

อิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ In ต่อจุด
หลอมเหลว ความสามารถในการพิมพ์ และความสามารถในการ
เปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305
Effects of Mn-Doped TiO₂ and in Nanoparticles on Melting
Point, Printability, and Wettability of SAC305
Lead-Free Solder Paste

วันยุทธ สุวรรณเครือ¹ ประธาน บุรณศิริ² กรรณชัย กัลยาศิริ¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

²ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ และ In ต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการพิมพ์ และความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 บนแผ่นรองทองแดง สำหรับส่วนผสมของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มโดยกลุ่มแรกจะผสม Mn-doped TiO₂ ในอัตราส่วน 0.05 wt%, 0.1 wt%, 0.5 wt% และ 1 wt% และในกลุ่มที่สองจะผสม In ที่มีอัตราส่วน 0.5 wt% ลงในแต่ละส่วนผสมของกลุ่มแรก โดยจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีถูกทดสอบด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) และความสามารถในการพิมพ์ศึกษาจากการวัดอัตราส่วนของน้ำหนักโลหะบัดกรีหลังดึงแม่พิมพ์ออกเทียบกับน้ำหนักของโลหะบัดกรีก่อนดึงแม่พิมพ์ออก โดยโลหะบัดกรีในแต่ละส่วนผสมทำการบัดกรีด้วยวิธี Reflow ที่อุณหภูมิ 260 °C เป็นเวลา 30 วินาที ซึ่งหลังการบัดกรีความสามารถในการเปียกของแต่ละชิ้นงานจะถูกศึกษาในรูปแบบของ Spread ratio, Spread factor และ Contact angle จากผลการศึกษาพบว่า Solidus temperature และ Liquidus temperature ของโลหะบัดกรีที่ผสมอนุภาคนาโนมีอุณหภูมิต่ำกว่าโลหะบัดกรี SAC305 อย่างไรก็ตามพบว่าช่วงอุณหภูมิการหลอมของโลหะบัดกรีที่ผสมอนุภาคนาโนมีค่าที่สูงกว่าโลหะบัดกรี SAC305 ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นเมื่อมีอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ ผสมอยู่ในปริมาณน้อยๆ แต่เมื่อปริมาณ Mn-doped TiO₂ เพิ่มมากขึ้นทำให้ความสามารถในการเปียกมีค่าที่ลดลง และพบว่าเมื่อทำการผสม In ร่วมกับ Mn-doped TiO₂ ลงในโลหะบัดกรีทำให้ความสามารถในการเปียกมีค่าที่ต่ำกว่าในกรณีที่ผสมเฉพาะ Mn-doped TiO₂ โดยความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรีมีค่าลดลงเมื่อทำการเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO₂

คำสำคัญ : โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว อนุภาคนาโน ความสามารถในการเปียก ความสามารถในการพิมพ์

Abstract

Effects of Mn-doped TiO_2 and In nanoparticles on melting point, printability, and wettability of SAC305 lead-free solder pastes on Cu substrate were investigated in this paper. The composite solders were divided into two groups. The first one was prepared by adding 0.05, 0.1, 0.5, and 1.0 wt% of Mn-doped TiO_2 and the second one was included additional indium of 0.5 wt% to the first group. The melting characteristic of solder was characterized by differential scanning calorimeter (DSC). The printability was measured by the weight ratio of solder, before and after printing the solder on Cu substrate. The solder was reflowed in a reflow oven at 260°C for 30 seconds. The wettability was investigated in the terms of spread ratio, spread factor, and contact angle. It was found that liquidus temperature and solidus temperature of nano-composite solder were lower than those of SAC305. However, the melting range of nano-composite solder was greater than that of SAC305. The wettability of solder was improved by the addition of small amount of Mn-doped TiO_2 and the wettability was then decreased as the amount of Mn-doped TiO_2 increased. The addition of indium decreased the wettability of composite solder. The printability of solder was decreased due to the addition of Mn-doped TiO_2 and indium.

Keywords : Lead-free solder, Nanoparticle, Wettability, Printability

1. บทนำ

คณะกรรมการการยุโรปหรืออีซี (EC-European commission) ได้กำหนดให้ตะกั่วเป็นสารต้องห้ามตามระเบียบ RoHS หรือ Restriction of Hazardous Substance [1] จากกฎข้อบังคับดังกล่าวจึงส่งผลให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องปรับตัวโดยการนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมาใช้ทดแทนโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมที่มีส่วนผสมของสารตะกั่ว ซึ่งในช่วงที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วขึ้นมาหลายกลุ่มเพื่อใช้แทนโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิมซึ่งกลุ่มของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คือ โลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Ag-Cu (SAC) [2, 3] เพราะมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดี และมีความแข็งแรงของรอยบัดกรีสูง [4, 5] อย่างไรก็ตามโลหะบัดกรี SAC305 ยังมีข้อด้อยในด้านของจุดหลอมเหลว ($216-221^\circ\text{C}$) ที่สูงกว่าโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม คือ Sn-Pb eutectic ที่มีจุดหลอมเหลว 183°C [6] และคุณสมบัติทางกลที่ดีน้อยกว่าโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม

[7, 8] ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเพื่อให้มีคุณสมบัติที่พ้องเทียบกับโลหะบัดกรีแบบดั้งเดิม ซึ่งจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการเติม In ลงในโลหะบัดกรีทำให้อุณหภูมิจุดหลอมเหลวนี้น่าลดลง [9] นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมอนุภาคนาโนลงในโลหะบัดกรีทำให้ความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีมีค่าที่ดีขึ้น และช่วยในการลดขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเมื่อทำการบัดกรี [10,11]

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 และ In ต่อจุดหลอมเหลว ความสามารถในการพิมพ์ และความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วแบบครีม SAC305 บนแผ่นรองทองแดง ซึ่งอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 เป็นอนุภาคชนิดใหม่ที่คาดว่าจะช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรีบนแผ่นรองทองแดงได้เนื่องจาก Mn ในปริมาณน้อยๆสามารถละลายในทองแดงได้ดี [12, 13] และคาดว่า การเติม In จะสามารถช่วยลดจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีได้

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

สำหรับส่วนผสมของโลหะบัดกรีจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มโดยกลุ่มแรกเป็นโลหะบัดกรี Sn96.5Ag3.0Cu0.5 (SAC305) ผสม Mn-doped TiO_2 ความบริสุทธิ์ 99 % ในปริมาณ 0.05 wt%, 0.1 wt%, 0.5 wt% และ 1 wt% ขณะที่กลุ่มที่สองผสม In ความบริสุทธิ์ 99.99 % ยี่ห้อ ALDRICH ในปริมาณ 0.5 wt% ลงในแต่ละส่วนผสมของกลุ่มที่หนึ่งโดยผสมด้วยวิธีทางกลเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้อนุภาคนาโนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโลหะบัดกรี ในการบัดกรีใช้แผ่นทองแดงความบริสุทธิ์ 99.99% ขนาด 30 mm x 30 mm x 0.35 mm โลหะบัดกรีที่ผสมกันอย่างสมบูรณ์แล้วจะถูกนำมาพิมพ์บนแผ่นทองแดงด้วยแม่พิมพ์เพื่อให้ได้ชิ้นงานทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 mm สูง 1.24 mm ตามมาตรฐาน JIS Z3198-3:2003 ชิ้นงานในแต่ละส่วนผสมทำการบัดกรีด้วยวิธี Reflow ที่อุณหภูมิ 260°C เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง และทำการทดลองส่วนผสมละ 3 ชิ้นงานเพื่อหาค่าเฉลี่ยสำหรับการคำนวณ

2.1 การทดสอบจุดหลอมเหลว

จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีในแต่ละส่วนผสมถูกทดสอบด้วยเครื่อง DSC รุ่น NETZSCH DSC 204 การทดสอบจะทดสอบภายใต้บรรยากาศ N_2 ชิ้นงานในการทดสอบแต่ละชิ้นมีน้ำหนักประมาณ 8 mg ซึ่งอัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 10 °C/min โดยเริ่มจากอุณหภูมิตั้งต้นที่ 25 °C จนถึง 350 °C

2.2 การวัดความสามารถในการเปียก

ความสามารถในการเปียกจะถูกศึกษาในรูปแบบ Spread ratio, Spread factor และ Contact angle การหาค่า Spread ratio (S_r) สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$S_r = \frac{A_1}{A_0} \quad (1)$$

เมื่อ A_1 คือ พื้นที่การกระจายตัวของโลหะบัดกรีบนแผ่นทองแดง และ A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของโลหะบัดกรี

ก่อนการบัดกรี และค่า Spread factor (S_p) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2

$$S_p = \frac{D - H}{D} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ H คือความสูงของโลหะบัดกรีหลังจากเย็นตัว และ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะบัดกรีหลังจากเย็นตัว เช่นเดียวกับการค่า Contact angle (θ) สามารถหาได้จากสมการที่ 3

$$\theta = \arcsin \left(\frac{\frac{2}{\frac{D}{2H} + \frac{2H}{D}}}{\frac{D}{2H} + \frac{2H}{D}} \right) \quad (3)$$

โดยตัวแปรต่างๆสามารถหาได้จากภาพถ่ายของโลหะบัดกรีหลังการเย็นตัวผ่านโปรแกรม Image pro express และความสูงของโลหะบัดกรีสามารถวัดได้โดยไมโครมิเตอร์

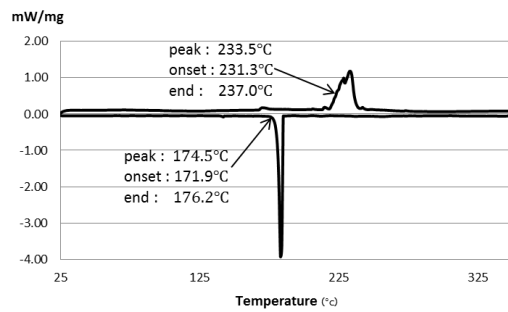
2.3 การวัดความสามารถในการพิมพ์

การวัดความสามารถในการพิมพ์สามารถวัดได้จากน้ำหนักของโลหะบัดกรีหลังดึงแม่พิมพ์ออกเทียบกับน้ำหนักของโลหะบัดกรีก่อนดึงแม่พิมพ์ออกซึ่งการวัดความสามารถในการพิมพ์จะทำการทดลองก่อนการบัดกรี

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการทดสอบจุดหลอมเหลว

ผลการทดสอบจุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรี SAC305 โดย DSC แสดงดังรูปที่ 1 พบว่ามีค่าพลังงานแบบดูดความร้อนสูงสุด (Endothermic peak) ที่อุณหภูมิ 233.5 °C และมีค่าพลังงานแบบคายความร้อนสูงสุด (Exothermic peak) ที่อุณหภูมิ 174.5 °C จากรูปทำให้ทราบถึง Solidus temperature (T_s), Liquidus temperature (T_L) และช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว (ΔT) ของโลหะบัดกรี SAC305 โดยอุณหภูมิที่จุด Onset ของโลหะบัดกรีขณะดูดความร้อนคือ T_s อุณหภูมิที่จุด End ของโลหะบัดกรีขณะดูดความร้อนคือ T_L และช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวคือ $T_L - T_s$



รูปที่ 1. ผล DSC ของโลหะบัดกรี SAC305

จากผล DSC ของโลหะบัดกรีในแต่ละส่วนผสมสามารถนำมาแสดงค่า T_s , T_L , และ ΔT ดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่า T_s ของโลหะบัดกรีที่ผสม Mn-doped TiO_2 ในปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt% มีค่าต่ำกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 4.3, 11.3, 14.3 และ 13.6°C ตามลำดับ ขณะที่การเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO_2 ในปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt% มีค่าต่ำกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 9.4, 8.9, 11.2 และ 11.1°C ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าการเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO_2 สามารถช่วยลด T_s ของโลหะบัดกรีพื้นฐานได้มากกว่ากรณีที่ผสมเฉพาะ Mn-doped TiO_2 ในปริมาณ 0.05 wt% เท่านั้น ขณะที่ T_L ของโลหะบัดกรีที่ผสม Mn-doped TiO_2 ในปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt% มีค่าต่ำกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 2.2, 0.3, 1.8 และ 2.7°C ตามลำดับ ขณะที่การเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO_2 ในปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt% มีค่าต่ำกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 5.5, 6.3, 4.4 และ 2.1°C ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าการเติม In สามารถช่วยลด T_L ของโลหะบัดกรีที่ผสม Mn-doped TiO_2 ในปริมาณ 0.05, 0.1 และ 0.5 wt% ได้มากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมอนุภาคนาโนลงในโลหะบัดกรีส่งผลให้ ΔT มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเติม Mn-doped TiO_2 ในปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt% พบว่า ΔT มีค่าสูงกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 2.1, 10.2, 12.5 และ 10.9°C ตามลำดับ ขณะที่การเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO_2 ในปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt% พบว่า ΔT มีค่าสูงกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 3.9, 2.6, 6.8 และ 9°C ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อ Mn-doped TiO_2 มีปริมาณมากกว่า 0.05 % การผสม Mn-doped TiO_2 ร่วมกับ In สามารถช่วยลด ΔT ได้มากกว่าการเติม Mn-doped TiO_2 เพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 1 อุณหภูมิการหลอมเหลวของโลหะบัดกรี

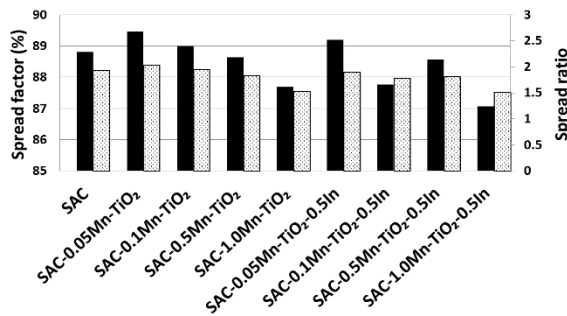
ชิ้นงาน	$T_s(^{\circ}\text{C})$	$T_L(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$
SAC305	231.3	237.0	5.7
SAC305-0.05Mn-TiO ₂	227.0	234.8	7.8
SAC305-0.1Mn-TiO ₂	220.8	236.7	15.9
SAC305-0.5Mn-TiO ₂	217.0	235.2	18.2
SAC305-1.0Mn-TiO ₂	217.7	234.3	16.6
SAC305-0.05Mn-TiO ₂ -0.5In	221.9	231.5	9.6
SAC305-0.1Mn-TiO ₂ -0.5In	222.4	230.7	8.3
SAC305-0.5Mn-TiO ₂ -0.5In	220.1	232.6	12.5
SAC305-1.0Mn-TiO ₂ -0.5In	220.2	234.9	14.7

3.2 ผลการทดสอบความสามารถในการเปียก

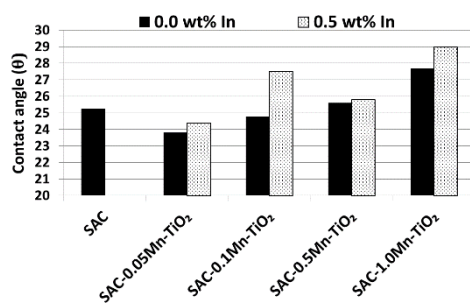
สำหรับโลหะบัดกรีที่มีความสามารถในการเปียกที่ดีควรมีค่าการกระจายตัวสูง โดย Spread factor (S_f) และ Spread ratio (S_r) จะต้องมีค่ามากในขณะที่มุมสัมผัส Contact angle (θ) จะต้องมีค่าน้อย ซึ่งจากผลการทดลองจากรูปที่ 2 และ 3 พบว่าเมื่ออนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 ที่เติมลงในโลหะบัดกรีมีปริมาณ 0.05 และ 0.1wt% ทำให้ S_f มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 0.66 และ 0.2 % ตามลำดับ เช่นเดียวกับ S_r ที่มีค่าเพิ่มขึ้น 0.11 และ 0.02 ตามลำดับ ขณะที่มุมสัมผัสมีขนาดลดลง 1.43 และ 0.45° องศา ตามลำดับ และเมื่อปริมาณอนุภาคนาโนเพิ่มขึ้นเป็น 0.5-1 wt% ทำให้ S_f และ S_r มีค่าต่ำกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 0.17-1.12 % และ 0.1-0.4 ตามลำดับ ขณะที่มุมสัมผัสมีขนาดเพิ่มขึ้น 0.36-2.44 องศา ซึ่งเห็นได้ว่าการกระจายตัวมีค่าสูงสุดเมื่อผสม Mn-doped TiO_2 ในปริมาณ 0.05 wt% ขณะที่ Mn-doped TiO_2 ในโลหะบัดกรีมีมากกว่า 0.05 wt% พบว่าการกระจายตัวมีค่าลดลง และจากการเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO_2 ลงในโลหะบัดกรีพบว่าการกระจายตัวมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่ไม่ได้ผสม In โดยสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 3 ซึ่งมุมสัมผัสของกรณีที่เติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO_2 มีค่ามากกว่ากรณีที่เติมเฉพาะ Mn-doped TiO_2

การกระจายตัวที่ลดลงของโลหะบัดกรีเมื่อปริมาณอนุภาคนาโน Mn-doped TiO_2 ที่ผสมอยู่ในโลหะบัดกรีมีมากขึ้น หรือการกระจายตัวที่ลดลงจากการเติมอนุภาคนาโน In ร่วมกับ Mn-doped TiO_2 ลงในโลหะบัดกรีมีความเป็นไปได้จากการเพิ่มขึ้นของความหนืด เนื่องจากการมีอยู่

ของอนุภาคนาโนในโลหะบัดกรี [10,14] ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณอนุภาคนาโนจะไปยับยั้งการไหลของโลหะบัดกรีเชิงประกอบนาโนขณะหลอมบนแผ่นทองแดง โดยการยับยั้งการไหลของโลหะบัดกรีขณะหลอมทำให้มุมสัมผัสมีค่าที่มากขึ้น หรือมีการกระจายตัวที่ลดลง



รูปที่ 2. การกระจายตัวของโลหะบัดกรี

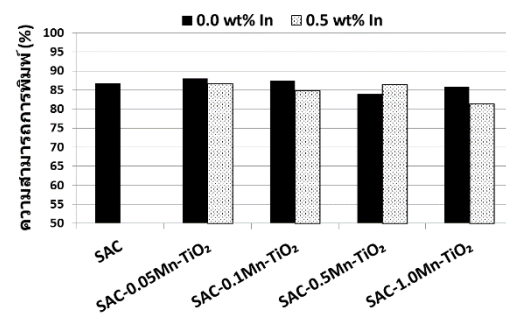


รูปที่ 3. มุมสัมผัสของโลหะบัดกรี

3.3 ผลการทดสอบความสามารถในการพิมพ์

โลหะบัดกรีที่มีความสามารถในการพิมพ์ที่ดีควรพิมพ์ติดกับแผ่นรองได้ตามปริมาตรของแม่พิมพ์ และไม่ควรรีได้รับผลกระทบจาก Wall-slip effect ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อทำการดึงแม่พิมพ์ออกจากแท่นพิมพ์ ซึ่งขณะดึงแม่พิมพ์ออกจะมีโลหะบัดกรีบางส่วนติดไปกับแม่พิมพ์ ส่งผลให้ความสามารถในการพิมพ์มีค่าลดลง [15] จากผลการทดลองในรูปที่ 4 พบว่าเมื่อเติม Mn-doped TiO₂ ปริมาณ 0.05 และ 0.1 wt% ทำให้อาณาการพิมพ์มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน 1.28 และ 0.63 % ตามลำดับ และเมื่อปริมาณของ Mn-doped TiO₂ มีมากกว่า 0.1 wt% หรือเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO₂ ในปริมาณ

0.05, 0.1, 0.5 และ 1 wt% พบว่าความสามารถการพิมพ์มีค่าต่ำกว่า 86.79 % ซึ่งเป็นค่าความสามารถการพิมพ์ของโลหะบัดกรีพื้นฐาน โดยในงานวิจัยของ Liu et al. [16] ที่ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโน SAC ในโลหะบัดกรี Sn-Bi พบว่าเมื่ออนุภาคนาโนในโลหะบัดกรีมีปริมาณมากจะส่งผลให้ความหนืดของโลหะบัดกรีมีมากขึ้นทำให้ความสามารถในการพิมพ์มีค่าลดลง



รูปที่ 4. ความสามารถในการพิมพ์ของโลหะบัดกรี

4. สรุปผล

จากผลการวิจัยพบว่า การเติมอนุภาคนาโน Mn-doped TiO₂ หรือ In ร่วมกับ Mn-doped TiO₂ สามารถช่วยลด T_s และ T_L ของโลหะบัดกรี SAC305 อย่างไรก็ดีตามการเติมอนุภาคนาโนลงโลหะบัดกรีส่งผลให้ ΔT ของโลหะบัดกรีมีค่าที่สูงขึ้น โดยความสามารถในการเปียกของโลหะบัดกรี SAC305 ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นเมื่อเติม Mn-doped TiO₂ ในปริมาณ 0.05 และ 0.1 wt% และเติม In ร่วมกับ Mn-doped TiO₂ ในปริมาณ 0.05 wt% ขณะที่ความสามารถการพิมพ์ของโลหะบัดกรีพื้นฐานถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นเมื่อมี Mn-doped TiO₂ ปริมาณ 0.05 และ 0.1 wt% โดยจากผลการทดสอบการเติม Mn-doped TiO₂ ในปริมาณ 0.05 wt% มีความเหมาะสมในการใช้งานมากที่สุดเนื่องจากมีค่าสามารถเปียก และความสามารถในการพิมพ์ที่สูงที่สุด ขณะที่ T_s และ T_L มีค่าต่ำกว่าโลหะบัดกรีพื้นฐาน และมี ΔT ต่ำที่สุดเมื่อทำการเติมอนุภาคนาโน

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] E. Bradley, C. A. Handwerker, J. Bath, R. D. Parker, and R. W. Geaney, "Lead-free electronics iNEMI Projects lead to successful manufacturing," Wiley-IEEE Press, United State of America, 2007
- [2] M. Abtew, and G. Selvaduray, "Lead-free solder in microelectronic," Materials Science & Engineering R: Reports, vol. 27, pp. 95-141, 2000.
- [3] R. Mahmudi, and S. Mahin-Shirazi, "Effect of Sb addition on tensile deformation behavior of lead-free Sn-3.5Ag solder alloy," Materials and Design, vol. 32, pp. 5027-5032, 2011.
- [4] H. Conrad, Z. Guo, Y. Fahmy, and D. I. Yang, "Influence of microstructure size on the plastic deformation kinetics, fatigue crack growth rate, and low-cycle fatigue of solder joint," Journal of Electronic Materials, vol. 28, pp. 1062-1070, 1999.
- [5] J. L. Marshall, J. Calderon, J. Sees, G. Lucey, and J. S. Hwang, "Composite solder," IEEE Transaction on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, vol. 14, pp. 698-702, 1991.
- [6] Z. Moser, P. Sebo, W. Gasior, P. Svec, and J. Pstrus, "Effect of indium on wettability of Sn-Ag-Cu solders," Experiment vs Modeling Part I, CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry, vol. 33, pp. 63-68, 2009.
- [7] H. S. Betrabet, S. M. McGee, and J. K. McKinlay, "Processing dispersion-strengthened Sn-Pb solder to achieve microstructural refinement and stability," Scripta Metallurgica et Materialia, vol. 25, pp. 2323-2328, 1991.
- [8] H. Mavoori, and S. Jin, "New, creep-resistant, low melting point solder with ultrafine oxide dispersions," Journal of Electronic Materials, vol. 27, pp. 1216-1222, 1998.
- [9] K. Kanlayasiri, T. Ariga, and M. Ongkolwongrojn, "Influence of indium addition on characteristics of Sn-0.3Ag-0.7Cu solder alloy," Journal of Alloys and Compounds, vol. 485, pp. 225-239, 2009.
- [10] S. M. L. Nai, J. Wei, and M. Gupta, "Influence of ceramic reinforcements on the wettability and mechanical properties of novel lead-free solder composites," Tin Soild Films, vol. 504, pp. 401-404, 2006.
- [11] S. M. L. Nai, J. Wei, and M. Gupta, "Improving the performance of lead-free solder reinforced with multi-walled carbon nanotubes," Materials. Science and Engineering: A, vol. 423, pp. 166-169, 2006.
- [12] T. B. Massalski, Binary alloy phase diagram, 2nd Edition, ASM International, Materials Park, 1990.
- [13] A. J. Boesenberg, I. E. Anderson, and J. L. Harringa, "Development of Sn-Ag-Cu-X solder for electronic assembly by micro-alloying with Al," Journal of Electronic Materials, vol. 41, pp. 1868-1881, 2012.
- [14] R. Ashayer, S. H. Mannan, S. Sajjadi, M.P. Clode, and M. M. Miodownik, "Nanoparticle enhanced solders for high temperature environments," 9th Electronics packaging technology conference, Singapore, pp. 109-113, 2007.
- [15] S. Mallik, N. N. Ekere, R. Durairaj, A. E. Marks, and A. Seman, "Wall-slip effects in SnAgCu solder pastes used in electronics assembly applications," Materials and Design, vol. 30, pp. 4502-4506, 2009.
- [16] J. Liu, Y.L. Gao, and Q. J. Zhai, "Recent development of nano-solder paste for electroincs interconnect applications," Electronics Packaging Technology Conference, pp. 84-93, 2008.