

บทที่ 2

ทฤษฎีและทบทวนเอกสารวิชาการ

บทนี้กล่าวถึงข้อมูลเกี่ยวกับโลหะวิทยาเบื้องต้นสำหรับโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงและการศึกษาถึงงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะผสมเงิน โดยเฉพาะสมบัติทางกลและทางเคมี โดยการเจือด้วยธาตุชนิดต่างๆ

2.1 โลหะวิทยาเบื้องต้นของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิง

โลหะเงินบริสุทธิ์มีความแข็งแรงต่ำ เป็นโลหะที่มีสมบัติในการสะท้อนแสงได้สูงถึง 95% จึงทำให้ผิวโลหะหลังการขัดมีลักษณะมันวาว ทั้งยังมีความอ่อนตัว สามารถถักเป็นเส้นและขึ้นรูปได้ดี แต่เนื่องจากโลหะเงินบริสุทธิ์นั้นมีความอ่อนตัวมาก ไม่มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะทำเป็นเครื่องประดับ จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะผสมเงินให้เหมาะกับการผลิตเครื่องประดับมากขึ้น วิธีการที่นิยมมากที่สุดคือการผสมธาตุอื่นๆ ในขั้นตอนการหลอมโลหะเพื่อให้เกิดเป็นโลหะผสมเงิน (silver alloy) ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลดีกว่าโลหะเงินบริสุทธิ์ (fine silver) โลหะผสมเงินที่ยอมรับโดยทั่วไปทางการค้า ต้องมีปริมาณเงินผสมอย่างน้อย 92.5 wt% และนิยมเจือด้วยทองแดง (Cu) 7.5 wt% เนื่องจากเป็นโลหะที่ราคาไม่สูงมากนักและสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการขึ้นรูปให้กับโลหะเงินซึ่งเรียกว่า เงินสเตอร์ลิง (sterling) นอกจากนี้ยังมีการเจือธาตุอื่นๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านต่างๆ เช่น การเจือสังกะสี (Zn) หรือฟอสฟอรัส (P) ในระหว่างการหลอมเงิน เพื่อช่วยกำจัดออกซิเจนในน้ำโลหะเหลว การปรับปรุงคุณสมบัติต่อการต้านทานการหมองโดยการเจือด้วย Ge และ Si และโลหะมีค่าอื่น ๆ เป็นต้น คุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางกลที่สำคัญของโลหะมีค่าและโลหะเจือที่นิยมใช้ผสมในการผลิตเครื่องประดับแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางกลของโลหะมีค่าและโลหะเจือสำหรับเครื่องประดับ (รวบรวมจาก http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page)

คุณสมบัติ	Ag	Au	Pt	Rh	Pd	Cu	Zn	Ge	Si
เลขอะตอม	47	79	78	45	46	29	30	32	14
โครงสร้างผลึก	FCC	FCC	FCC	FCC	FCC	FCC	Hexagonal	FCC	Diamond cubic
ความหนาแน่น (g/cm ³)	10.49	19.3	21.45	12.41	12.02	8.96	7.14	5.32	2.33
จุดหลอมเหลว (°C)	961.7	1064.2	1768.3	1964.0	1554.9	1084.6	419.5	938.2	1414.0
จุดเดือด (°C)	2162	2856	3825	3695	2963	2562	907	2833	3265
ความแข็งแรงวิกเกอร์ (MPa)	251	216	549	1246	461	369	-	-	-
ความแข็งสเกลโมห์	2.5	2.5	4-4.5	6.0	4.75	3.0	2.5	6.0	7
Young's modulus (GPa)	83	78	168	380	121	110-128	108	-	150

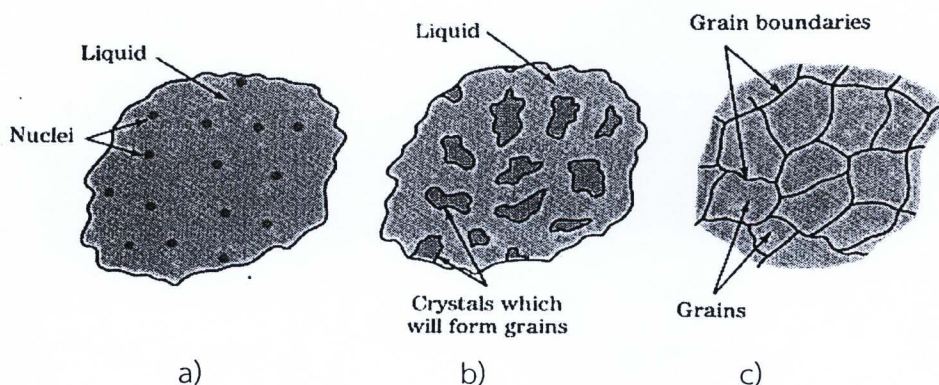
พิจารณาตารางที่ 2.1 โลหะมีค่าและโลหะที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเครื่องประดับนั้นมักจะมี ความหนาแน่นสูง คือ มีความหนาแน่นมากกว่า 10 g/cm^3 โดยจุดหลอมเหลวของเงิน ทองคำ และ ทองแดงมีขนาดใกล้เคียงกัน และมีโครงสร้างผลึกระบบเดียวกัน คือ FCC จึงทำให้โลหะกลุ่มนี้ สามารถเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (solid solution) อีกทั้งสามารถหลอมรวมกันง่าย ค่าความแข็ง และความต้านทานแรงดึง มีค่าค่อนข้างต่ำ ทำให้มีความสามารถขึ้นรูปได้ดี แต่ขณะเดียวกันโลหะมี ค่าจะมีความแข็งแรงต่ำทำให้เสียรูปทรงได้ง่าย การเพิ่มความแข็งแรงให้โลหะมีค่าจึงมีความจำ เป็นมาก โดยนอกจากปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการผสมทองแดงดังที่ได้กล่าวไปแล้ว กระบวนการอื่นๆ เช่น การเจือด้วยธาตุที่มีผลทำให้เกรนมีขนาดเล็กลง (grain refiner) การขึ้นรูปเย็น (cold hardening) และการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวิธีทางความร้อน (heat treatment) ก็เป็นวิธีการที่ สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิงได้เช่นกัน

2.1.1 การตกผลึกของโลหะ การเกิดเกรนและโครงสร้างเดนไดรต์

การเกิดเกรนในโลหะบริสุทธิ์ในสภาวะสมดุลย์

รูปที่ 2.1 แสดงกลไกการตกผลึกของโลหะและการเกิดเกรนในสภาวะที่โลหะบริสุทธิ์ แข็งตัว สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

- 1) การเกิดนิวเคลียส (nucleation) นิวเคลียสเหล่านี้จะมีความเสถียรเมื่อมีรัศมี นิวเคลียสมากกว่ารัศมีวิกฤต (critical radius, r^*) เท่านั้น
- 2) การโตของนิวเคลียสเป็นผลึก (crystal growth) นิวเคลียสจะโตขึ้นโดยขยายตัว ในทุกทิศทางภายในโลหะเหลว ผลึกจะโตขึ้นเรื่อยๆ จากการจับตัวกันเพิ่มขึ้น ของอะตอม ที่เข้าร่วมตัวกันตามรูปทรงของผลึกของโลหะนั้นๆ การรวมตัวกัน ของอะตอมจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อมๆกันกับการเย็นตัวของโลหะ
- 3) การเกิดเกรน (grains) ผลึกจะแผ่ขยายออกไปเรื่อยๆ การเจริญเติบโตของผลึก สิ้นสุดลงและโลหะก็จะแข็งตัวหมดพอดี ผลึกแต่ละผลึกจะมีขนาดไม่เท่ากัน เนื่องจากการเติบโตของผลึกแต่ละตัวเป็นอิสระไม่ขึ้นต่อกัน จากการที่ผลึกแต่ละผลึกไม่เท่ากันนี้เอง ทำให้มีลักษณะเป็นเส้นแบ่งเขตแดนของเกรนแต่ละเกรน ซึ่งเรียกว่าขอบเกรน (Grain Boundary) กั้นระหว่างเกรนแต่ละเกรน
- 4)

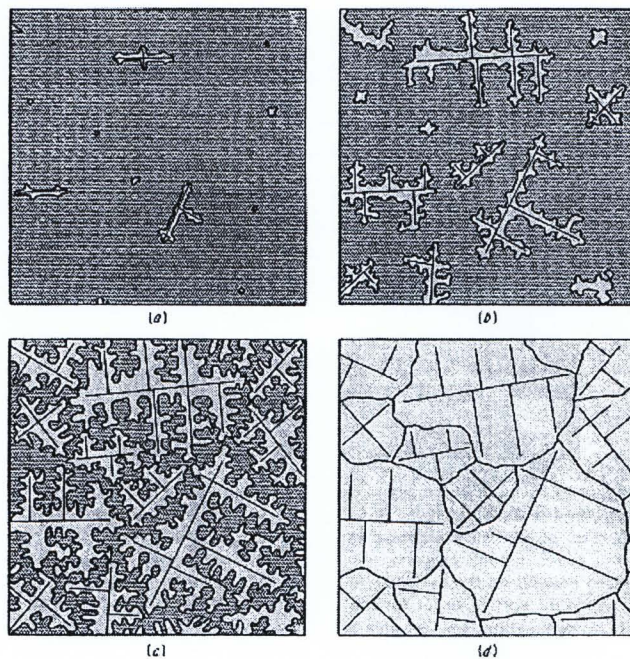


รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดเกรนในโลหะบริสุทธิ์ a) การเกิดนิวเคลียสในโลหะเหลว b) นิวเคลียสมีขนาด ใหญ่ขึ้นกลายเป็นผลึก และ c) ผลึกเชื่อมต่อกันกลายเป็นเกรน (Smith, 1993)

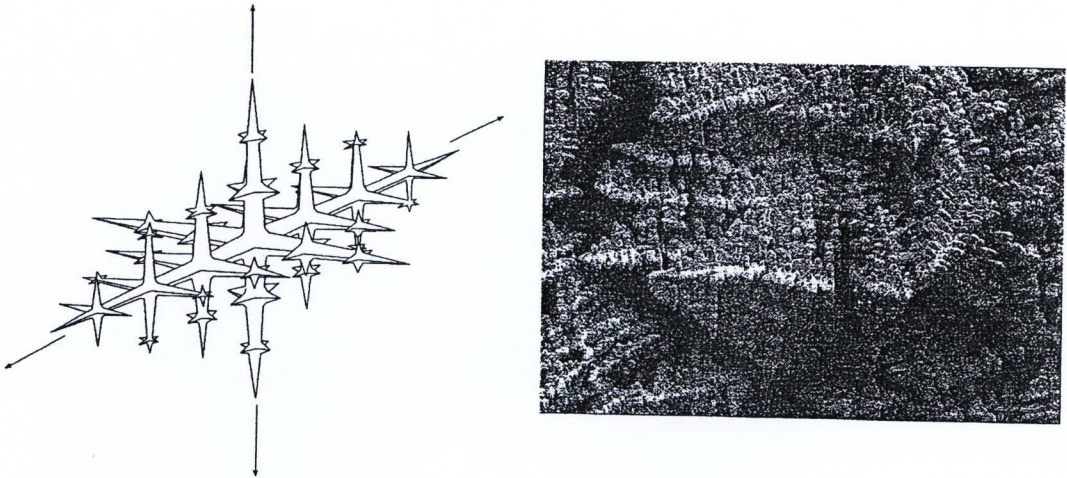
การเกิดเกรนของโลหะผสม

เนื่องจากในโลหะผสม (Alloy) ประกอบด้วยโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เช่นประกอบด้วยโลหะ A และ B ดังนั้นเมื่อโลหะ A และ B เริ่มแข็งตัว โลหะที่มีจุดหลอมตัวสูงกว่าย่อมแข็งตัวก่อน เมื่อโลหะที่มีจุดหลอมตัวสูงแข็งจับตัวเป็นเกรนหมดแล้ว โลหะที่มีจุดหลอมต่ำกว่าจึงเริ่มแข็งตัวบ้าง ดังนั้นเกรนที่เกิดขึ้นของโลหะผสมจึงเป็นเกรนของโลหะที่แตกต่างกัน บางเกรนอาจสลับกันอยู่บางเกรนอาจติดกันก็ได้ รูปแบบการจัดเรียงตัวไม่แน่นอน

ในขณะที่เกิดการเย็นตัวของโลหะ หากอุณหภูมิมีการลดลงอย่างช้าๆ (slow cooling) ผลึกจะมีการโตแบบผิวเรียบ (plana) มีความเสถียรและขยายตัวในทุกทิศทางอย่างสม่ำเสมอ แต่หากมีการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วในขณะที่เย็นตัว (fast cooling) จะเกิดโครงสร้างลักษณะแบบเดนไดรต์ (dendrite) มีโครงสร้างคล้ายต้นไม้ (tree-like structure) ซึ่งมักพบในโลหะผสมที่มีหลายเฟส (multiphase alloy) การเย็นตัวอย่างรวดเร็วนี้นำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของโลหะผสมที่อยู่บริเวณรอยต่อระหว่างผลึกของแข็งและน้ำโลหะเหลว การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นมีผลให้อุณหภูมิหลอมเหลวบริเวณรอยต่อสูงขึ้น เป็นการขัดขวางการเย็นตัวของโลหะในบริเวณนั้นๆ นอกจากนี้ ในระหว่างการแข็งตัวของโลหะจะมีการปล่อยพลังงาน จึงเป็นปัจจัยเสริมต่อการขัดขวางการแข็งตัวบริเวณผิวสัมผัสของรอยต่อ ในขณะที่บริเวณของโลหะหลอมซึ่งอยู่ไม่ห่างจากผิวสัมผัสเพียงเล็กน้อยมีอุณหภูมิต่ำกว่าและมีความเข้มข้นเหมาะสมต่อการแข็งตัวเป็นผลึกมากกว่า อีกทั้งบริเวณที่มีลักษณะเป็นปลายแหลมนั้นต้องการพลังงานในการเกิดผลึกน้อยกว่า จึงทำให้มีการเย็นตัวแบบมีทิศทางโครงสร้างเดนไดรต์ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสถานะของโลหะผสมจากโลหะเหลวเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ แสดงดังรูปที่ 2.2 แบบจำลองโครงสร้างเดนไดรต์ และภาพถ่ายโครงสร้างเดนไดรต์ที่เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของโลหะผสม Pt-4.8%Ru แสดงดังรูปที่ 2.3



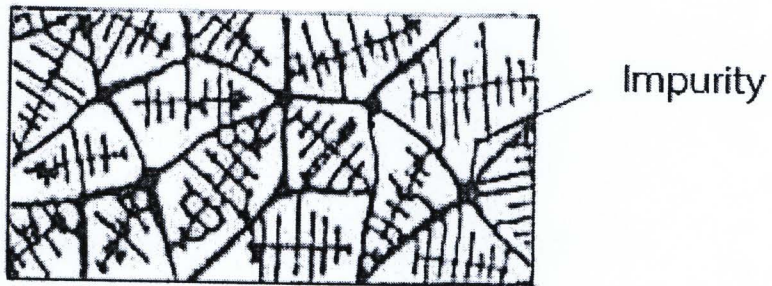
รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดโครงสร้างเดนไดรต์ในสภาวะการตกผลึกของโลหะ a) การก่อตัวของนิวเคลียส b) ผลึกขยายตัวเป็นเดนไดรต์ c) การโตของเดนไดรต์ และ d) เดนไดรต์ขยายตัวจนชนกันเกิดเป็น Grain Boundary



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงสถานะของโลหะผสม (Grimwade, 2009)

การแยกตัวของสารมลทิน (Segregation of Impurity)

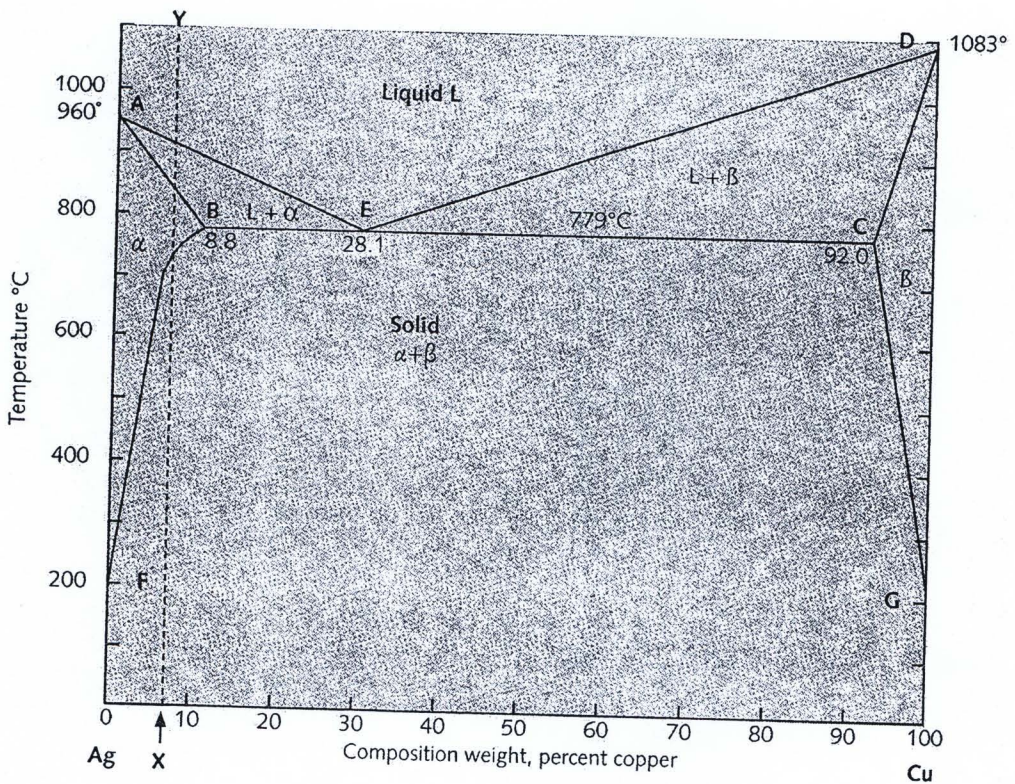
โลหะที่พบเห็นและนำมาใช้งานมักจะมีสิ่งอื่นๆเจือปนอยู่ด้วยเสมอ ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้เรียกว่า สารมลทิน (Impurity) สารมลทินเหล่านี้มักจะมีจุดหลอมต่ำกว่าเนื้อโลหะบริสุทธิ์นั้นๆ ดังนั้นในขณะที่โลหะแข็งตัวเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ อะตอมของโลหะจะเริ่มจับตัวก่อนเนื่องจากมีจุดหลอมตัวสูงกว่า เมื่อจับตัวใหญ่ขึ้นก็จะไล่พวกสารมลทินซึ่งยังหลอมเหลวอยู่ให้หนีออกไปจากบริเวณขอบผลึก ดังนั้นเมื่อโลหะแข็งตัวหมดสารมลทินจึงรวมกันอยู่บริเวณขอบเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการแยกตัวของสารมลทินออกจากผลึกโลหะ

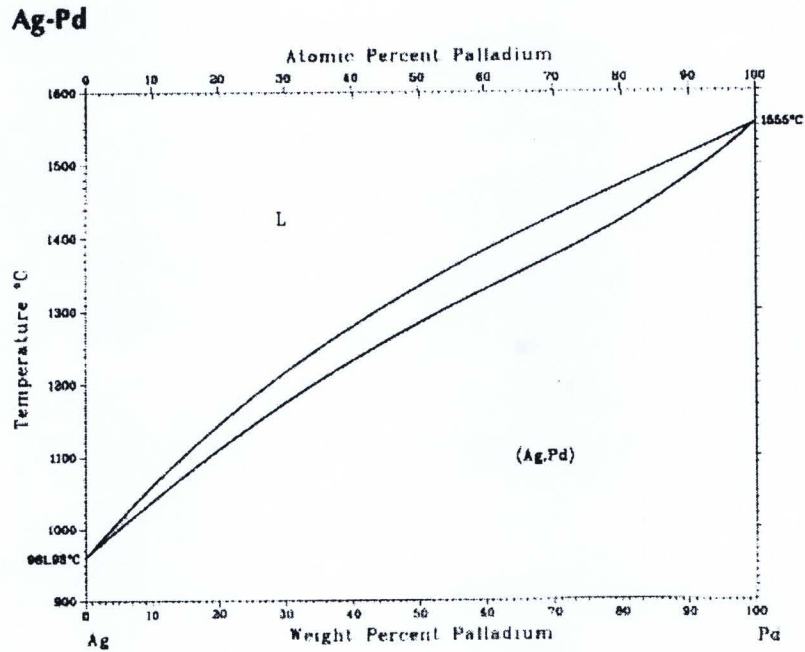
2.1.2 แผนภูมิสมมูลของโลหะผสมเงิน

พิจารณาแผนภูมิสมมูลของ Ag-Cu รูปที่ 2.5 อุณหภูมิหลอมเหลวของเงินบริสุทธิ์มีอุณหภูมิ 960°C และทองแดงบริสุทธิ์มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1083°C เมื่ออุณหภูมิของโลหะลดลง เฟสของแข็งจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าแนวเส้น liquidus AE และ ED และแข็งตัวสมบูรณ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าแนวเส้น solidus ABCE ที่ส่วนผสมของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงปริมาณทองแดง x (x มีปริมาณไม่เกิน 7.5 wt%) ที่อุณหภูมิระหว่าง 700-850°C โลหะผสมเงินนี้จะกลายเป็นสารละลายของแข็งเฟสเดียวคือเฟสที่มีปริมาณเงินสูงหรือเฟสอัลฟา (α -phase) และเมื่อเย็นตัวลงมาต่ำกว่าอุณหภูมิ 700°C จนถึงอุณหภูมิห้อง โครงสร้างของโลหะจะมี 2 เฟส อยู่รวมกัน คือเฟสอัลฟาและเฟสเบต้า ($\alpha+\beta$ -phase) ซึ่งเฟสเบต้า (β -phase) จัดเป็นสารละลายของแข็งที่มีปริมาณทองแดงสูง และเป็นเฟสที่สร้างความแข็งแรงให้กับสเตอร์ลิง ปริมาณสูงสุดของทองแดงที่สามารถละลายในเฟสอัลฟาได้คือ 8.8% ที่อุณหภูมิ 779°C โครงสร้างยูเทคติก (eutectic structure) ซึ่งเป็นเฟสที่มีความแข็งแรงสูง และสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่มีปริมาณทองแดง 28.1wt% ที่อุณหภูมิ 779°C อย่างไรก็ตาม การเกิดสารละลายของแข็งเฟสอัลฟาตามแนวเส้น ABF นั้นไม่สามารถเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (solid solution) ที่สมบูรณ์ถึงแม้ว่าเงินและทองแดงจะเป็นโลหะที่มีโครงสร้าง FCC เหมือนกัน เนื่องจากแลตทิซของเงินสามารถละลายทองแดงได้ในปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น การละลายเพียงบางส่วนนี้เรียกว่า partial solid solution (Grimwade, 2009)

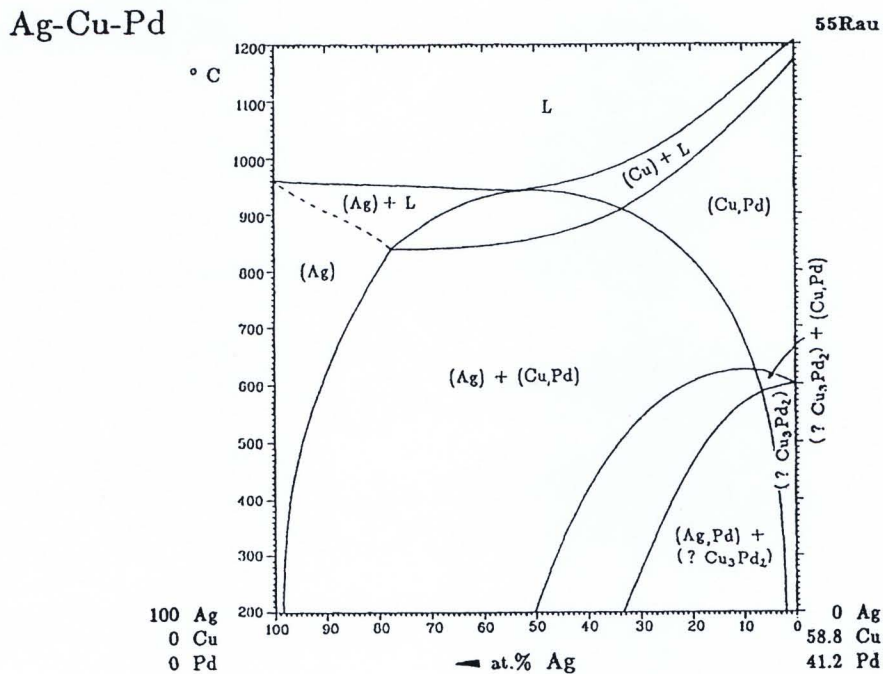


รูปที่ 2.5 แผนภูมิสมมูลของโลหะผสมเงินและทองแดง (Grimwade, 2009)

จากแผนภูมิสมมูลระบบ 2 องค์ประกอบของ Ag-Pd ในรูปที่ 2.6 พบว่าแพลเลเดียมที่ผสมในเงินนั้นไม่เกิดเป็นสารประกอบ แต่สามารถละลายเป็นสารละลายของแข็งอยู่ร่วมกับเงิน (Ag,Pd solid solution) ในทุกอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อพิจารณาแผนภูมิสมมูลระบบ 3 องค์ประกอบในระบบ Ag-Cu-Pd (รูปที่ 2.7) แพลเลเดียมในโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงจึงสามารถผสมอยู่ได้ทั้งในเฟสอัลฟาและเบต้า



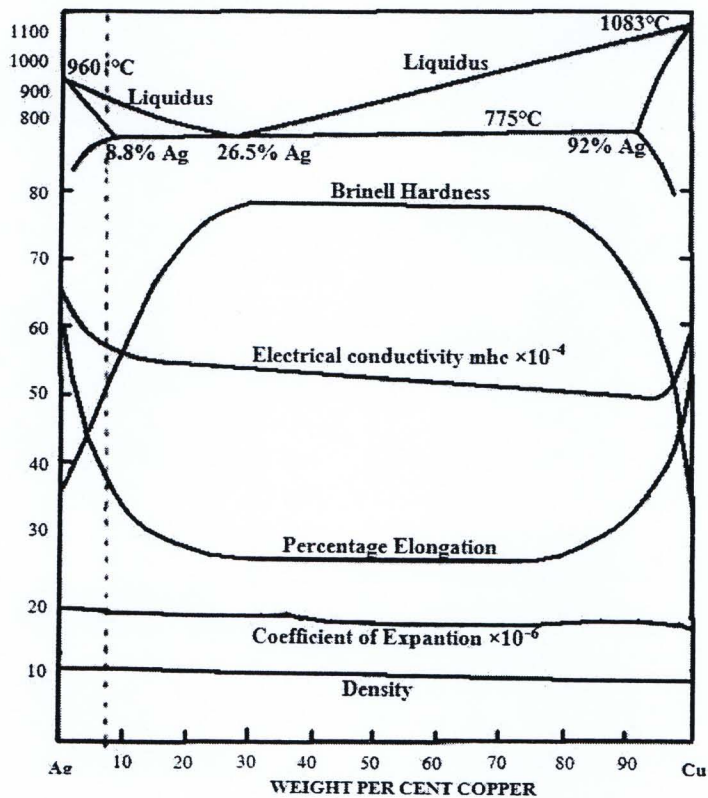
รูปที่ 2.6 แผนภูมิสมมูลของโลหะระบบ Ag-Cu (ASM Handbook, 1998)



รูปที่ 2.7 แผนภูมิสมมูลของโลหะระบบ Ag-Cu-Pd (ASM Handbook, 1995)

2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาค

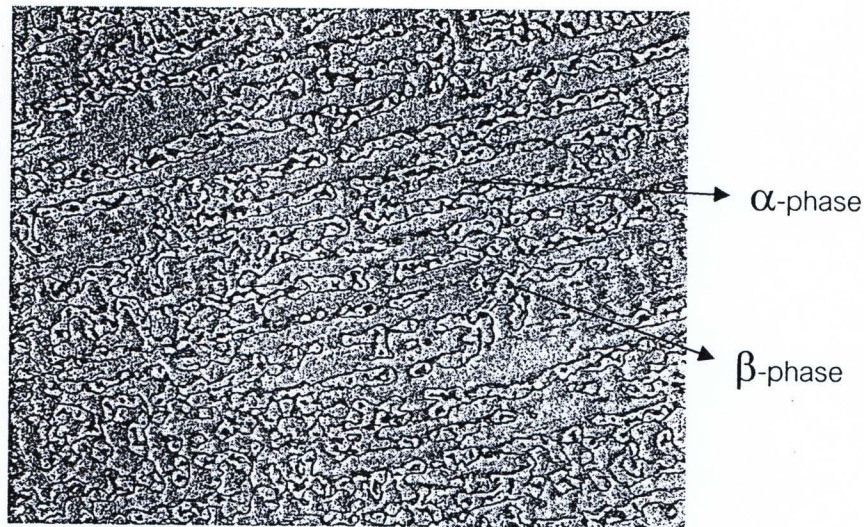
รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Ag-Cu แผนภูมิสมมูล คุณสมบัติทางกลและทางฟิสิกส์และอื่นๆของโลหะผสมเงิน-ทองแดง พบว่าค่าความแข็ง (Brinell Hardness) ของเงินสเตอร์ลิงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณทองแดงมากขึ้นจนถึงที่จุดยูเทคติก ซึ่งมีปริมาณทองแดง 28.5 wt% จากนั้นค่าความแข็งจะคงที่ไปจนถึง 80 wt%Cu และความแข็งจะลดลงเมื่อปริมาณทองแดงมากกว่า 80 wt%Cu เนื่องจากสารละลายของแข็งของเงิน-ทองแดง เริ่มเปลี่ยนเป็นโลหะที่มีค่าความบริสุทธิ์ของทองแดงมากขึ้นนั่นเอง และค่าความแข็งในโลหะผสมเงินที่เพิ่มขึ้นนี้มาจากเฟสเบต้าซึ่งมีปริมาณทองแดงสูงและโครงสร้างยูเทคติก ในทางกลับกัน ความสามารถในการยืดตัว (elongation) โลหะบริสุทธิ์จะมีค่ามากกว่าในโลหะผสม ดังนั้นปริมาณการยืดตัวของโลหะผสมเงิน-ทองแดง จะมีค่าต่ำที่สุดในช่วงปริมาณทองแดง จะลดลงเมื่อปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้นจนถึง 28.5 wt% และจะคงที่จนกระทั่งถึง 80 wt%



รูปที่ 2.8 คุณสมบัติต่างๆ ของระบบโลหะผสมเงิน - ทองแดง (เอกสิทธิ์ นิสาร์ตันพร และคณะ, 2546)

โครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิง ในสภาพการหล่อปกติ การแข็งตัวของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงจะเป็นแบบไม่สมดุล ส่วนผสมทางเคมีจึงมีการเปลี่ยนแปลง โดยในขณะที่โลหะเหลวความเข้มข้นของทองแดงจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ระหว่างการแข็งตัว จนถึงขีดความสามารถในการละลายของทองแดง หลังการแข็งตัวของเงินสเตอร์ลิงอย่างสมบูรณ์แล้วจะได้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์

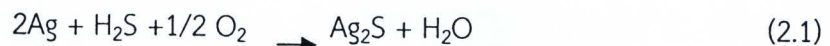
(dendritic Structure) ที่ประกอบด้วยเฟสเบต้าที่มีทองแดงมากซึ่งเป็นโครงสร้างยูเทคติกจะเห็นเป็นสีเข้ม ส่วนเฟสอัลฟาที่มีปริมาณเงินสูงจะเห็นเป็นสีอ่อนซึ่งเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างจุลภาคแบบเดนไดรต์ของเงินสเตอร์ลิง (Reti, 1997)

2.2 กลไกการเกิดการหมองในโลหะผสมเงิน

โลหะเงินเมื่ออยู่ในบรรยากาศจะถูกออกซิเดชัน ด้วยออกซิเจนในอากาศที่มีความชื้นและหากโลหะผสมเงินอยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ใกล้โรงงานอุตสาหกรรมและเมืองใหญ่ที่มีการจราจรคับคั่ง ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในสภาวะที่มี H_2S 600 ppm จะทำให้เงินสเตอร์ลิงหมองเร็วขึ้น สารที่มักทำให้ผิวโลหะเงินดำลงคือสารประกอบของซัลเฟอร์ ซึ่งมักเป็น H_2S มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีซัลเฟอร์อยู่ ปฏิกริยาที่ทำให้ผิวเงินหมองในบรรยากาศ H_2S คือ



โลหะเงินและโลหะเงินผสมเกิดปฏิกริยากับสภาพแวดล้อมได้คล้ายกัน ซึ่งโลหะเงินจะถูกกัดกร่อนในบรรยากาศก็ต่อเมื่อมีความชื้นอยู่ด้วยเท่านั้น เนื่องจากความชื้นจะถูกดูดติดและปกคลุมที่ผิวโลหะเงินกลายเป็นน้ำที่ติดอยู่ที่ผิวโลหะ โดยขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ ถ้าในบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์น้อย น้ำจะถูกดูดติดที่ผิวโลหะเงินได้น้อย ทำให้โลหะเงินถูกกัดกร่อนได้น้อย และการกัดกร่อนของโลหะเงินจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น ถ้าในบรรยากาศมีสารประกอบที่ทำให้เงินหมองอยู่ด้วย สารเหล่านี้จะละลายในน้ำที่ผิวเงิน ทำให้เงินมีฟิล์มดำที่ผิว ดังนั้นน้ำที่ผิวโลหะจึงมีฤทธิ์กัดกร่อนโลหะเงินได้

โดยน้ำที่อยู่บนผิวเงิน ซึ่งเกิดจากไอน้ำที่ควบแน่นมาเกาะที่ผิว หรืออนุภาคฝุ่นที่สามารถดูดความชื้นได้เกาะที่ผิวเงิน อีออนของโลหะเงิน (Ag^+) ละลายจากโลหะเงินลงมาในน้ำหรือสารละลายที่ผิวแล้วเกิดปฏิกริยาต่อไป ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกริยาออกซิเดชันของโลหะเงินคือ



2.2.1 สารประกอบที่เกิดจากการหมอง

เนื่องจากการหมองและการกัดกร่อนของโลหะผสมเงินสามารถเกิดได้ภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ ซึ่งสารประกอบหลักที่เกิดขึ้นในสภาวะต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปฏิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการหมอง (Basso *et al*, 2010)

Reaction	Equilibrium constant (K, 25°C)	Compound name	Color ²⁴
$2Ag + H_2S + 0.5O_2 \rightarrow Ag_2S + H_2O$	6.117×10^{42}	silver sulfide	black, grey-black
$2Cu + H_2S + 0.5O_2 \rightarrow Cu_2S + H_2O$	6.568×10^{50}	copper sulfide	blue-black
$Cu_2O + H_2S \rightarrow Cu_2S + H_2O$	8.197×10^{24}	copper sulfide	blue-black
$GeO_2 + 2H_2S \rightarrow GeS_2 + 2H_2O$	19.36	germanium sulfide	black
$SnO + H_2S \rightarrow SnS + H_2O$	2.89×10^{10}	stannic sulfide	brown-black, grey
$ZnO + H_2S \rightarrow ZnS + H_2O$	2.292×10^{14}	zinc sulfide	white
$SiO_2 + 2H_2S \rightarrow SiS_2 + 2H_2O$	6.840×10^{-35}	silicon sulfide	white or grey
$B_2O_3 + 3H_2S \rightarrow B_2S_3 + 3H_2O$	1.761×10^{-59}	boron sulfide	white-yellow
$Cu + O_2 + 2NO_2 \rightarrow Cu(NO_3)_2$	2.736×10^{37}	copper nitrate	blue
$Ag + NO_2 \rightarrow AgNO_2$	6.426×10^5	silver nitrite	yellow-grey
$Ag + 0.5SO_2 + 0.25O_2 \rightarrow 0.5Ag_2SO_3$	5.682×10^9	silver sulfite	--
$Cu + 0.5SO_2 + 0.5O_2 \rightarrow 0.5Cu_2SO_4$	1.117×10^{31}	copper sulfate	green
$2Ag + Cl_2 \rightarrow 2AgCl$	--	silver chloride	white

หมายเหตุ - ตัวเลขในแถวที่สองแสดง Equilibrium constant ซึ่งเป็นตัวชี้แนวโน้มของการเกิดปฏิริยาที่อุณหภูมิ 25°C ตัวเลขที่มีค่าสูงแสดงถึงแนวโน้มการเกิดปฏิริยาสูง
- สีในแถวที่สี่ อ้างอิงจาก www.webelements.com

ลักษณะและปัจจัยที่ส่งผลต่อการหมองและการกร่อนของโลหะเงิน สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ออกไซด์และคาร์บอเนต

ในบรรยากาศที่แห้งโลหะเงินจะเกิดออกไซด์ได้น้อยมาก (อุณหภูมิห้องและความดันปกติ) แต่ถ้าอยู่ในบรรยากาศที่ชื้นหรือเปียก จะเกิดออกไซด์ Ag_2O ที่เสถียรได้ก็ต่อเมื่ออยู่ที่ pH สูง และในสภาวะที่มีสารออกซิไดซ์เซอร์ที่รุนแรงเท่านั้น (หรือเกิดที่ศักย์ไฟฟ้าสูง) ซึ่งสภาวะเช่นนี้ไม่พบใน

บรรยากาศปกติ ดังนั้นถ้าโลหะเงินอยู่ในบรรยากาศจะเกิดออกไซด์ที่ผิวได้น้อยมากในบรรยากาศที่มี CO₂ (ซึ่งในบรรยากาศมีอยู่มากพอ) CO₂ จะละลายในน้ำที่ถูกดูดติดที่ผิวเงินได้เป็นกรดอ่อน แล้วทำปฏิกิริยากับเงินได้เป็น Silver carbonate ซึ่งละลายน้ำได้ดี แต่หากอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นต่างแก็ก่ จะเกิดเป็นผลึกของ Silver carbonate

2) ซัลไฟด์และซัลเฟต

เนื่องจากที่ผิวโลหะเงินที่ถูกกัดกร่อนจะมี Ag₂S (Acanthite) การเกิด Ag₂S เกิดจากในบรรยากาศมี Reduce sulfur สารที่เป็นสาเหตุใหญ่คือ HS⁻ ซึ่งเกิดปฏิกิริยากับไอออนของเงิน (Ag⁺) ที่ละลายลงมาในสารละลายหรือไปดูดติดที่ผิวโลหะเงินก่อนแล้วทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็น Ag₂S

ในบรรยากาศออกซิไดซ์ซัลเฟอร์เกิดจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และอนุภาคของซัลเฟตในบรรยากาศ โดยจะเกิดปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) หรือ โอโซน(O₃) ก็สามารถเกิดเป็นเงินซัลเฟตได้ การที่เกิดเป็นเงินซัลเฟตได้นั้นต้องมี SO₂ อยู่ในอากาศชั้นเป็นปริมาณมากคือประมาณ 2-3 เท่าของปริมาณ SO₂ ที่พบในบรรยากาศปกติการเกิดเป็นเงินซัลไฟด์ได้นั้น ต้องมีออกซิไดซ์เซอร์ในสภาวะแวดล้อมด้วย เช่น O₃ , NO₂ และ Cl₂

3) คลอไรด์

เมื่อในบรรยากาศมีคลอรีน (Cl₂) ซึ่งละลายน้ำได้ HCl หรืออนุภาคที่มีคลอไรด์อยู่เกาะติดที่ผิวโลหะเงิน คลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับโลหะเงินได้สารประกอบเชิงซ้อนของ AgCl หรือถ้าในน้ำที่ผิวโลหะเงินมีคลอไรด์อยู่จะเกิดเป็น AgCl เมื่อน้ำระเหยไปหมด จะเหลือ AgCl เกาะติดที่ผิวเงิน ขณะที่น้ำค่อยๆระเหยไปจะทำให้ความเข้มข้นของ Cl⁻ เพิ่มมากขึ้นจนอาจเกิดปฏิกิริยา

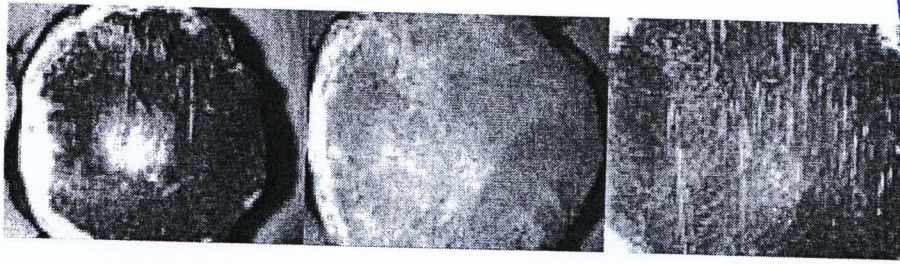


4) สารที่มีไนโตรเจน

โดยทั่วไปโลหะเงินเกิดปฏิกิริยากับ NO₂ ได้น้อยมาก และจะทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย (NH₃) เข้มข้นได้น้อยเช่นกัน

2.2.2 ลักษณะกายภาพของโลหะผสมเงินที่เกิดการหมองและการกัดกร่อน

เมื่อโลหะเงินเกิดการหมองและการกัดกร่อน บริเวณพื้นผิวของโลหะจะเกิดเป็นชั้นฟิล์มปกคลุมที่ผิวแต่ฟิล์มที่เกิดขึ้นมักเกิดไม่สม่ำเสมอ โดยฟิล์มที่เกิดขึ้นอาจจะติดแน่นหรือไม่ก็ได้ การกัดกร่อนของโลหะเงินในบรรยากาศนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับสภาพบรรยากาศแล้วยังต้องคำนึงถึงตำแหน่งบนโลหะที่เป็นจุดเริ่มต้นของการกัดกร่อนที่ผิวด้วย เช่น สภาพที่อาจทำให้มีน้ำตกค้างอยู่ได้นาน หรือสภาพผิวที่ทำให้มีน้ำเกาะอยู่หรือเปียกผิวได้ดี ลักษณะสีผิวของโลหะผสมเงินที่ถูกทดสอบภายใต้สภาวะของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ 30 50 และ 70% แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะผิวโลหะผสมเงินที่ผ่านการทดสอบการหมองภายใต้สภาวะของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) 30 50 และ 70% (สมนึก วัฒนศรีกุล และคณะ, 2544)

เมื่อโลหะเงินอยู่ในบรรยากาศเกิดการกัดกร่อน แล้วเกิดเป็นฟิล์มปกคลุมผิวอยู่นั้น มักเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นสารประกอบขอบ Ag_2S เป็นส่วนใหญ่ และมี AgCl บ้างในสภาพแวดล้อมมีคลอรีนสูงโลหะผสมเงินก็มีคุณสมบัติคล้ายกับโลหะเงิน ยกเว้นว่าธาตุเจือที่เติมในโลหะเงินนั้นมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่า

โลหะเงินต่างจากโลหะอื่นคือเมื่อเกิดการกัดกร่อนแล้ว จะไม่เกิดเป็นสารประกอบพวกคาร์บอนेट ซัลเฟต หรือไนเตรท แต่ถ้าอยู่ในบรรยากาศที่ทำให้โลหะเงินเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนได้ เช่น สารประกอบซัลเฟอร์ แม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย ก็สามารถทำให้โลหะเงินเกิดการกัดกร่อนได้เช่นกัน ดังนั้นการป้องกันผิวโลหะเงิน หรือการทำความสะอาดเป็นครั้งคราวมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการทำให้โลหะเงินยังคงสภาพผิวไว้ได้

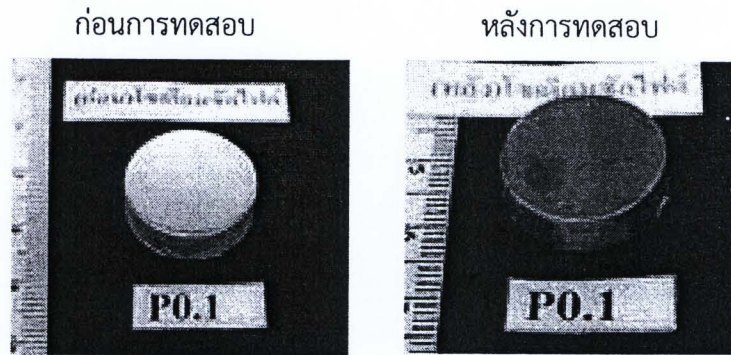
ปัจจัยที่มีผลต่อความหมอง

- บรรยากาศ
- ความชื้นสัมพัทธ์
- อุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดความหมองเพิ่มขึ้น และยังขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบที่ทำให้เงินหมองด้วย
- ปัจจัยทางโลหะวิทยา ได้แก่ ส่วนผสมของโลหะ, อัตราการแปรรูปเย็น, คุณภาพของผิว
- ส่วนผสมของโลหะ โดยธาตุเจือที่เติมในเงินอาจมีผลดีหรือผลเสียต่อการต้านทานความหมองของโลหะเงินเจือเช่น ทองแดงเติมในเงินเพื่อเพิ่มความแข็งแรงแต่เมื่อปริมาณทองแดงมากเกินไปทำให้หมองได้ง่ายขึ้น จึงมีการเติมธาตุอื่นเช่น Sn, Si, In, Zn และมีธาตุเจือที่เติมในปริมาณน้อยเช่น Al, Be, Ca ซึ่งธาตุเหล่านี้ไม่ทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์
- การแปรรูปเย็น โลหะเมื่อแปรรูปเย็นแล้วทำให้เกิดปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมได้ขึ้น หรือความต้านทานความหมองลดลง
- คุณภาพผิว ความหยาบผิวมากจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายหรือหมองได้ง่าย

การป้องกันการหมองของเงินสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การเคลือบฟิล์มที่สามารถปกป้องผิวโลหะเงินได้ ผิวเคลือบนี้อาจจะเป็นโลหะหรือ ออกไซด์ หรือสารประกอบอินทรีย์ก็ได้เช่น การเคลือบผิวด้วยโลหะเช่นเคลือบด้วย Rh, Ir, Pt, Pd, Ni โดยการชุบไฟฟ้า เป็นต้น หรือ การเคลือบผิวด้วยออกไซด์ซึ่งออกไซด์ที่ใช้เคลือบคือ BeO , Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO , TiO_2 เป็นฟิล์มที่ต่อเนื่องและใส การเคลือบมีราคาแพงและยุ่งยาก

จากการศึกษาของ สมนึก วัฒนศรีกุลและคณะ (2544) เกี่ยวกับความต้านทานหมองของ Ag-Cu-P , Ag-Cu-P-In และ Ag-Cu-Zn-In พบว่า โลหะผสม Ag-Cu-Zn-In มีความต้านทานการหมอง

ได้ดีที่สุด โดยขึ้นอยู่กับสัดส่วน Zn, In ที่ผสม และพบว่า Zn ทำให้โลหะมีสีขาวขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ชิ้นงาน Ag-Cu-Zn-In ก่อนและหลังทดสอบกันหมองด้วย Na_2S (สมนึก วัฒนศรีกุล และคณะ, 2544)

2.3 สีและระบบการวัดสี

สี เป็นคุณสมบัติเชิงแสงที่สามารถใช้บรรยายคุณลักษณะของวัสดุได้ง่ายที่สุดวิธีหนึ่ง ในการอธิบายสีของวัตถุด้วยคำพูด มาตรฐานของการบรรยายลักษณะสีอาจจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ ลักษณะทางกายภาพของตาของผู้บรรยาย ลักษณะแสงที่ตกกระทบ ฯลฯ ดังนั้นการวัดและบรรยายสีในเชิงวิชาการจึงต้องมีการจัดมาตรฐานเพื่อเป็นการลดความไม่เป็นกลางของผู้บรรยายสีของวัสดุนั้น ๆ องค์กรที่มีบทบาทสำคัญในการกำหนดมาตรฐานด้านสี มีชื่ออังกฤษว่า International Commission on Illumination องค์กรนี้ได้กำหนดมาตรฐานการวัดสีซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างในวงการวิชาการและการวิจัย คือระบบ CIE ได้พัฒนาระบบสีที่ทำให้เห็นความแตกต่างของสี โดยกำหนดเป็นค่าปริภูมิสี (Color Space) ขึ้น

ปริภูมิสี (Color Space) เป็นขอบเขตแสดงความกว้างขวางของสีของวัตถุหรือแหล่งกำเนิดแสง โดยใช้เครื่องหมายหรือตัวเลขที่ได้รับการพัฒนาจากความคิดพื้นฐานจากทฤษฎี 3 องค์ประกอบในการมองเห็นคือ ความมีสีสัน (Hue หรือ H) ความสว่าง (Value หรือ V) และความอิ่มตัวหรือโครมา (Chroma หรือ C) โดยปกติแล้วตามนุษย์ไวต่อแสงสามสีคือ สีแดง สีเขียวและน้ำเงิน ซึ่งสีทั้งหมดเกิดจากการผสมผสานกันของสามสีดังกล่าว ระบบปริภูมิสีที่นิยมใช้กันทั่วไปคือระบบ $L^* a^* b^*$ หรือบางครั้งเรียกว่า CIELAB ซึ่งเป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติโดยที่

แกน L^* จะบรรยายถึงความสว่าง (lightness)

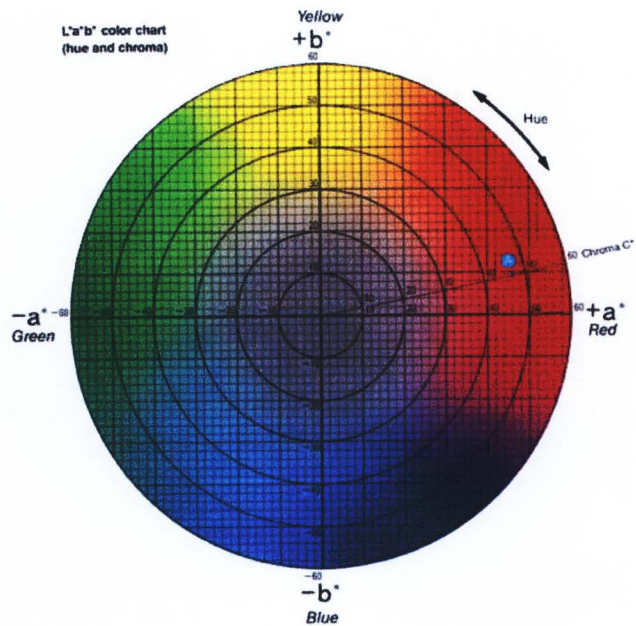
จากค่า $+L^*$ แสดงถึงสีขาว จนไปถึง $-L^*$ แสดงถึงสีดำ

แกน a^* จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว ($-a^*$) ไปจนถึงแดง ($+a^*$)

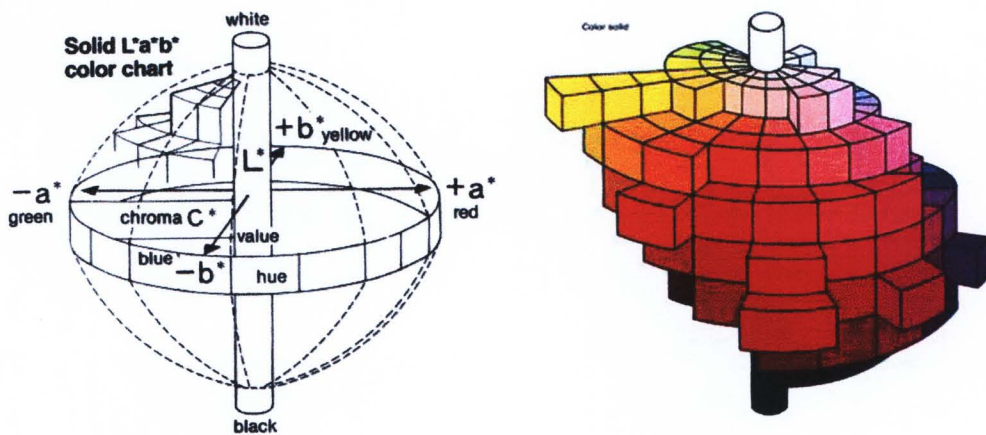
ส่วนแกน b^* จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน ($-b^*$) ไปเหลือง ($+b^*$)

โดยพื้นที่ตรงกลางจะไม่สามารถแยกสีได้ (achromatic)

ลักษณะการบรรยายสีของ CIE แสดงได้ดังรูป 2.12



[7]



รูปที่ 2.12 การบรรยายสีพื้นในระบบ CIE lab ในระบบ 3 มิติ

เนื่องจากตาของมนุษย์สามารถมองเห็นแสงได้ในช่วงความถี่ที่เห็นได้ด้วยตาเปล่าเท่านั้น ซึ่งบางครั้งสายจามนุษย์อาจมองเห็นสีสองสีเป็นสีเดียวกันและไม่สามารถแยกความแตกต่างของสีได้ โดยเฉพาะในกรณีของการวัดสีที่มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้การวัดสีด้วยเครื่องวัดสียังสามารถบอกความแตกต่างที่เกิดขึ้นเป็นตัวเลขที่แน่นอนได้เพื่อให้การสื่อความหมายของสีสามารถเข้าใจได้ง่าย โดยความแตกต่างของสีจะแสดงเป็นค่าเพียงค่าเดียวเรียกว่า เดลต้าอี (ΔE) ซึ่งจะบอก

เฉพาะปริมาณความแตกต่างของสีเท่านั้นแต่ไม่ได้บอกทิศทางความแตกต่างของสี ซึ่งค่า (ΔE) สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\Delta E = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2} \quad (2.4)$$

ตัวอย่างเช่น การหาความแตกต่างของสีของวัตถุ 2 ชิ้น ด้วยปริภูมิสีระบบ $L^* a^* b^*$

วัตถุชิ้นที่ 1 วัดสีได้ $L^* = 43.31, a^* = +47.83, b^* = +14.12$

วัตถุชิ้นที่ 2 วัดสีได้ $L^* = 47.34, a^* = +44.78, b^* = +15.16$

จะได้ค่า $\Delta L^* = +4.03, \Delta a^* = -3.05, \Delta b^* = +1.04$

สีของวัตถุ 2 ชิ้น เมื่อนำไปแทนค่าลงในสมการจะได้ $\Delta E^* = 5.16$

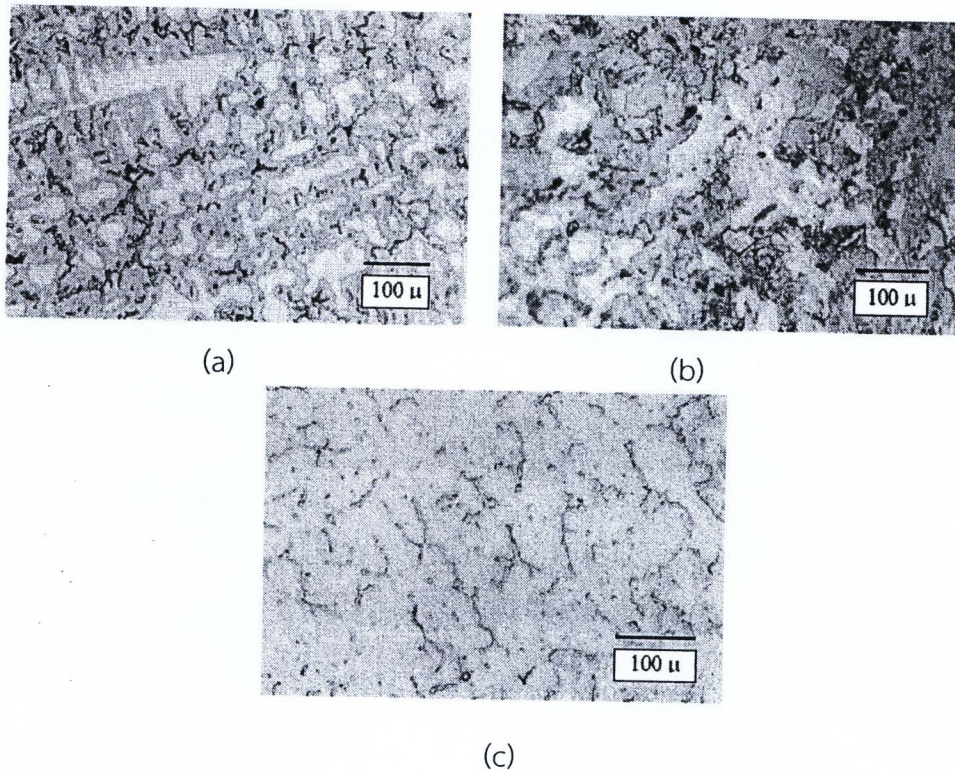
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วสันต์ คุรัตน์เวช และคณะ (2548) ได้ศึกษาผลของแคลเซียมและซิลิคอนต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของโลหะผสมเงิน-ทองแดง ที่ปริมาณเงิน 92.5 wt% โดยแบ่งโลหะผสมออกเป็น 2 กลุ่ม คือ โลหะผสมเงินเจือด้วยแคลเซียม 0.024-0.216 wt% และโลหะผสมเงินเจือด้วยซิลิคอน 0.03-0.24 wt% ก่อนหลอมโลหะจะอบเข้ากราไฟต์ที่อุณหภูมิ 600°C หลอมโลหะที่อุณหภูมิ 1,030°C และ 980°C สำหรับส่วนผสมที่เจือด้วยแคลเซียมและเจือด้วยซิลิคอน ในเครื่องหล่อสูญญากาศภายใต้บรรยากาศอาร์กอนเพื่อลดการเกิดออกซิเดชัน โดยขึ้นทดสอบมีขนาด 9 x 26 x 1.5 มม. การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีทำโดยใช้วิธีการตรวจด้วย ICP พบว่าปริมาณการสูญเสียของแคลเซียมเท่ากับร้อยละ 37.5-74.0 โดยน้ำหนัก และปริมาณซิลิคอนสูญเสียร้อยละ 31.2-53.3 โดยน้ำหนัก

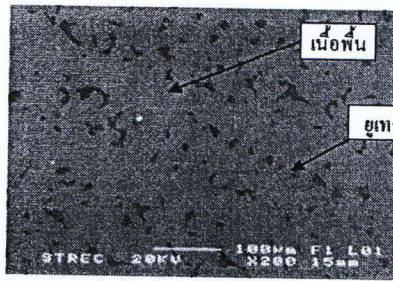
การตรวจสอบสมบัติทางกล ชิ้นงานถูกขัดละเอียดและนำไปวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ ตามมาตรฐาน ASTM E 92-82 ด้วยน้ำหนักกด 1 Kgf ส่วนการวัดความต้านทานการดึงจะนำชิ้นงานที่หล่อมาตามมาตรฐาน ASTM E8M- 96 จากการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินผสมทองแดงอย่างเดียว โดยมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (dendrite) ที่มีเงินเป็นองค์ประกอบสูง เรียกว่าเฟสอัลฟา และมีโครงสร้างยูเทคติก (eutectic structure) ดังรูปที่ 2.13(a) และเมื่อเพิ่มปริมาณของธาตุเจือของแคลเซียมและซิลิคอน ธาตุเจือดังกล่าวจะมีผลให้ปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกลดลงดังรูป 2.13(b) และ (c) โครงสร้างยูเทคติกดังกล่าวนี้จะเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ในรูปที่ 2.14 (a) และ (b) ลักษณะโครงสร้างยูเทคติกดังกล่าวประกอบไปด้วยเฟสอัลฟา และเฟสเบตา (ทองแดงสูง) จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเจือด้วยแคลเซียมหรือซิลิคอน มีผลให้โครงสร้างยูเทคติกมีการเปลี่ยนแปลง คือ มีปริมาณน้อยลง ดังรูปที่ 2.14(c) - 2.14(h) เมื่อนำชิ้นทดสอบที่เติมแคลเซียมอย่างเดียว (ร้อยละ 0.063) ไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดพบว่าแคลเซียมรวมเข้ากับเงินและทองแดงเกิดเป็นเฟส Ag-Cu-Ca ขึ้นที่ขอบเกรนของเฟสอัลฟา และเชื่อมเฟสเบตาที่อยู่บริเวณขอบเกรนเข้าด้วยกันเป็นโครงร่างตาข่าย (network) (รูปที่ 2.14 (d))

การวัดความแข็ง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุซิลิคอนและแคลเซียมส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง คือเมื่อมีแคลเซียมร้อยละ 0.09 ความแข็งลดลงจาก 65.4 HV มาอยู่ที่ระดับ 55.1 HV และในกรณีของชิ้นทดสอบที่เติมซิลิคอนร้อยละ 0.08 ค่าความแข็งลดลงมาที่ระดับ 53.4 HV เนื่องจากปริมาณ

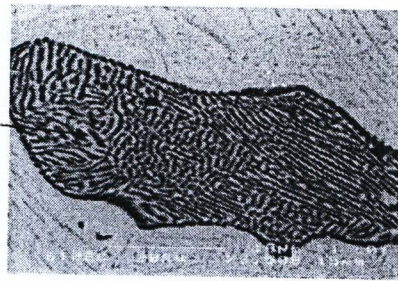
โครงสร้างยูเทคติกที่ลดลง ทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง แม้ว่าแคลเซียมบางส่วนสามารถละลายได้ในเนื้อพื้น แต่ก็ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรง ในขณะที่เดียวกันแคลเซียมและซิลิคอนมีผลทำให้เฟสเบตามีขนาดใหญ่และเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 2.14 (d และ h)) และจากผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง พบว่า ความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เจือแคลเซียมและซิลิคอนมีค่า 218.6 MPa เมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมและซิลิคอน ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความแข็งแรง ณ จุดครากมีแนวโน้มลดลง เช่นเดียวกับค่าความแข็งแรง ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากการลดลงของโครงสร้างยูเทคติกดังกล่าว



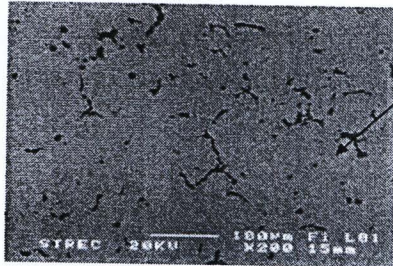
รูปที่ 2.13 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเงินผสมชนิดต่าง ๆ (a) 7.46%Cu (b) 7.30%Cu-0.90%Ca (c) 7.36%Cu-0.165%Si (วสันต์ คุรัตน์เวช และคณะ, 2548)



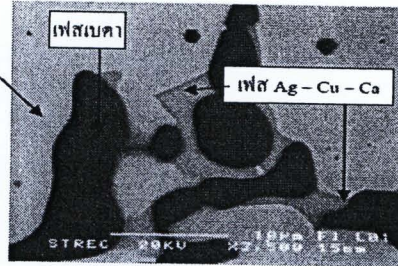
(a) 7.46% Cu



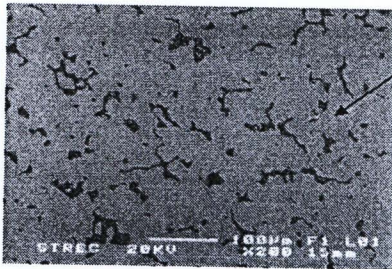
(b) 7.46% Cu



(c) 7.19% Cu - 0.063% Ca



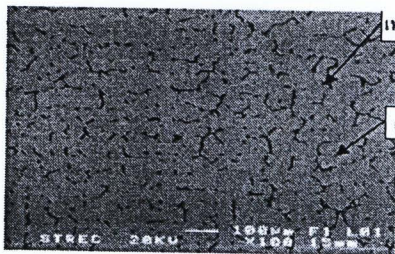
(d) 7.19% Cu - 0.063% Ca



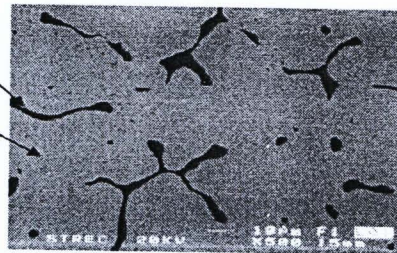
(e) 0.40% Cu - 0.08% Si



(f) 0.40% Cu - 0.08% Si



(g) 7.36% Cu - 0.165% Si



(h) 7.36% Cu - 0.165% Si

รูปที่ 2.14 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของชิ้นงานโลหะผสมเงินทองแดง ซิลิคอน และแคลเซียม (วสันต์ คุร์ตันเวช และคณะ, 2548)

การศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้านความแข็งของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่ปริมาณเงิน 92.5wt% และทองแดง 7.5 wt% พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการบ่มเพื่อเพิ่มความแข็ง คือการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 730°C เพื่อละลายเฟสทองแดงในโครงสร้างหลัก ทำเย็นอย่างรวดเร็วในน้ำและการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300°C เวลา 0.5-1 ชั่วโมง ความแข็งของโลหะหลังบ่มคือ 140 HV การบ่มแข็งที่สภาวะอื่นๆ เช่น การบ่มที่อุณหภูมิ 250°C เวลาตั้งแต่ 4 ชั่วโมงขึ้นไป การ

บ่มที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลานาน และการบ่มที่อุณหภูมิ 350°C จะทำให้เกิดการบ่มเกิน (over-aging) ซึ่งมีผลให้โลหะสูญเสียสมบัติทางกลโดยมีความแข็งแรงลดลง (Fischer-Bühner, 2003) อย่างไรก็ตามการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง อาจทำให้โลหะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น แต่จะมีผลกระทบโดยตรงต่อขนาดของเกรน คือเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นมาก (Reti, 1997)

สำหรับส่วนผสมของโลหะผสมเงินในระบบต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทั้งทางกลและทางเคมีที่ได้อ้างอิงจาก Patent ต่างๆ ดังรายละเอียดในตาราง 2.3 จากตารางโลหะผสมเงินที่มีปริมาณเงินสัดส่วนมากกว่า 92.5 wt% มีส่วนผสมหลักเป็นทองแดงซึ่งเป็นธาตุเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะผสม นอกจากนี้ Zn และ Si ทำหน้าที่เป็นธาตุผสมรอง โดยมี Zn ประมาณ 0.1-4 wt% และ Si ประมาณ 0.1-0.5 wt% ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงรวบรวมจาก Patent ที่เกี่ยวข้อง

ลำดับที่	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)											Patent no.	หมายเหตุ
	Ag	Cu	Zn	Si	Pd	B	Ge	Li	In	Mo	Ge		
1	92.5	4.4-5.25	0-1	0.05-0.5	-	0-0.02	0-1.2	0.05-0.3	-	-	-	US7198683	- Tarnishing test: ammonium sulfide 650 ppm heat at 66C for 6 hrs
2	92.5-99	Bal	0.1-3	0.001-0.5	-	-	-	-	0.01-7.4	0.0001-0.1	-	US5558833	- For casting: 935Ag, In1, Mo0.05 for non-porous finishing
3	40-85	15-60	-	-	5	-	-	-	-	-	0.1-10	US4124380	- Tarnishing and high oxidation resistance
4	92.5-96.6	Bal	-	-	-	0.001-0.008	-	-	-	-	0.1-0.38	US6406664	- Tin (Sn) 0.5-2.2, Ni 0.001-0.1
5	92.5	2	0.5	-	5	-	-	-	-	-	-	US5307708	- Ge together with B used as the grain refiner
6	Bal	0-20	0.4-4.1	-	-	-	-	-	0.6-10.5	-	-	US3811876	Ag-Pd alloy
7	Bal	0.3-3	0-7	-	-	-	-	-	4-8	-	-	US5021214	Sn 4.4-9.2%
8	Bal	60-74	24-30	0.5-1.8	-	-	-	-	0-1.5	-	-	US7128871	Al 1-2%, Ref to US 4944985 : Ag-Pd alloy: Ag80-92.5, Pd4-9, Cu0-10, Zn0.5-1
9	80-99	0.5-6	0.02-7	-	-	-	0.01-2.5	-	-	-	-	US6726877	Firestain resistance
10	92.5	4.8-7.5	-	-	-	-	-	0-0.3	-	-	-	US4810308	Hardness test, Age hardening
11	92.5	1.96-7.5	-	-	-	-	-	0-0.36	-	-	-	US4869757	Sn, Sb and Bi is added
12	Bal	1-3	3.5-7.35	0.1-2.5	-	-	-	-	-	-	-	US5882441	Hardenable silver alloy (Ag-Cu-Li-Sn)
13	89-93.5	0.5-6	0.5-5	0.02-2	-	-	-	-	-	-	-	US5039479	Silver colored alloy, highly tarnish resistance, low percent copper
14	90-92.5	0.25-1	5.75-7.5	0.1-0.25	-	-	-	0.01-1.25	-	-	-	US5817195	Sn0.25-6, reduced porosity, reduced grain size, reduced oxidation
15	Bal	1.25-1.35	0.35-0.45	-	-	-	-	-	0-0.5	-	-	US6936117	highly tarnish resistance, Ni0.25-0.5
16	92.5	6.3	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	US1984225	Silverware, Oxidation resistance
17	Bal	35-50	0-28	0-2	-	-	-	-	-	-	-	US2196303	Age hardening, Al 0.1-5%
18	Bal	7.5-30	-	-	-	-	0.005-0.5	-	-	-	-	US2196302	Ag-Cu-Li alloy
19	92.5	0.5	4.25	1	-	1.25	-	-	0.02	-	-	US4973446	Sn0.48
20	85-93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	US1970319	Tarnishing-resistance silver alloy
21	90-95.5	0.7-4	0.5-4	0-0.2	-	0-0.3	-	-	0-1.5	-	0-2.6	US7118707	Ag-Pt alloy