeficienții (fig. 2.5.11) Raport de Aspect (*Aspect Ratio*) și Raportul de Arie (*Area Ratio*):

$$\text{Raportul de Aspect} = \text{lățimea deschiderii/grosime șablon} = W / T$$

$$\text{Raportul de Arie} = \text{Aria deschiderii/aria pereților laterali ai deschiderii} = L \times W / 2 \times (L+W) \times T$$

Proiectarea pentru fabricație – Design for manufacturing

Pentru o depunere a pastei se recomandă: Raportul de Aspect > 1.5 și Raportul de Arie > 0.66 . Etapa finală a procesului este curățirea suprafeței inferioare a șablonului.

Procesul de depunere a adezivului este identic cu procesul de depunere a pastei. Deosebirile le găsim în geometria diferită a deschiderilor. În general sunt deschideri relativ mari care nu ridică probleme de depunere.

Parametri și variabilele procesului de depunere a pastei (adezivului)

Pentru obținerea unei depuneri optime a pastei pe placă se definesc următorii parametri:

- limita pentru coborârea lamei sau casetei (*Squeegee down stop*), previne o deplasare suplimentară în jos care ar putea avea ca efect uzura prematură a lamei și a șablonului. Poate avea ca efect și curbarea ansamblului sită - placă în timpul procesului. Este o limită mecanică reglabilă astfel încât lama sau caseta doar să atingă suprafața șablonului. Se urmărește asigurarea paralelismului între axa lamei sau casetei și suprafața șablonului.

- presiunea pe lamă (*Squeegee Pressure*) trebuie să asigure răzuirea șablonului și preluarea completă a pastei de pe suprafața sa. Corect reglată va asigura în spate un film fin de flux pe suprafața șablonului provenit din pastă.

Valoarea efectivă este determinată de tipul șablonului și de viteza de printare. Domeniul optim de valori se situează între 0.2 - 0.3 kg/cmp.

- viteza de printare (*Printing speed*) este dependentă de comportamentul pastei și poate fi între 20 și 80 mm/sec.

- distanța dintre suprafața inferioară a șablonului și suprafața superioară a plăcii (*Snap off*). Pentru șablon de metal este zero. Poate fi între 0.5 și 3.0 mm în cazul utilizării metodei serigrafice.

- viteza de separare șablon - placă (*Separation speed*), se situează între 0.1 și 0.5 mm și depinde de caracteristicile reologice ale pastei și caracteristicile geometrice ale deschiderilor șablonului. O valoare mare are ca efect ridicarea marginilor depozitului de pastă în timp ce o valoare prea mică încetinește procesul.

- înălțimea de separare (*Separation height*) este distanța de la suprafața plăcii până la care se ridică șablonul. Este în medie 3mm.

- aria efectivă de printare (*Printing area*), este suprafața șablonului pe care se poate asigura transportul pastei prin mișcarea circulară a cilindrului de pastă. Mișcarea lamei trebuie să înceapă cu 80 - 100 mm sau cu de două ori diametrul cilindrului de pastă, înainte de a întâlni prima deschidere a șablonului.

- curățirea suprafeței inferioare a șablonului (*Stencil cleaning*), în general, dacă toți parametrii de depunere a pastei sunt corect reglați, nu ar fi necesară. În practică este prevăzută curățirea manuală sau automată prin utilizarea unei hârtii speciale cu precauții pentru a nu lăsa scame.

Procesul de plantare componente

Plantarea componentelor se poate face manual sau automat, cu mașini specializate. Tendința generală de miniaturizare impune sisteme optice axiliare și pentru plantarea manuală. Actualele mașini de plantare tind către o viteză de plantare de 0.05 secunde/componentă în condiții de precizie a poziției sub 100μm. Pentru componente tip 0201, precizia de poziționare necesară este de 75 μm. Pentru asigurarea preciziei de plantare este necesară calibrarea mașinilor și o metoda de verificare a performanțelor mașinii. Pentru determinarea și evaluarea stabilității preciziei de plantare se utilizează testul de capacitate a mașinii (*Machine Capability Test - MCT*). În cadrul testului se măsoară deviația standard și deviația valorii medii în raport cu valoarea normală dată pentru mașină prin plantarea unor componente de sticlă marcate cu repere grafice pe o placă suport din sticlă prevăzută cu o folie dublu adezivă. Se măsoară coordonatele componentelor plantate și se calculează deviațiile de poziționare. În fig. 2.5.13. sunt reprezentate grafic rezultatele unui test MCT pentru deviația standad $\sigma = 8 \mu\text{m}$ și diferența de plantare $\mu = 6 \mu\text{m}$.

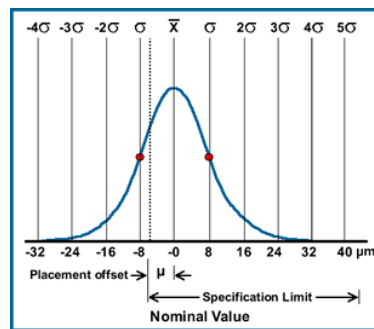
Proiectarea pentru fabricație –
Design for manufacturing

Fig.2.5.13. MCT

În practică se utilizează la lansarea unui produs plantarea de test a componentelor reale pe placa produsului prevăzută cu o folie dublu adezivă în scopul verificării corectitudinii programului de plantare și a preciziei de poziționare.

Procesul de lipire prin retopire

Procesul de lipire prin retopire are loc în cuptorul SMT structurat pe zone funcționale de preîncălzire, activare, retopire și răcire. Sunt utilizate mai multe soluții tehnice de obținere a temperaturii înalte necesare procesului, cu radiație infraroșie (IR), prin convecție cu aer sau gaz inert încălzit la temperatura necesară procesului sau prin utilizarea vaporizării unui lichid cu punct de fierbere ridicat, metodă denumită retopire în fază de vapori (*vapor phase reflow* sau *vapor phase soldering - VPS*). Metodele ce utilizează convecția sau vaporizarea prezintă dezavantajul „umbririi” relative între componentele cu diferențe mari de gabarit, fenomen care are drept consecință diferențe mari de temperaturi. SMEA (*Surface Mount Equipment Manufacturers Association*), a stabilit trei clase de sisteme ce utilizează IR:

- sistem radiant dominant (Class I IR);
- combinație între convecție și sistem radiant dominant (Class II IR);
- sistem convecție dominant (Class III IR)

Indiferent de sistemul utilizat temperatura pe zone permite activarea fluxului și în final lipirea prin asigurarea stării lichide pentru pasta depusă între terminalele componentelor și paduri asigurând lipirea prin solidificare la răcire. Parametrii procesului sunt reprezentați grafic în fig. 2.5.14.a, b.

În zona de preîncălzire (*Preheat Zone*), placa este încălzită cu o pantă de creștere temperaturii între $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ și $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ pe secunda, pentru egalizarea temperaturii plăcii în scopul evitării șocului termic. O creștere prea accentuată a temperaturii poate provoca împrăștierea pastei și distrugerea componentelor prin șoc termic. O pantă prea redusă de creștere a temperaturii afectează eliminarea prin vaporizare a solventului din pastă și reduce activarea chimică a pastei.

Zona următoare, de înmuiere a bilelor de aliaj din pastă (*Thermal Soak Zone*), asigură uniformizarea temperaturii în placă și componente. Temperatura este crescută cu o pantă foarte redusă, aproape plată, aproape de punctul de topire a bilelor de aliaj din structura pastei. Solvenții fluxului sunt eliminați, este activată pasta, care începe să elimine oxizii de pe suprafața padurilor și terminalelor. În această zonă placa este menținută între 60 și 120 secunde. În scopul asigurării unui control foarte precis pe această secțiune a procesului se folosesc mai multe zone dedicate.

Zonele de preîncălzire și de înmuiere sunt specifice cuptoarelor care utilizează radiația infraroșie.

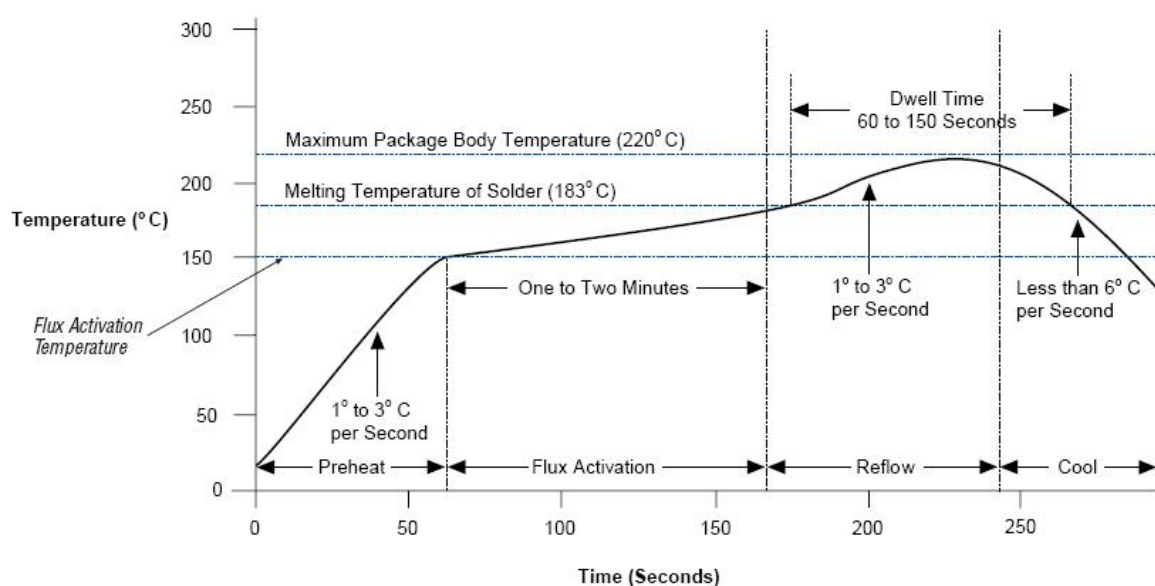
Zona de retopire (*Reflow Zone*) asigură și menține temperatura necesară stării lichide a aliajului din pastă. Fluxul activ chimic, reduce tensiunea superficială la jonctiunea dintre metalele din compoziția terminalelor și a padurilor permitând lipirea. Zona se mai numește și durata stării lichide pentru aliajul de lipit (*time above reflow* sau *time above liquidus - TAL*). Se recomandă pentru TAL între 30 și 60 secunde. O durată mică poate genera lipituri reci și discontinuități în structura lipiturilor (*void*), iar o durată prea mare poate provoca distrugerea unor componente.

Zona de răcire (*Cooling zone*) este folosită pentru solidificarea lipiturilor. O pantă accentuată de scădere a temperaturii optimizează structura lipiturii, blochează formarea stratului intermetalic în structură și asigură creșterea rezistenței lipiturii la solicitări mecanice în timp. Temperatura în zona de răcire este în domeniul $30\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

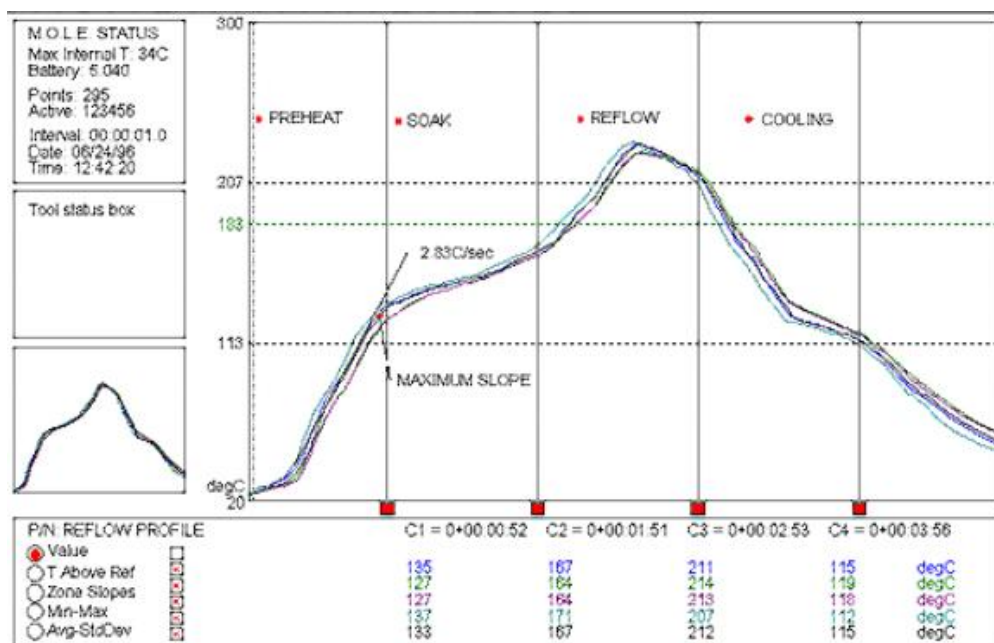
Proiectarea pentru fabricație – Design for manufacturing

Funcționarea automată a cuptorului astfel încât să asigure desfasurarea procesului de lipire prin retopire conform cerințelor pe zone cu posibilitatea de reglare a parametrilor este asigurată de un calculator de proces. Acesta va urmări realizarea temperaturilor și duratelor pe zone prin controlul încălzirii, a ventilației și a vitezei conveierului conform unei reprezentări grafice numită profil termic (*thermal profile* sau *solder profile*, fig. 2.5.14.a, b.).

Profilul termic depinde de pasta utilizată, atmosfera în care are loc procesul, masa termică și tehnologia de realizare a plăcii plantate ce urmează să fie lipită. Pentru reglarea precisă a profilului termic funcție de variabilele prezentate, în mod specific produsului ce urmează să fie lansat în producție, se utilizează un dispozitiv specializat (*profiler*) de achiziție a temperaturilor măsurate cu termocuple amplasate în diferite zone pe placă. Dispozitivul urmează placa pe traseul urmat în cuptor și transmite radio datele privind temperaturile măsurate către o interfață specializată conectată la un calculator în scopul afișării și înregistrării rezultatelor. Metoda este iterativă și funcție de experiența operatorului, plecând de la un profil propus, prin câteva iterații, în cursul cărora se ridică profilul termic real al plăcii și se inspectează calitatea lipiturilor optic și radiologic cu radiații X, se stabilește profilul termic optim pentru producția de serie.



a



b.

Fig. 2.5.14. a. b. Profil termic standard

**Proiectarea pentru fabricație –
Design for manufacturing****Defecte specifice tehnologiei de lipire prin retopire**1. Bile de aliaj (Solder ball)

Pot apărea langa pad (Solder balling) datorită excesului de pastă, între paduri (Mid chip balling) sau împrăstiate (Spattering) datorită oxidării particulelor din pastă sau datorită explozii solventului din pastă.

2. Filamente (Wiskers)

Apar în special la padurile acoperite cu staniu pur.

3. Udare redusă (Poor wetting/de-wetting)

Apare datorită suprafețelor oxidate pe paduri, oxidării padurilor înainte de topirea aliajului.

4. Lipiura rece (Cold joint)

Apare datorită temperaturii coborâte în faza de retopire.

5. Discontinuitati in structura lipiturilor (voids)

Apare datorită unei durate reduse a aliajului în stare lichidă ce nu poate elimina fluxul rămas în aliajul topit.

Modificari în procesul de lipire prin retopire determinate de utilizarea aliajelor fără plumb

Profilul termic prezentat în fig. 2.5.14. a. se modifică conform recomandărilor IPC / JEDEC prin standardul comun J-STD-020C, pentru a putea asigura temperatura crescută, până la 250 °C, necesară realizării lipirii componentelor în procesul de retopire. Procesul a necesitat tipuri noi de paste, mai active chimic. Temperatura ridicată afectează plăcile cu cablaj imprimat și componentele electronice în cursul procesului de lipire prin retopire.

Lead-Free Reflow Profile Recommendation (IPC/JEDEC J-STD-020C)	
Reflow Parameter	Lead-Free Assembly
Minimum preheat temperature ($T_{S_{MIN}}$)	150°C
Maximum preheat temperature ($T_{S_{MAX}}$)	200°C
Preheat Time	60-180 seconds
$T_{S_{MAX}}$ to T_L ramp-up rate	3°C/second maximum
Time above temperature T_L (t_L)	217°C 60-120 seconds
Peak Temperature (T_P)	
Time 25°C to T_P	6 minute maximum
Time within 5° of Peak T_P	10-20 seconds
Ramp-down rate	4°C/second maximum

Tab. 2.5.1. Parametrii profilului termic fără plumb

Lead-Free Process - Peak Reflow Temperatures (TP)			
Package Thickness	Volume mm3 < 350	Volume mm3 350-2000	Volume mm3 > 2000
< 1.6 mm	260°C	260°C	260°C
1.6mm-2.55mm	260°C	250°C	245°C
>2.5mm	250°C	245°C	245°C

Tab. 2.5.2. Valoile recomandate pentru temperatura de vârf specifică procesului de retopire fără plumb