

โลหะ โลหะผสม และการปรับปรุงสมบัติของโลหะ เพื่อนำไป ประยุกต์ใช้ในงานเครื่องประดับ

สุพิชมา สุพรรณสมบูรณ์^{1*} สุภิญญา วงษ์ศรีรักษา^{1*} ธีรัตน์ วัชรรัตน์พงศ์¹
อโนชา หมั่นภักดี¹ และ ณัฐพงศ์ พินิจคำ¹

ได้รับบทความ: 24 มิถุนายน 2563

ได้รับบทความแก้ไข: 11 กันยายน 2563

ยอมรับตีพิมพ์: 14 กันยายน 2563

บทคัดย่อ

เครื่องประดับที่มีตัวเรือนที่ทำจากโลหะ เป็นเครื่องประดับที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบัน ด้วยสมบัติที่โดดเด่นหลายประการของวัสดุประเภทโลหะที่ไม่สามารถหาได้ในวัสดุประเภทอื่น อย่างไรก็ตามการนำวัสดุประเภทโลหะมาใช้งานเครื่องประดับ ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ดังนั้นเครื่องประดับโลหะจึงถูกปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อลดข้อจำกัดและตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่มีมากขึ้น สำหรับในบทความวิชาการนี้ จะกล่าวถึง โลหะ 3 กลุ่ม ที่เป็นที่ยอมรับและน่าสนใจในการปรับปรุงสมบัติ ได้แก่ (1) โลหะมีค่าที่ใช้ในเครื่องประดับแท้ ได้แก่ ทองคำ แพลทินัม และเงิน (2) โลหะพื้นฐานที่ใช้ในเครื่องประดับเทียม หรือเครื่องประดับแฟชั่น ได้แก่ ทองแดงและทองแดงผสม และ (3) โลหะทางเลือกใหม่สำหรับเครื่องประดับ ได้แก่ ไทเทเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม การปรับปรุงสมบัติของโลหะที่สำคัญ ได้แก่ การเติมธาตุผสม เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพ ทั้งนี้ยังมีสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงก็คือ ปริมาณหรือความบริสุทธิ์ของโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องประดับแท้ และการไม่ก่อให้เกิดการแพ้และระคายเคืองต่อผิวของผู้บริโภค รวมทั้งต้องมีการใช้กระบวนการผลิต และพัฒนากระบวนการผลิตให้มีความเหมาะสม

คำสำคัญ: เครื่องประดับโลหะ การปรับปรุงสมบัติ โลหะผสม

¹ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน, e-mail: supitcha@g.swu.ac.th

Metals and Metal Alloys and their Enhanced Properties for Jewelry Applications

Supitcha Supansomboon^{1*}, Supinya Wongsriruksa¹,
Teerat Watcharatpong¹, Anocha Munkakdee¹ and Natthapong Phinichka¹

Received: 24 June 2020

Revised: 11 September 2020

Accepted: 14 September 2020

ABSTRACT

Jewelry can be made with a wide range of materials, including metal, which is one of the most fashionable materials. Metal jewelry has been used for many centuries due to its attractive and outstanding properties. However, there are still limitations for using metals in jewelry, even though metal jewelry has been enhanced and developed continuously in order to reduce the limitations as well as to satisfy the customer needs. This review article covers three main groups of metals. These metals are trendy and can be well utilized for jewelry applications with properties enhancement; (i) Precious metals, used for fine jewelry including gold, platinum, silver and their alloys, (ii) Base metals, used for costume Jewelry or fashion jewelry including copper and its alloys and (iii) Other metals for alternative jewelry including titanium and stainless steel. The properties of metals can be enhanced by the addition of alloying elements, which can improve their mechanical and physical properties concerning the hypoallergenic and purity of metals particularly fine jewelry. Furthermore, the approach of selecting and developing suitable jewelry processing is also important to be considered.

Keywords: Metal Jewelry, Properties Enhancement, Alloys

¹Department of Materials Science, Faculty of Science, Srinakharinwirot University

*Corresponding author, email: supitcha@g.swu.ac.th

บทนำ

เครื่องประดับเป็นสิ่งของที่อยู่กับมนุษยชาติมากกว่า 100,000 ปี โดยหลักฐานทางประวัติศาสตร์ที่เก่าแก่ที่สุดที่ถูกค้นพบคือสร้อยคอที่ทำจากกำปลาในถ้ำแห่งหนึ่งที่ประเทศโมนาโค เครื่องประดับถูกพัฒนาในรูปแบบและวัสดุที่ใช้ผลิตตามจุดประสงค์ของการใช้งาน โดยพัฒนาจากวัตถุดิบธรรมชาติอย่างเปลือกหอยและอำพันสู่สินแร่ เช่น ทองคำ เงิน เป็นต้น เครื่องประดับถูกใช้ในหลากหลายวัตถุประสงค์ ทั้งการใช้เพื่อความสวยงาม หรือใช้เพื่อเป็นเครื่องยืนยันสถานะทางสังคม เช่น การแลกเปลี่ยนแหวนในพิธีแต่งงาน ซึ่งเริ่มมาตั้งแต่สมัยอียิปต์โบราณตั้งแต่วัย 6,000 ปีก่อน (3,000 ปี ก่อนคริสต์ศักราช) ก่อนจะแพร่กระจายสู่กรีก โรมัน และยุโรป และยังคงดำรงอยู่จนถึงปัจจุบัน หรือพิธีปักปันเพื่อยืนยันการก้าวเข้าสู่วัยสาวของสตรีอายุ 15 ปีในสมัยราชวงศ์โจว (1,100 ปี ก่อนคริสต์ศักราช) เปลือกหอยเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องประดับและเป็นสื่อกลางแลกเปลี่ยนสินค้าในยุคแรกๆ ก่อนจะพัฒนามาเป็นโลหะอย่างทองคำ ในช่วง 4,400 ก่อนคริสต์ศักราช เรียกได้ว่าการพัฒนาเครื่องประดับนั้นเป็นส่วนหนึ่งของอารยธรรมมนุษย์ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน [1]

โลหะเป็นกลุ่มวัสดุที่ใช้งานมากในการทำตัวเรือนเครื่องประดับโดยอุตสาหกรรมผลิตเครื่องประดับจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ อุตสาหกรรมเครื่องประดับแท้ (Fine jewelry) และอุตสาหกรรมเครื่องประดับเทียม (Costume jewelry) หรือเครื่องประดับแฟชั่น (Fashion jewelry) สำหรับเครื่องประดับแท้ เป็นเครื่องประดับที่มีราคาสูง และมักจะเป็นกลุ่มโลหะมีค่า (Precious metals) เช่น ทองคำ (Gold) แพลทินัม (Platinum) และเงิน (Silver) เป็นต้น ความมีราคาสูงของโลหะมีค่าเหล่านี้ เนื่องจากเป็นโลหะที่หายาก และมีสมบัติเด่นกว่าโลหะอื่นๆ เช่น มีความเหนียว (Ductility) สูง มีความสามารถในการตีแผ่ (Malleability) สูง และความสามารถในการสะท้อนแสง (Reflectivity) อยู่ในระดับดีมาก [2-4] ไม่ค่อยเกิดปฏิกิริยาในสภาวะแวดล้อม ทำให้สามารถคงความเงางามและมีความคงทนสูง จึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นวัสดุในการทำเครื่องประดับ อย่างไรก็ตามโลหะบริสุทธิ์มีข้อจำกัดในเรื่องของต้นทุนการผลิต การขึ้นรูป และความคงทนในการใช้งานในรูปของเครื่องประดับ ไม่ว่าจะเป็นต่างหู แหวน สร้อยคอ สร้อยข้อมือ กำไล หรือนาฬิกา ดังนั้นในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จึงนิยมใช้โลหะผสม (Alloys) ซึ่งก็คือการเติมธาตุชนิดอื่นๆ ลงไป โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติของโลหะบริสุทธิ์ให้เหมาะกับการขึ้นรูปและการใช้งาน เช่น การเติมทองแดง (Copper) ลงไปในเงิน หรือการเติมเงินลงในทองคำเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโลหะให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง หรือการเติมสังกะสี (Zinc) เพื่อเพิ่มการไหลตัวในโลหะเพื่อให้ง่ายต่อการหล่อขึ้นรูป ในบางครั้งอาจจะมีการปรับปรุงสมบัติโลหะผสมด้วยกระบวนการอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น กระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) เป็นต้น นอกจากนี้การเติมธาตุบางชนิดในปริมาณน้อยลงไป ยังสามารถที่จะลดข้อด้อยหรือข้อจำกัดของโลหะเหล่านี้ได้อีกด้วย [5-7]

ส่วนเครื่องประดับเทียม เป็นเครื่องประดับที่มีราคาไม่สูงมากนัก เนื่องจากตัวเรือนเครื่องประดับจะผลิตมาจากโลหะที่ไม่ได้จัดอยู่ในกลุ่มโลหะมีค่า ได้แก่ โลหะดีบุกผสม หรือที่รู้จักกันในชื่อพิวเตอร์ (Pewter) โลหะทองแดงผสม เช่น ทองเหลือง (Brass) และสัมฤทธิ์ (Bronze) เป็นต้น [8-9] ซึ่งจะเห็นว่าโลหะส่วนใหญ่ที่ใช้ในงานเครื่องประดับเทียม มีการเลือกใช้โลหะผสมในการผลิตเครื่องประดับ เพื่อให้เหมาะกับการขึ้นรูปและการใช้งานเช่นเดียวกับในเครื่องประดับแท้ ในปัจจุบันเนื่องจากผู้บริโภคมีความต้องการความหลากหลายมากขึ้น กอปรกับในช่วงปลายศตวรรษที่ 20 มีการค้นพบและพัฒนาโลหะ และ

โลหะผสมชนิดอื่นๆ ที่มีสมบัติที่น่าสนใจ และถูกเลือกนำมาใช้ในงานเครื่องประดับเพิ่มมากขึ้น เพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการใช้งาน เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ไทเทเนียม (Titanium) และทังสเตน (Tungsten) [10-11] นอกจากนี้ในการพัฒนาวัสดุให้มีความแข็งแรงมากขึ้น อย่างเช่น ไทเทเนียมไนไตรด์ (Titanium nitride, TiN) และทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide, WC) ก็ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานเครื่องประดับเช่นกัน [12-13]

สำหรับในบทความวิชาการฉบับนี้ จะกล่าวถึงโลหะและโลหะผสมที่ได้รับความนิยม และมีความน่าสนใจในเรื่องการปรับปรุงสมบัติเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานเครื่องประดับ โดยจะเลือกมาจากตัวแทนโลหะ 3 กลุ่มที่ได้กล่าวมาข้างต้น คือ โลหะมีค่าที่ใช้ทำเครื่องประดับแท้ โลหะผสมที่ใช้ทำเครื่องประดับเทียม และโลหะทางเลือกใหม่ที่น่าสนใจนำมาใช้ทำเครื่องประดับ ได้แก่ โลหะทองและทองผสม โลหะแพลทินัมและแพลทินัมผสม โลหะเงินและเงินผสม โลหะทองแดง และทองแดงผสม โลหะไทเทเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม

โลหะทองและทองผสม

โลหะทอง หรือทองคำ มีสัญลักษณ์ คือ Au ย่อมาจากคำว่า ออรัม (Aurum) ซึ่งเป็นภาษาละติน ทองคำมีจุดเด่นที่ทำให้ทองคำมีความแตกต่างจากโลหะอื่นๆ ในตารางธาตุอย่างเห็นได้ชัด คือ ทองคำมีสีเหลือง ในขณะที่ธาตุเกือบทั้งหมดในตารางธาตุมีสีเงิน (Silvery color) นอกจากนี้ทองคำยังมีความโดดเด่นอยู่หลายประการ เช่น มีความเหนียวสูง มีความสามารถในการตีแผ่สูง (สามารถรีดและตีแผ่ได้บางมาก เช่น แผ่นทองคำเปลว) ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน จึงไม่หมอง จากสมบัติที่ดีดังที่ได้กล่าวมา ทำให้ทองคำได้รับความนิยมตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันและยังถูกนำไปใช้งานในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมทันตกรรมและการแพทย์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามสำหรับในงานเครื่องประดับ ทองคำบริสุทธิ์มีข้อจำกัดในเรื่องความเหมาะสมในการนำไปขึ้นรูปในรูปแบบต่างๆ เพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ ดังนั้นทองคำส่วนใหญ่ที่นำมาใช้เป็นเครื่องประดับ จึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติ โดยเติมธาตุอื่นๆ ลงไปในทองคำบริสุทธิ์ เพื่อให้จะได้สมบัติเหมาะสมต่อการนำไปขึ้นรูป และการนำไปใช้งาน [14-15]

ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ มีการกำหนดค่าความบริสุทธิ์ของทองคำเป็นกะรัต (Karat) หรือที่เรียกว่าทองเค โดยมีการเทียบทองคำบริสุทธิ์ 100 เปอร์เซ็นต์ หรือ 1000 ส่วน เท่ากับ 24 กะรัต หรือ 24 เค (24K) ธาตุตัวเติมที่นิยมเติมลงไป เช่น เงิน ทองแดง และสังกะสี เป็นต้น โลหะทองผสม 18K 14K และ 9K เป็นกะรัตที่เป็นที่นิยมในงานเครื่องประดับในหลายประเทศ ส่วนประเทศไทยนิยมทองคำ 96.5 เปอร์เซ็นต์ หรือประมาณ 23K ความบริสุทธิ์ของทองคำในหน่วยกะรัต ปริมาณของทองคำคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณของทองคำใน 1000 ส่วน (Fineness) แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความบริสุทธิ์ของทองคำ และปริมาณของธาตุผสมที่เติมลงไปทองคำที่นิยมใช้ในงานเครื่องประดับ [14, 15]

กะรัต (Karat)	ปริมาณทองคำ โดยน้ำหนัก	ปริมาณทองคำใน 1000 ส่วน	ตัวอย่างปริมาณของธาตุที่เติมลงไป โดยน้ำหนัก
24	100%	1,000	Au 100
22	91.6%	916	Ag 0-6, Cu 2-8.3
18	75%	750	Ag 0-20, Cu 5-25
14	58.3%	583	Ag 0-41.5, Cu 0-33.5, Zn 0-10
9	37.5%	375	Ag 0-56, Cu 4-60, Zn 0-15
8	33.3%	333	Ag 0-58.5, Cu 4-60, Zn 0-15

ระบบของทองคำผสมที่เป็นที่รู้จักและนิยมใช้งานเครื่องประดับอย่างกว้างขวาง คือ ระบบโลหะผสมของทองคำ-เงิน-ทองแดง (Au-Ag-Cu system) ธาตุในระบบนี้จะส่งผลต่อโลหะทองผสมทั้งในด้านสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็ง ความแข็งแรง เป็นต้น และสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น จุดเดือด สี เป็นต้น โลหะทองผสม 18K จะมีความหนาแน่นมากกว่าโลหะทองผสม 14K 9K และ 8K ตามลำดับ ซึ่งความหนาแน่นของโลหะทองผสมจะขึ้นกับปริมาณทองคำเป็นหลัก [14-16] ส่วนสมบัติความแข็ง และสีของโลหะทองผสมขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณธาตุที่เติมลงไป โลหะทองผสมที่เติมเงินและทองแดงจะมีความแข็งมากกว่าทองคำบริสุทธิ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะทองผสม 18K จะมีความแข็งแรงและความแข็งเพิ่มขึ้นด้วยกลไกการเพิ่มความแข็งแรงโดยเกิดสารละลายของแข็ง (Solid solution strengthening) การเพิ่มความแข็งแรงโดยการเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงตำแหน่งของอะตอมแต่ละอะตอมอย่างเป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบ (Order-disorder hardening) การเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (Precipitation hardening) และการเพิ่มความแข็งแรงโดยการลดขนาดเกรน (Hardening by grain refining) [17] การเติมเงินและทองแดงลงในทองคำในปริมาณที่แตกต่างกัน จะมีผลต่อสีของโลหะทองผสมเป็นอย่างมาก ระบบโลหะผสมทองคำ-เงิน-ทองแดง จะให้สีหลากหลาย โดยพื้นฐานจะได้ทองคำสีเหลือง หรือ Yellow gold ตามโลหะทองที่เป็นธาตุหลัก และจะมีเฉดสีเหลืองที่เข้ม อ่อน หรืออมสีอื่นที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับธาตุตัวเติมในลำดับรองลงมา ถ้ามีการเติมทองแดงลงไปปริมาณมากจะทำให้โลหะทองผสมมีสีออกไปทางสีแดง หรือทองคำสีแดง (Red gold) หรือสีชมพู หรือ ทองคำสีชมพู (Pink gold, Rose gold) ตามสีของโลหะทองแดง ในขณะที่ถ้ามีการเติมเงินลงไปปริมาณมากจะทำให้โลหะทองผสมมีสีออกไปทางสีเขียว หรือทองคำสีเขียว (Green gold) และสีขาว หรือทองคำสีขาว (White gold) ตามสีของโลหะเงิน [18-20]

ทองคำสีขาว หรือ White gold ที่กล่าวถึงข้างต้น เริ่มมีการพัฒนาขึ้นมาเพื่อทดแทนการใช้งานของแพลทินัม ที่นิยมในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ เช่น เครื่องประดับที่มีการฝังเพชร เครื่องประดับสองสี (Two-tone) ที่มีสีเงินและทอง และชิ้นส่วนที่มีกลไกในเครื่องประดับ เช่น ตะขอ (Clasp) เป็นต้น ดังนั้น

บางครั้งจึงทำให้ผู้บริโภคเกิดความสับสนระหว่าง ทองคำสีขาว หรือ White gold กับ แพลทินัม ซึ่งมีราคาแตกต่างกันมาก นอกจากนี้การเรียกทองคำสีขาว ยังครอบคลุมถึงทองคำที่มีสีอ่อนอีกด้วย สีในทองคำสีขาวสามารถเกิดขึ้นได้จากระบบทองคำ-เงิน-ทองแดง โดยมีอิทธิพลมาจากโลหะเงิน ตามที่กล่าวข้างต้น แต่สีที่ได้ อาจจะมีเป็นสีอมเหลืองอยู่ ดังนั้น จึงมีการเติมธาตุตัวเติมที่เป็นสารฟอกขาว (Bleaching agent) ในปริมาณเล็กน้อยลงไปอีกด้วย สารฟอกขาวที่นิยมใช้เติมลงไป ได้แก่ นิกเกิล สังกะสี และแพลเลเดียม เป็นต้น เครื่องประดับทองคำสีขาวที่ใช้ทำเครื่องประดับ มักจะมีการเติมสารฟอกขาวมากกว่า 1 ชนิดลงในโลหะทองผสม โดยโลหะทองผสมที่มีสีขาวที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ได้แก่ โลหะผสมระบบทองคำ-ทองแดง-นิกเกิล-สังกะสี (Au-Cu-Ni-Zn system) ในระบบนี้จะใช้นิกเกิลเป็นสารฟอกขาวหลัก ซึ่งเป็นโลหะที่มีราคาไม่สูงและเป็นสารฟอกขาวที่มีความแรง ส่วนสังกะสีเป็นสารฟอกขาวรอง อย่างไรก็ตาม ในบางประเทศไม่นิยมและห้ามนิกเกิลในผลิตภัณฑ์เครื่องประดับเนื่องจากจะเกิดการแพ้ที่ผิวหนัง ส่วนอีกระบบที่นิยมคือ โลหะผสมระบบทองคำ-แพลเลเดียม-เงิน (Au-Pd-Ag system) ซึ่งในระบบนี้ จะใช้แพลเลเดียมเป็นสารฟอกขาวหลัก ในขณะที่เงินเป็นสารฟอกขาวรอง ข้อดีของการเลือกใช้เงินคือทำให้โลหะผสมสามารถใช้งานได้ดีมาก แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องความแรงของสารฟอกขาวอยู่ในระดับปานกลาง และสามารถเกิดการหมองเนื่องจากทำปฏิกิริยาได้ง่ายกับซัลเฟอร์ ดังนั้น จึงนิยมใช้กับทองคำที่มีกะรัตต่ำ ถึงแม้ว่าสีของทองคำสีขาวมีความใกล้เคียงกับแพลทินัม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทองคำสีขาว 18K และ 14K แต่ทองคำสีขาวจะมีสีเหลืองอ่อนปนด้วย สำหรับในงานเครื่องประดับ จึงนิยมทำการชุบเคลือบด้วยโรเดียมบนผิวโลหะทองผสมสีขาว ดังนั้นในบางครั้งผู้บริโภคมีการใช้ไปในระยะเวลาหนึ่ง จะเกิดการลอกออก [19, 21]

นอกจากนี้โลหะทองผสมสามารถเกิดสีอื่นๆ ได้อีก เช่น ทองคำสีม่วง ทองคำสีฟ้า ทองคำสีน้ำตาล ทองคำสีดำ เป็นต้น ซึ่งจะมีธาตุและลักษณะการเกิดแตกต่างออกไปจากระบบทองคำผสม หรือทองอัลลอยด์ที่กล่าวมาข้างต้น สารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก (Intermetallic compound) เป็นวัสดุกลุ่มโลหะผสมที่มีความพิเศษ โดยที่จะเกิดเฟสใหม่ หรืออินเทอร์มีเดียตเฟส (Intermediate phase) ในระบบโลหะผสม ซึ่งจะปรากฏเป็นแถบแคบๆ และประกอบด้วยสัดส่วนที่ค่อนข้างแน่นอนในแผนภูมิสมมูล ด้วยเหตุนี้เองจะมีสมบัติที่แตกต่างไปจากโลหะที่เป็นโลหะหลักและธาตุที่เติมลงไป สมบัติที่โดดเด่นมากของสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกนี้คือ เรื่องของสีที่เกิดขึ้น ก็จะเป็นสีที่แตกต่างจากโลหะหลักและธาตุรองที่เติมลงไป สำหรับการเกิดสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกที่มีทองคำเป็นองค์ประกอบหลักที่เป็นที่รู้จักกันดีคือทองคำสีม่วง และทองคำสีฟ้า ซึ่งเกิดจากสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกที่มีโครงสร้างแคลเซียมฟลูออไรด์ หรือ โครงสร้าง C1 หรือ ในระบบเพียร์สัน (Pearson symbol) คือ cF12 ทองคำสีม่วง หรือ $AuAl_2$ มีองค์ประกอบทางเคมีคือ ทองคำ 79 เปอร์เซ็นต์ และอะลูมิเนียม 21 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความบริสุทธิ์ของทองคำมีความใกล้เคียงกับโลหะทองผสม 18K (ทองคำบริสุทธิ์ 75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะผลิตเป็นเครื่องประดับและตีตราเป็นโลหะทองผสม 18K ส่วนทองคำสีฟ้าสามารถเกิดได้จากสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก 2 ชนิด ได้แก่ $AuIn_2$ และ $AuGa_2$ โดยที่สารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกทั้ง 2 ชนิดนี้ให้เฉดสีฟ้าที่ต่างกัน กล่าวคือ $AuIn_2$ จะให้สีฟ้าสว่าง (Clear blue) ในขณะที่ $AuGa_2$ จะให้สีออกไปทางสีฟ้า (Bluish hue) องค์ประกอบทางเคมีของ $AuIn_2$ คือ ทองคำ 46 เปอร์เซ็นต์ และอินเดียม 54 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของ $AuGa_2$ คือ ทองคำ 58.5 เปอร์เซ็นต์ และแกลเลียม 41.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทองคำสีฟ้านี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานเครื่องประดับและ

ดีตราเป็นโลหะทองผสม 14K โดยทั่วไปกรรมวิธีการผลิตสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกเพื่อใช้ในงานเครื่องประดับ มีอยู่ 4 วิธี ได้แก่ การหลอมอาร์คสูญญากาศ (Vacuum-arc melting) กรรมวิธีโลหะผง (Powder metallurgy) การหล่อขึ้นรูปแทนที่ขี้ผึ้ง (Lost wax casting or Investment casting) และการเคลือบผิวแบบไอกายภาพ (Physical vapor deposition) อย่างไรก็ตามสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกจะมีสมบัติเปราะและมีข้อจำกัดในการผลิต ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบและเลือกกรรมวิธีการผลิตให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน [22-25] นอกจากนี้การเกิดสีในโลหะทองผสม ยังสามารถเกิดได้จากธาตุที่เติมลงไปในทองคำบางชนิดรวมตัวกับออกซิเจน หรือซัลไฟด์ ทำให้เกิดเป็นชั้นฟิล์มบางๆ ที่ผิว ยกตัวอย่างเช่น ทองคำสีน้ำตาล หรือทองคำสีดำ สามารถเกิดได้ในโลหะทองผสม 18K หรือต่ำกว่า ที่มีทองแดงผสม ซึ่งทองแดงทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมซัลไฟด์ (Potassium sulfide or liver of sulfur) สามารถทำให้เกิดสีตั้งแต่สีน้ำตาลไปจนถึงสีดำ นอกจากนี้ทองคำสีดำ ยังสามารถเกิดได้จากทองคำที่ผสมธาตุบางชนิด เช่น โคบอลต์ เหล็ก โทเทเนียม ทำให้เกิดออกไซด์บนผิว และสีออกสีดำ [19] นอกจากนี้ในกรณีที่ต้องการทองคำความบริสุทธิ์สูงและต้องการความแข็งแรงด้วยก็เป็นอีกหนึ่งความต้องการของผู้บริโภค ดังนั้นจึงมีการเติมโทเทเนียมในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลงไปในทองคำบริสุทธิ์ (990Au-Ti) [26]

โลหะแพลทินัมและแพลทินัมผสม

โลหะแพลทินัม มีสัญลักษณ์ คือ Pt เป็นหนึ่งในโลหะที่อยู่ในกลุ่มโลหะกลุ่มแพลทินัม (Platinum Group Metals, PGMs) ซึ่งประกอบไปด้วยธาตุหรือโลหะ 6 ชนิด ได้แก่ แพลทินัม แพลเลเดียม โรเดียม อิริเดียม รูทีเนียม และออสเมียม การจัดเป็นกลุ่มเดียวกันเนื่องมาจากเป็นธาตุที่เกิดร่วมกัน และมีแหล่งแร่กำเนิดเดียวกัน ส่งผลทำให้มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกัน โลหะกลุ่มแพลทินัม จะอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันในตารางธาตุ โดยธาตุทั้ง 6 ชนิด อยู่ใน d-block กลุ่มที่ 8 9 และ 10 คาบที่ 5 และ 6 สำหรับการพิจารณาโลหะกลุ่มแพลทินัมที่มีสมบัติใกล้เคียงกัน สามารถแบ่งเป็นกลุ่มย่อย ตามแนวตั้งในตารางธาตุ ได้เป็น 3 คู่ ได้แก่ (1) แพลทินัมและแพลเลเดียม มีความนิ่ม ความเหนียว มีการต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน และการต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง (2) โรเดียมและอิริเดียม นำไปใช้งานค่อนข้างยาก และ (3) รูทีเนียมและออสเมียม มีความแข็ง เปราะ และไม่ต้านทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โลหะในกลุ่มนี้จัดอยู่ในกลุ่มโลหะมีค่า เช่นเดียวกับทองคำและเงิน เนื่องจากเป็นโลหะที่หายาก มีสมบัติดีหลายประการ ส่งผลทำให้ราคาสูง สมบัติเด่นของโลหะกลุ่มแพลทินัม คือ มีความหนาแน่น อุณหภูมิหลอมเหลวสูง ความทนทานสูง มีความต้านทานต่อการสึกหรอสูง มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน มีสมบัติที่ดีมากในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) และมีความสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อร่างกายได้จากสมบัติที่ดีหลายประการ จึงมีการนำมาใช้ประโยชน์มากมายหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องประดับ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมทางเคมี อุตสาหกรรมปิโตรเลียม อุตสาหกรรมแก้ว งานทางการแพทย์และงานทันตกรรม เป็นต้น โดยเฉพาะโลหะแพลทินัมจะถูกนำมาใช้อย่างมากในงานเครื่องประดับ ซึ่งโดยทั่วไปจะกำหนดความบริสุทธิ์เช่นเดียวกับโลหะทองผสม โดยที่จะต้องมีความบริสุทธิ์ของโลหะแพลทินัมในตัวเรือนเครื่องประดับ อย่างน้อย 85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ยกเว้นในประเทศสหรัฐอเมริกา จะกำหนดความบริสุทธิ์ของโลหะแพลทินัมในตัวเรือนเครื่องประดับ อย่างน้อย 95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในส่วนเปอร์เซ็นต์ที่เหลือจะมีการเติมธาตุอื่นลงไป โดยธาตุที่เติมลงไป ได้แก่ โลหะ

ตัวอื่นในโลหะกลุ่มแพลทินัม เช่น แพลเลเดียม รูทีเนียม และอิริเดียม เป็นต้น นอกจากนี้ก็จะมีทองคำ และโลหะพื้นฐานอื่นๆ เช่น ทองแดง ซึ่งธาตุที่เติมลงไปมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความแข็ง และความยืดหยุ่น หรือมีความเป็นสปริง (Springiness) ซึ่งโลหะผสมเหล่านี้สามารถนำไปขึ้นรูปในงาน เครื่องประดับด้วยวิธีการที่หลากหลาย เช่น การหล่อ การอัดรีด การดึง เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถที่จะ ทำการขึ้นรูปหรือปรับปรุงคุณภาพที่ต้องการให้มีการให้ความร้อนและทำให้เย็นตัวหลายๆ ครั้งได้ โดยไม่มีผลต่อ เรื่องความแข็งแรงและการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ข้อดีอีกประการหนึ่งในการที่ตัวเรือนเครื่องประดับทำจากโลหะแพลทินัมผสม คือในส่วนของตัว เรือนที่มีความบางจะยังสามารถรักษารูปร่างได้ดี ซึ่งจะแตกต่างกับโลหะชนิดอื่นๆ จึงทำให้มีความเหมาะสม ในการที่จะฝังเพชร นอกจากนี้ยังสามารถทำการฝังหิน ซึ่งเป็นการฝังหรือยึดอัญมณีกับตัวเรือนแหวน ด้วยความต้านทานแรงดึง ทำให้มีประโยชน์กับนักออกแบบจะมีความอิสระในการออกแบบมากขึ้น [14, 27, 28] โลหะแพลทินัมผสมจะถูกนำไปใช้ในงานเครื่องประดับ โดยจะเน้นที่สมบัติเชิงกลเป็นหลัก ได้แก่

- โลหะผสมแพลทินัม-อิริเดียม โดยมีการเติมอิริเดียมลงในแพลทินัม ไม่ควรมากเกินไปกว่า 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ถ้ามีการเติมอิริเดียมลงไป 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรง และความต้านทานแรงดึงสูงมาก แต่จะนำไปใช้งานได้ค่อนข้างยาก และถ้าหากมีการเติมอิริเดียมมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้สมบัติความยืดหยุ่น หรือมีความเป็นสปริงสูงและไม่สามารถนำมาใช้ งานได้เช่นกัน ดังนั้นโลหะผสมแพลทินัม-อิริเดียมที่นิยมใช้ในงานเครื่องประดับ มักจะเติมอิริเดียมลงไป 5 เปอร์เซ็นต์ และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยเฉพาะในประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีการคำนึงเรื่องความ บริสุทธิ์ของแพลทินัมค่อนข้างสูง โลหะแพลทินัมผสมอิริเดียม ที่มีแพลทินัมอยู่ 900 ส่วน (90 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก) และอิริเดียมอยู่ 100 ส่วน (10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) หรือ Pt900/Ir เป็นโลหะผสมที่มีความ แข็ง แต่ก็สามารถทำการขัดเงาได้ง่าย และมีความสามารถในการตีแผ่ สำหรับในการฝังอัญมณี ไม่ต้อง ใช้แรงมากเมื่อเทียบกับโลหะผสมที่มีความแข็งชนิดอื่น มีความต้านทานต่อการขีดข่วน การสึกหรอและการ โค้งงอ โลหะผสมชนิดนี้เหมาะกับการขึ้นรูปด้วยการหล่อและขึ้นรูปด้วยมือ ส่วนโลหะแพลทินัมผสมอิริเดียม ที่มีแพลทินัมอยู่ 950 ส่วน (95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และอิริเดียมอยู่ 50 ส่วน (5 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก) หรือ Pt950/Ir เป็นโลหะผสมที่มีความแข็งแรงปานกลาง ซึ่งมีความสามารถในการตีแผ่และเหมาะ กับงานขึ้นรูปด้วยมือ เป็นโลหะผสมที่เหมาะสมกับงานฝังที่มีลวดลายละเอียด มีความต้านทานต่อการขีดข่วน การสึกหรอ และการโค้งงอได้ แต่ก็น้อยกว่า Pt900/Ir แต่มีข้อดีในการยึดอัญมณีถ้าหากได้รับแรงกระแทก และก็สามารถขึ้นรูปด้วยการหล่อได้เช่นเดียวกัน แต่ถ้าต้องการเติมอิริเดียมลงไปปริมาณที่สูงขึ้นถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ควรมีการเติมโรเดียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก รวมด้วย จะให้ความแข็งแรงและ ความต้านทานแรงดึงอยู่ในระดับดี มีสมบัติความยืดหยุ่น เป็นสปริงน้อยลง ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้ดี และยังคงรักษาความเหนียวให้อยู่ในเกณฑ์ที่ดี มีเปอร์เซ็นต์การยึดตัวอยู่ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ ถ้าโลหะผสมนี้ อยู่ในลักษณะที่เป็นแผ่น จะสามารถรีดให้มีความหนาตลอดจนถึง 0.0005 นิ้ว หรือ 0.0127 มิลลิเมตร และ ถ้าเป็นลักษณะเส้นลวด จะสามารถลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลงจนถึง 0.001 นิ้ว หรือ 0.0254 มิลลิเมตร

- โลหะผสมแพลทินัม-รูทีเนียม การเติมรูทีเนียมลงไปแพลทินัม ลงไปในปริมาณที่ 5 เปอร์เซ็นต์ และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะพบว่าโลหะผสมดังกล่าวมีความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น และยังคงรักษาความเหนียวอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ในกรณีที่โลหะผสมแพลทินัมผสมที่มีความบริสุทธิ์สูง คือ โลหะ

แพลทินัมผสมรูทีเนียมที่มีแพลทินัมอยู่ 950 ส่วน (95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และรูทีเนียมอยู่ 50 ส่วน (5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) หรือ Pt950/Ru เป็นโลหะผสมที่มีแข็งสูงมาก มีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงที่สุดในกลุ่มโลหะแพลทินัมผสม ทำให้ขึ้นรูปด้วยการหล่อได้ยาก หรือแม้กระทั่งทำการเชื่อมก็ทำได้ยาก มีสีเทาเข้มกว่าโลหะผสมแพลทินัม-อิริเดียม มีความสามารถในการตีแผ่ได้น้อย เนื่องจากโลหะผสมชนิดนี้มีความแข็งสูงมาก ทำการขัด การตะไบ การเจาะก็ทำได้ยากเช่นกัน สำหรับงานฝังอัญมณี ควรฝังเพชร เพราะต้องใช้แรงมากในขั้นตอนการฝัง และถ้าหากเป็นพลอยอาจจะเกิดความเสียหายได้ นอกจากนี้ มีความต้านทานต่อการขีดข่วน การสึกหรอ และการโค้งงอได้ดีมากที่สุด

- โลหะผสมแพลทินัม-โคบอลต์ โลหะผสมแพลทินัมผสมโคบอลต์ ที่มีแพลทินัมอยู่ 950 ส่วน (95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และโคบอลต์อยู่ 50 ส่วน (5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) หรือ Pt950/Co เป็นโลหะผสมที่มีความแข็งปานกลาง มีจุดไหลตัวต่ำ ทำให้ขึ้นรูปด้วยการหล่อสำหรับชิ้นงานที่มีรายละเอียดมากได้ดี แต่ไม่ค่อยเหมาะกับการขึ้นรูปด้วยมือ โลหะผสมชนิดนี้ เกิดการหมองได้ถ้าหากได้รับความร้อน ดังนั้นในกระบวนการขึ้นรูปที่ต้องใช้ความร้อน เช่น การเชื่อม จึงต้องใช้ฟลักซ์ (Flux) และการล้างด้วยสารเคมี และเนื่องจากโคบอลต์เป็นโลหะที่ไม่ได้อยู่กลุ่มเดียวกับโลหะกลุ่มแพลทินัม จึงต้องมีการแยกเศษโลหะออกจากโลหะแพลทินัม ใช้เวลาน้อยในการขัดเงา แต่ผิวจะมีสีเทาที่เข้มกว่าอิริเดียม สำหรับงานฝังอัญมณีจะใช้แรงปานกลางในการฝัง ในการขึ้นรูปสามารถใช้เครื่องมือเช่นเดียวกับโลหะทอง และมีความทนทานต่อการสึกหรอ

สำหรับในงานเครื่องประดับ โลหะที่มีสีเงินเป็นที่ได้รับความนิยมมาช้านานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งแพลทินัมมีข้อได้เปรียบโลหะเงินตรงที่ แพลทินัมมีความสามารถในการต้านทานต่อการหมองได้ดีกว่าเงิน อีกทั้งยังเป็นโลหะที่หายากและมีค่า ดังนั้นแพลทินัมจึงเป็นโลหะสีเงินที่ได้รับความนิยมสูง และตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทองคำสีขาวจึงถูกผลิตขึ้นมาเพื่อทดแทนแพลทินัม แต่ก็ยังไม่สามารถเทียบเท่ากับแพลทินัมได้ด้วยประการต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องความบริสุทธิ์ของเนื้อโลหะมีค่าที่เป็นที่ยอมรับให้ใช้งานเครื่องประดับแพลทินัมใช้เนื้อโลหะบริสุทธิ์ 85-95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่ทองผสมสีขาวที่ใช้ในงานเครื่องประดับนิยมที่ 18K ซึ่งมีความบริสุทธิ์ของทองคำอยู่ 75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนที่ 14K มีความบริสุทธิ์ของทองคำอยู่ 58.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อีกทั้งธาตุที่เป็นตัวเติมก็มักจะเป็นโลหะกลุ่มแพลทินัม ซึ่งมีสมบัติในการป้องกันแพ้ (Hypo-allergenic) ได้ดี ดังนั้นจึงเหมาะกับผู้ที่มีผิวที่แพ้ง่าย ส่วนทองคำสีขาวมีความบริสุทธิ์ของทองคำต่ำกว่า สัดส่วนที่เหลือเป็นโลหะชนิดอื่นๆ ซึ่งผู้ใช้มีโอกาสที่จะเกิดการอาการแพ้ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทองคำสีขาวที่มีการเติมนิกเกิล แพลทินัมมีความหนาแน่นสูงกว่าทองคำสีขาวในปริมาณเนื้อโลหะที่เท่ากัน ดังนั้นแพลทินัมจะหนักกว่าทองคำสีขาว นอกจากนี้แพลทินัมมีสีเงินตามธรรมชาติสีไม่เปลี่ยน และหากความเงางามลดลง ก็สามารถนำไปขัดขึ้นเงาได้อีก ในขณะที่ทองขาว เกิดขึ้นจากการเติมธาตุที่ทำหน้าที่เป็นสารฟอกขาว และสีที่ได้ก็เป็นสีขาวที่มีสีเหลืองอ่อนปน ดังนั้นจึงนิยมชุบเคลือบด้วยโรเดียม และเมื่อมีการใช้งานไปในระยะหนึ่งจะเกิดการลอกของผิวที่ทำการชุบเคลือบ ปกติแล้วแพลทินัมนิยมใช้ทำแหวนหมั้นและแหวนแต่งงาน โดยมีราคาสูงกว่าทองคำสีขาว ประมาณ 2 เท่า แต่แพลทินัมไม่ค่อยได้รับความนิยมในการนำไปทำต่างหู เข็มกั๊ต สร้อยข้อมือ หรือสร้อยคอ เนื่องจากเรื่องน้ำหนักและราคา หรือถ้าหากใช้ก็อาจจะเป็นส่วน [27, 28]

นอกจากนี้แพลทินัมยังสามารถทำให้เกิดสีอื่นๆ ได้ด้วยการเกิดสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกที่มีโครงสร้างแคลเซียมฟลูออไรด์ เช่นเดียวกับทองคำ ได้แก่ แพลทินัมสีเหลือง จากแพลทินัมอะลูมิเนียม (PtAl_2) แพลทินัม-กาลเลียม (PtGa_2) และแพลทินัม-อินเดียม (PtIn_2) นอกจากนี้ สารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกที่ประกอบไปด้วยโลหะ 3 ชนิด และ 4 ชนิด โดยมีแพลทินัมเป็นองค์ประกอบ ก็สามารถทำให้เกิดสีที่หลากหลายได้เดียวกัน เช่น PtLiIn_2 มีสีชมพู PtMgSb มีสีม่วง $\text{PtLi}_{0.5}\text{MgSn}$ มีสีแดงเข้ม เป็นต้น [25, 29]

โลหะเงินและเงินผสม

ในสมัยโบราณได้ค้นพบโลหะเงินหลังจากพบโลหะทองคำและทองแดงได้ไม่นานนัก ชาวอียิปต์ให้ทองคำมีสัญลักษณ์วงกลม ซึ่งหมายถึงโลหะที่สมบูรณ์แบบ ส่วนโลหะเงินได้ให้สัญลักษณ์เป็นครึ่งวงกลม เพื่อแสดงว่าโลหะเงินเป็นโลหะที่มีความสมบูรณ์แบบรองจากทองคำ นอกจากนี้ครึ่งวงกลมยังเปรียบได้กับดวงจันทร์ และโลหะเงินมีความแวววาวสูงหรือมีความสว่างคล้ายพระจันทร์นั่นเอง ส่วนชาวโรมันจะเรียกโลหะเงินว่า Argentum อันเป็นที่มาของสัญลักษณ์ Ag ในทางเคมี โลหะเงินบริสุทธิ์ (Fine Silver) จัดเป็นโลหะมีค่า มีความขาว (Whiteness) และความแวววาว (Luster) ที่สุด ในบรรดาโลหะทั้งหมด เงินบริสุทธิ์มีความสามารถในการสะท้อนแสงดีเยี่ยม สำหรับความสามารถในการรีดหรือตีแผ่เป็นแผ่น และความสามารถในการดึงเป็นเส้นหรือความเหนียวของโลหะเงินนั้นเป็นรองเพียงแคโลหะทองคำเท่านั้น ทำให้โลหะเงินตีเป็นแผ่นบางๆ และดึงเป็นเส้นได้ง่ายมาก เงินบริสุทธิ์สามารถนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดีที่สุด แต่เนื่องจากมีราคาสูงจึงไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ในด้านนี้มากนัก โลหะเงินที่บริสุทธิ์จะมีโลหะเงินเป็นส่วนผสม 999 ส่วน จาก 1000 ส่วน และโลหะเงินที่มีความบริสุทธิ์สูงจะมีโลหะเงินสูงถึง 999.5 ส่วน ซึ่งเป็นเกรดที่ไว้สำหรับนักสะสม เงินบริสุทธิ์มีจุดหลอมเหลว 962 องศาเซลเซียส

ในยุคก่อน โลหะเงินบริสุทธิ์ได้ถูกใช้เป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนซื้อขายสินค้าต่างๆ ต่อมาได้นำโลหะเงินผสม (Silver alloys) ชนิดต่างๆ มาใช้แลกเปลี่ยนสินค้า ทำให้คนไม่มั่นใจในความบริสุทธิ์ของเนื้อเงินมากนัก จึงได้มีกฎหมายเกี่ยวกับมาตรฐานเหรียญกษาปณ์เงินขึ้น โดยต้องมีเนื้อโลหะเงินบริสุทธิ์ผสมอยู่ 92.5 หรือ 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีโลหะชนิดอื่นซึ่งโดยปกติจะเป็นโลหะทองแดงเป็นส่วนผสมที่เหลือ โดยปกติเหรียญกษาปณ์ทำจากโลหะเงิน 90 เปอร์เซ็นต์ผสมกับโลหะทองแดงอีก 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (90wt.%Ag-10wt.%Cu) โลหะเงินถูกนำไปเป็นส่วนผสมทำสารประกอบทางเคมี ทำอุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพราะสามารถนำไฟฟ้าได้ดี และยังสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้ฉาบกระจกทำกระจกเงา ใช้ในอุตสาหกรรมภาพถ่าย รวมถึงใช้ทำโลหะอมัลกัมที่ใช้อุดฟัน (Dental amalgam) ในทางทันตกรรม ซึ่งมีทองแดงและดีบุกเป็นส่วนผสมหลัก นอกจากนี้โลหะผสมเงิน-ทองแดงที่จุดยูเทกติก (Eutectic point) ซึ่งเป็นโลหะผสมที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบ 28.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีจุดหลอมเหลวต่ำมาก เพียง 779.1 องศาเซลเซียส จึงนิยมนำมาทำเป็นโลหะประสาน (Solder)

จากที่โลหะเงินเป็นโลหะมีค่า มีสีขาวแวววาวและมีสมบัติในด้านความสวยงาม ทำให้นิยมนำมาผลิตเป็นเครื่องประดับโดยการขึ้นรูปด้วยมือ (Handmade) แต่โลหะเงินบริสุทธิ์มีความอ่อนนิ่มมาก ไม่เหมาะกับการนำไปใช้เป็นเครื่องประดับชนิดต่างๆ เพราะเครื่องประดับที่อ่อนนิ่มจะเสียรูปและถูกขูดขีดเป็นรอยได้ง่าย ดังนั้นช่างทำเครื่องประดับจึงได้เติมโลหะชนิดอื่นผสมกับโลหะเงินแล้วหลอมรวมกันได้เป็น

โลหะเงินผสม เพื่อเพิ่มความแข็งแรง (Strength) และความแข็ง (Hardness) ให้กับโลหะเงิน โลหะที่นิยมเติมลงไปเป็นเนื้อเงินเพื่อเพิ่มสมบัติดังกล่าวคือโลหะทองแดง หากเติมทองแดงลงไปปริมาณเพียงเล็กน้อยจะทำให้โลหะผสมมีความแกร่ง (Toughness) เพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ยังคงความสามารถในการตีแผ่และความแวววาวของโลหะผสมไว้ โลหะเงินผสมที่นิยมนำมาใช้ผลิตเป็นเครื่องประดับ คือ โลหะเงินสเตอร์ลิง (Sterling silver) หรือเรียกว่า โลหะเงิน 925 โลหะเงินผสมชนิดนี้มีปริมาณเงินบริสุทธิ์ผสมอยู่ 92.5 เปอร์เซ็นต์ อีก 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักคือโลหะทองแดง โลหะเงินสเตอร์ลิงมีจุดหลอมเหลวประมาณ 893 องศาเซลเซียส ในสมัยศตวรรษที่ 12 ประเทศอังกฤษได้ใช้เงินสเตอร์ลิง เป็นโลหะเงินผสมมาตรฐาน และยังกลายเป็นมาตรฐานให้กับชาติตะวันตกด้วย นอกจากนี้ที่ประเทศสหรัฐอเมริกายังใช้ โลหะเงิน 900 (Coin silver 900) ซึ่งมีเงินบริสุทธิ์ 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นมาตรฐานในการผลิตเหรียญเงินจนถึงปี ค.ศ. 1966 แต่ในปัจจุบันไม่ได้ใช้โลหะเงินในการผลิตเหรียญแล้ว สำหรับในประเทศอื่นมีการผลิตเหรียญเงินจากโลหะเงิน 800 (Coin silver 800) ที่มีปริมาณเงินบริสุทธิ์ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากที่โลหะเงินเป็นโลหะมีค่าและมีราคาแพง จึงได้นำโลหะนิกเกิล (Nickel) และอะลูมิเนียม (Aluminium) มาผลิตเหรียญแทนโลหะเงิน นอกจากนี้ในสมัยกรีกและโรมันโบราณ มีโลหะเงินผสมที่เรียกว่า อิเล็กตรัม (Electrum) เป็นโลหะผสมระหว่างเงินและทองคำ แต่ถ้าหากผสมแพลทินัมบริสุทธิ์ 1 ส่วนเข้ากับเงินบริสุทธิ์ 2 ส่วน จะได้โลหะเงินผสมที่แข็งและปราศจากออกไซด์ (Oxide-free silver) แต่จุดหลอมตัวของโลหะผสมจะสูงถึง 1119 องศาเซลเซียส ส่วนโลหะเงินผสมเบริลเลียม 1 เปอร์เซ็นต์ (Beryllium silver) จะทำให้โลหะผสมแข็งและไม่หมอง และในช่วงปลายศตวรรษที่ 17 จนถึงต้นศตวรรษที่ 18 ประเทศอังกฤษได้ผลิตเครื่องประดับจากโลหะผสมเงินบริแทนเนีย (Britannia silver) และใช้เป็นมาตรฐานมาจนถึงปัจจุบันในประเทศเครือจักรภพอังกฤษ [30, 31]

โลหะเงินสเตอร์ลิง (โลหะเงิน 925) เป็นโลหะผสมเงิน-ทองแดงที่นำมาใช้ผลิตเครื่องประดับอย่างแพร่หลาย และในมาตรฐานสำหรับงานเครื่องประดับ เงินสเตอร์ลิงต้องมีปริมาณเงินบริสุทธิ์ผสมอยู่ไม่ต่ำกว่า 92.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณทองแดงที่ผสมลงไปทำให้โลหะผสมมีค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่าความแข็ง (Hardness) สูงขึ้น ทำให้โลหะเงินไม่อ่อนนิ่มเกินไป [32] เมื่อขึ้นรูปเป็นเครื่องประดับแล้วสามารถคงรูปร่างได้ดีและไม่เกิดรอยขีดข่วนได้ง่าย อย่างไรก็ตามปริมาณทองแดงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติด้านความเหนียวคือค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) ลดลง และค่าความหนาแน่น (Density) จะลดลงเล็กน้อย [33] กลไกที่ทำให้โลหะเงินสเตอร์ลิงมีความแข็งแรงและความแข็งสูงกว่าเงินบริสุทธิ์ คือการเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งด้วยการละลายของธาตุในสารละลายของแข็ง (Solid solution strengthening/hardening) และการเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งด้วยการตกตะกอน (Precipitation strengthening/hardening) จากการอบชุบด้วยความร้อน (Heat treatment) โดยกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอนของเงินสเตอร์ลิง มี 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 อบให้ความร้อนแก่โลหะเงินสเตอร์ลิงที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 ถึง 60 นาที เพื่อทำให้ได้โลหะเนื้อเดียวที่เป็นสารละลายของแข็งอย่างสมบูรณ์ เรียกขั้นตอนนี้ว่า Solution treatment

ขั้นตอนที่ 2 ชุบแข็งโดยจุ่มชิ้นงานในน้ำเย็น เพื่อให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ป้องกันการตกตะกอนของเฟสทองแดง ทำให้เงินสเตอร์ลิงมีความแข็งสูงขึ้น เรียกขั้นตอนนี้ว่า Quenching

ขั้นตอนที่ 3 ให้ความร้อนอีกครั้ง แต่ใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าขั้นตอนแรก เรียกว่า การบ่มเพิ่ม ความแข็งแรง (Aging) โดยอบบ่มที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ถึง 2 ชั่วโมง จะทำให้ โลหะมีความแข็งแรงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

กระบวนการอบชุบทางความร้อนสามารถทำให้โลหะเงินผสมแข็งแรงและแข็งขึ้นได้ แต่มีข้อควรระวังในการทำ เช่น ระวังเกิดผิวออกไซด์ที่ไม่สามารถจัดออกได้ง่าย ขณะอบบ่มจำเป็นต้องทาด้วยสารพวกบอแรกซ์เพื่อป้องกันผิวดำ ควรใช้เตาอบมากกว่าใช้หัวไฟเป่าเพราะเตาอบสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดีกว่า ควรทำเป็นขั้นตอนสุดท้ายเพราะหากได้รับความร้อนจากการเชื่อมประกอบตัวเรือนหลังอบบ่มจะทำให้โลหะเงินผสมอ่อนนิ่มลงได้ นอกจากทองแดงที่เป็นธาตุผสมที่เติมเข้าไปในโลหะเงินแล้วมีผลต่อความแข็งแรงและความแข็งของโลหะผสม ยังมีธาตุผสมชนิดอื่นๆ ที่เติมลงไปนโลหะเงิน แล้วมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความแข็งแรงของโลหะเงินผสมเช่นเดียวกัน ธาตุเหล่านี้ได้แก่ ทองคำ (Au) แคดเมียม (Cd) แพลเลเดียม (Pd) พลวง (Sb) ดีบุก (Sn) และสังกะสี (Zn) เป็นต้น ซึ่งพบว่าธาตุผสมพวกทองคำ แคดเมียม ทองแดง และแพลเลเดียม สามารถเติมลงไปนโลหะเงินได้สูงถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้สูงขึ้นกว่าเดิมมาก ส่วนธาตุผสมพวกแพลเลเดียม แคดเมียม พลวง ดีบุก และสังกะสี ที่เติมลงในโลหะเงินในปริมาณเพียงเล็กน้อยก็สามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงของโลหะผสมได้สูงมาก เช่น เติมแพลเลเดียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หรือแคดเมียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลงในเงินบริสุทธิ์ หรือเติมสังกะสีลงในเงินบริสุทธิ์เพียง 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้ได้โลหะเงินผสมที่มีค่าความต้านทานแรงดึง 180 MPa ในขณะที่หากเติมแพลเลเดียม 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้ได้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงถึง 270 MPa หากเติมธาตุเบริลเลียม (Be) และดีบุกลงไปนโลหะเงินผสม แล้วนำไปอบชุบด้วยกระบวนการทางความร้อน พบว่านอกจากสมบัติในด้านความแข็งแรงและความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นแล้ว ยังมีผลต่อการเพิ่มสมบัติความเหนียว (Modulus of resilience) ให้โลหะเงิน-ทองแดง-เบริลเลียม-ดีบุกได้อีกด้วย [34-35]

การผลิตเครื่องประดับจากโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งการหลอมด้วยเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction furnace) ซึ่งสามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว ควบคุมส่วนผสมของโลหะผสมและอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมได้ง่าย มีการสูญเสียโลหะในระหว่างหลอมน้อย เมื่อโลหะหลอมละลายแล้วก็สามารถหล่อลงแม่พิมพ์ได้ดี แต่หากไม่มีการควบคุมบรรยากาศในขณะที่หลอมหล่อโลหะ ปล่อยให้ออกซิเจนเข้ามาในระบบหรือใช้อุณหภูมิในการหลอมที่สูงเกินไป จะทำให้ออกซิเจนละลายเข้าไปในเนื้อโลหะหลอมเหลว ก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ ปกติโลหะเงินไม่สามารถดูดซับออกซิเจนได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อหลอมโลหะเงินให้ละลาย จะทำให้ออกซิเจนละลายในโลหะเงินได้มากขึ้น [36] ปัญหาที่พบหลังการหล่อ เช่น เกิดคิวปริคออกไซด์ (Cupric oxide, CuO) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีสีเทาดำ และคิวปริสออกไซด์ (Cuprous oxide, Cu_2O) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีสีชมพูอมแดงบริเวณผิวหรือใต้ผิวของชิ้นงานหล่อ นอกจากออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยากับทองแดงในเงินสเตอร์ลิงแล้ว ยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับโลหะเงินซึ่งเป็นโลหะหลักได้ โดยเกิดสารประกอบเงินออกไซด์ (Argentous oxide, Ag_2O) มีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ และเงินเปอร์ออกไซด์ (Argentite, Ag_2O_2) ที่มีสีเทาดำ [39] สารประกอบออกไซด์เหล่านี้จะมีผลในการลดสมบัติทางกลและความสวยงามของโลหะเงินสเตอร์ลิงลง ฟิล์มคิวปริคออกไซด์สามารถกำจัดได้โดยการล้างด้วยกรดกำมะถันความเข้มข้น 7 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ส่วนฟิล์มคิวปริสออกไซด์ไม่สามารถใช้กรดล้างออกได้ แต่ต้องใช้วิธีการ

ทางกลคือการขัดผิวออก นอกจากนี้ปัญหาปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ละลายอยู่มากในโลหะเงินสเตอร์ลิง หลอมเหลว จะทำให้งานหล่อเครื่องประดับเงินสเตอร์ลิงเกิดรูพรุนเนื่องจากก๊าซ (Gas porosity) นอกจากออกซิเจนจะทำให้เครื่องประดับเงินเกิดปัญหาขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตแล้ว กำมะถันหรือซัลเฟอร์ (Sulfur) ที่เกิดขึ้นในบรรยากาศขณะผลิตเครื่องประดับหรือเกิดขึ้นจากวัสดุหล่อพิมพ์ผลิตภัณฑ์ ก็สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะเงินเกิดเป็นสารประกอบเงินซัลไฟด์ (Ag_2S) ซึ่งมีสีน้ำตาลเข้มแกมเขียวถึงดำ หรือเกิดปฏิกิริยากับโลหะทองแดงได้สารประกอบทองแดงซัลไฟด์ (CuS) ที่มีสีดำ ทำให้เครื่องประดับเงินสเตอร์ลิงมีสีดำหรือหมอง (Tarnish)

วิธีการแก้ไขปัญหาล้างต้น ไม่ว่าจะเป็นปัญหาการพ่นหรือปัญหาสารประกอบออกไซด์และซัลไฟด์ของเงินและทองแดงที่เกิดขึ้นในงานหล่อ คือการเติมธาตุผสม (Alloying element) บางชนิดที่จับตัวกับออกซิเจนได้ดีลงไป เพื่อให้ธาตุชนิดนี้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแทนเงินหรือทองแดง ซึ่งช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างเงินหรือทองแดงกับออกซิเจน และยังช่วยหน่วงปฏิกิริยาระหว่างเงินหรือทองแดงกับกำมะถันได้อีกด้วย การเกิดปฏิกิริยาระหว่างธาตุผสมกับออกซิเจนจะทำให้ได้ฟิล์มออกไซด์ของธาตุผสมนี้ที่ผิวโลหะ หากฟิล์มที่เกิดขึ้นมีสมบัติที่ดี เป็นฟิล์มที่ยึดเกาะติดผิวโลหะได้แน่น (Adherent film) และปกคลุมผิวโลหะเงินได้ดีไม่ยอมให้ออกซิเจนไต่ผ่านไปสัมผัสกับโลหะ (Impermeable) จะเรียกฟิล์มนี้ว่า ฟิล์มป้องกันผิว (Protective film) ป้องกันไม่ให้ออกซิเจนหรือซัลเฟอร์สัมผัสกับโลหะเงินหรือทองแดง ทำให้สามารถป้องกันการหมองได้ ธาตุผสมที่มีสมบัติดังกล่าว ได้แก่ สังกะสี (Zn) ซิลิคอน (Si) ฟอสฟอรัส (P) เจอร์เมเนียม (Ge) อะลูมิเนียม (Al) แคดเมียม (Cd) แมงกานีส (Mn) โบรอน (B) [35, 37-42] โดยธาตุต่างๆ เหล่านี้มีสมบัติเป็นตัวลดออกซิเจน (Deoxidizer/Deoxidant/Deoxidizing Agent) ส่วนธาตุเจอร์เมเนียมเป็นตัวลดออกซิเจนที่ดีมาก เพราะสารประกอบฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีความโปร่งใสป้องกันการหมองได้ดี แต่ธาตุเจอร์เมเนียมมีราคาสูง อย่างไรก็ตามได้มีผู้ผลิตโลหะเงินกันหมองที่มีส่วนผสมของเงิน 93.5 และ 96 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และส่วนผสมที่เหลือเป็นทองแดง เจอร์เมเนียม สังกะสี และโบรอน ออกมาขายและเป็นที่นิยม ซึ่งธาตุเจอร์เมเนียมที่เติมลงไปโลหะผสมเงินนี้ มีผลต่อการลดปริมาณออกไซด์ที่ผิวงานหล่อ เพิ่มความต้านทานการหมอง เพิ่มความเหนียว ทั้งยังสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยความร้อนได้ (เพิ่มความแข็งแรงและความแข็ง) ช่วยให้โลหะเงินผสมเชื่อมและขึ้นรูปได้ง่าย และยังเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากไม่ต้องชุบโลหะเพื่อป้องกันการหมองให้กับเครื่องประดับเงิน สมบัติทางกายภาพของโลหะบริสุทธิ์ชนิดต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2 [43]

ตารางที่ 2 แสดงสมบัติทางกายภาพของโลหะบริสุทธิ์ชนิดต่างๆ [43]

ธาตุ	สัญลักษณ์	เลขอะตอม	น้ำหนักอะตอม	จุดหลอมเหลว (°C)	ความหนาแน่นที่ 20 °C (g/cm ³)	รัศมีอะตอม (nm)	โครงสร้างผลึกที่ 20 °C
เงิน	Ag	47	107.87	962	10.49	0.144	FCC
ทองแดง	Cu	29	63.55	1085	8.94	0.128	FCC
สังกะสี	Zn	30	65.39	429	7.13	0.133	HCP
ซิลิคอน	Si	14	28.09	1410	2.33	0.118	Dia. Cubic
ฟอสฟอรัส	P	15	30.97	44.1	1.82	0.109	Ortho.
เจอร์เมเนียม	Ge	32	72.59	937	5.32	0.122	Dia. Cubic
อะลูมิเนียม	Al	13	26.98	660.4	2.71	0.143	FCC
แคดเมียม	Cd	48	112.41	321	8.65	0.149	HCP
แมงกานีส	Mn	25	54.94	1244	7.44	0.112	Cubic
โบรอน	B	5	10.81	2300	2.34	-	Rhomb.

โลหะทองแดงและทองแดงผสม (Copper and copper alloys)

โลหะทองแดงเป็นโลหะเก่าแก่ที่มนุษย์รู้จักเป็นชนิดแรกๆ โลหะทองแดงผสมที่เป็นที่รู้จักกันดีคือทองเหลือง และสัมฤทธิ์หรือบรอนซ์ ทองเหลืองคือโลหะผสมระหว่างทองแดงและสังกะสี ส่วนบรอนซ์คือโลหะผสมระหว่างทองแดงและดีบุก ทองแดงและฟอสฟอรัส ทองแดงและแมงกานีส เป็นต้น ในยุคหนึ่ง 1,000 ถึง 3,000 ปีก่อนคริสตกาล มีการใช้งานโลหะสัมฤทธิ์หรือบรอนซ์มากและนำมาทำเป็นเครื่องประดับ จนเรียกยุคประวัติศาสตร์ช่วงนั้นว่ายุคสัมฤทธิ์ (Bronze age) ในสมัยก่อนมีการใช้งานทองแดงอย่างมากไม่ว่าจะนำทองแดงมาทำเป็นเครื่องครัว ภาชนะต่างๆ มีทั้งการใช้ทองแดงบริสุทธิ์และทองแดงผสม เช่นทองเหลือง บรอนซ์ จะเรียกโลหะนั้นว่าเป็นทองแดงก็ต่อเมื่อมีทองแดงบริสุทธิ์ผสมอยู่ไม่ต่ำกว่า 99.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โลหะทองแดงและทองแดงผสมสามารถนำไปหล่อขึ้นรูป (Cast) รีดเป็นแผ่น (Roll) หรือดึงเป็นเส้น (Draw) เพื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ง่าย ในบรรยากาศทั่วไป ทองแดงจะทำปฏิกิริยากับบรรยากาศภายนอกเกิดเป็นสารประกอบทองแดงออกไซด์ (Copper oxide) ซึ่งมีสีเทาดำจนถึงสีชมพูอมแดง ทองแดงคาร์บอเนต (Copper carbonate) ซึ่งมีผิวสีเขียวหากบรรยากาศที่โลหะสัมผัสสะอาด เรียกลักษณะนี้ว่าเป็นพาทินาสีเขียว (Green patina) หากบรรยากาศที่โลหะสัมผัสไม่สะอาดจะเกิดสารประกอบทองแดงซัลไฟด์ (Copper sulfide) ขึ้น ส่วนพาทินาที่เกิดขึ้นที่ผิวของโลหะสัมฤทธิ์จะมีสีน้ำตาลเข้มเหมาะกับการขึ้นรูปต่างๆ โลหะทองแดงบริสุทธิ์นำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีมากกว่าทองแดงเงิน ทองแดงมีความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion resistance) ดี และมีความแข็งแรงที่เหมาะสม โครงสร้างผลึกแบบ Face-

centered cubic (FCC) ทำให้ทองแดงมีความเหนียว (Ductility) และความแกร่ง (Toughness) สูง ต้านทานต่อความล้า (Fatigue resistance) ได้ดี และสามารถขึ้นรูปเย็น (Cold working) ได้ หากอบอ่อน (Anneal) จะได้ทองแดงที่อ่อนนิ่มและเหนียว (Soft and ductile) เมื่อเติมธาตุผสมสังกะสีลงในทองแดงจะได้ทองเหลือง โดยที่ธาตุสังกะสีสามารถละลายในทองแดงได้สูงสุด 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หากเติมธาตุผสมดีบุกหรือธาตุบางชนิดลงในทองแดงจะได้บรอนซ์ โดยทองเหลืองและบรอนซ์ที่ได้จะมีความแข็งแรงมากขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงของทองเหลืองจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณสังกะสีมากขึ้นจนถึงปริมาณสังกะสี 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วความแข็งแรงจะลดลง [43, 44]

ทองเหลืองแบ่งได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ ได้แก่ ทองเหลืองแอลฟา (Alpha brass) ซึ่งมีสังกะสีผสมอยู่ไม่เกิน 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนทองเหลืองอีกกลุ่ม คือ ทองเหลืองบีตา (Beta brass) ซึ่งมีสังกะสีผสมอยู่มากกว่า 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทองเหลืองแอลฟาจะมียืดตัว (% Elongation) ที่น้อยกว่ามีความเหนียวสูงกว่าทองเหลืองบีตา ส่วนทองเหลืองบีตา มีความเหนียวน้อยกว่าและความแข็งแรงสูงกว่าทองเหลืองแอลฟา ทองเหลืองที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ทองเหลืองกิลด์ดิง (Gilding metal) ซึ่งมีสีทอง ใช้ทำเหรียญหรืองานเครื่องประดับที่ต้องชุบทองคำ ทองเหลืองนูโกลด์ (Nu-Gold) เป็นโลหะที่ทำเลียนแบบทอง เรียกว่าโลหะที่ทำด้วยทองปลอม (Pinchbeck metal) ทองเหลืองสีแดง (Red brass) ใช้ทำแท่งสำหรับงานเชื่อม อุปกรณ์ตกแต่ง มีความต้านทานการกัดกร่อนดีมาก ทองเหลืองคาร์ทริดจ์ (Cartridge brass) มีความเหนียวสูงมาก ใช้ผลิตเส้นลวด ทองเหลืองชนิดนี้มักใช้ผลิตเครื่องดนตรีทองเหลือง ลูกกระสุนปืน ทองเหลืองมันซ์ (Muntz metal) ใช้ทำแท่งเชื่อมและชิ้นส่วนสำหรับใช้ตกแต่งงานก่อสร้าง ทองเหลืองนาวิ (Naval brass) ใช้ทำแท่งสำหรับเชื่อมและตกแต่งงานก่อสร้างรวมทั้งใช้ในงานติดตั้งประกอบเรือ ทองเหลืองโรมัน (Roman brass) เป็นทองเหลืองโบราณซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงกับทองเหลืองนาวิ ทองเหลืองผสมตะกั่ว (Leaded brass) เหมาะต่อการกลึง ไส กัด เจาะ ทองเหลืองบาช (Bath brass) ใช้ทำเครื่องจานชามชุบด้วยโลหะเงิน ส่วนทองเหลือง Yellow brass ใช้ผลิตสปริงและทำสกรู สำหรับทองเหลืองที่ใช้ผลิตเครื่องประดับเทียมหรือเครื่องประดับแฟชั่นนั้น มีทองแดงบริสุทธิ์ผสมอยู่ 87.5 เปอร์เซ็นต์ และสังกะสีอีก 12.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทองเหลืองที่ส่วนผสมนี้มีสีเหลืองอร่ามและเงางามมากเหมือนโลหะสัมฤทธิ์ จึงเรียกทองเหลืองชนิดนี้ว่า Jewelry Bronze ถึงแม้ว่าทองเหลืองชนิดนี้จะเป็นโลหะผสมของทองแดงและสังกะสีก็ตาม

บรอนซ์เป็นโลหะที่เก่าแก่ที่สุด มีการใช้งานหลากหลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน รวมถึงงานเครื่องประดับ บรอนซ์ที่ใช้งานโดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของทองแดง 90 เปอร์เซ็นต์ และดีบุกอีก 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก บรอนซ์มีสองกลุ่มคือ กลุ่มโลหะทองแดงผสมด้วยดีบุก และกลุ่มโลหะทองแดงที่ผสมด้วยธาตุชนิดอื่น สำหรับโลหะทองแดงผสมดีบุก สามารถเพิ่มความแข็งแรงของบรอนซ์ได้โดยการอบชุบความร้อนเช่นเดียวกับโลหะเงินผสม โดยให้ความร้อนเพื่อให้โลหะเป็นเนื้อเดียว (Homogenization) ที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส แล้วชุบแข็งอย่างรวดเร็วในน้ำ (Water quenching) ก็จะทำให้บรอนซ์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น บรอนซ์สมัยใหม่จะเติมธาตุฟอสฟอรัสในปริมาณเล็กน้อยเพื่อทำให้บรอนซ์มีความแข็งแรงและความเป็นสปริงสูงขึ้น จึงเรียกชื่อบรอนซ์ในกลุ่มนี้ว่าบรอนซ์ฟอสฟอรัส (Phosphor bronze) บรอนซ์ฟอสฟอรัสมีหลายชนิด ได้แก่ A, C, D และ E โดยที่ชนิด A ใช้กับงานแผ่น เส้นลวดและหลอด (ท่อกลวง) ขึ้นรูปเย็นได้ดี แต่ขึ้นรูปร้อนได้ไม่ดีนัก ชนิด C คล้ายกับชนิด A แต่แข็งแรงและแข็งแรงมากกว่า ชนิด D มีความแข็งแรงและ

ความแข็งสูงมาก ชนิด E นำไฟฟ้าได้ดีจึงนำไปทำเป็นสายไฟและตัวสัมผัสทางไฟฟ้า ขึ้นรูปเย็นและร้อนได้ดี บรอนซ์เบลล์ (Bell bronze) มีความแข็งและต้านทานการแตกได้ดี บรอนซ์โรมัน (Roman bronze) เป็นที่รู้จักว่าใช้ทำงานหล่อรูปปั้น บรอนซ์แมงกานีส (Manganese bronze) เป็นโลหะผสมที่มีทองแดง 95 เปอร์เซ็นต์ และแมงกานีส 5 เปอร์เซ็นต์ เหมาะที่จะนำไปใช้ในงานหล่อแต่มีราคาถูกเพราะเกิดรูปจากงานหล่อ [30]

การปรับปรุงสมบัติทางกลของทองเหลืองมีวิธีการเช่นเดียวกับในโลหะเงินผสม ยกตัวอย่างเช่น ทองเหลืองสีขาว (White brass) ที่มีส่วนผสม 68%Cu-17%Zn-15%Ni โดยน้ำหนัก และทองเหลือง Yellow brass ที่มีส่วนผสม 80%Cu-20%Zn โดยน้ำหนัก เมื่อหลอมและหล่อทองเหลืองทั้งสองชนิดแล้วนำไปอบชุบแข็งเป็นเวลา 10 และ 30 นาที พบว่าหากใช้เวลาอบชุบแข็งนานขึ้น จะทำให้สมบัติทางกลได้แก่ ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความต้านทานการโค้งงอ (Flexural strength) สูงขึ้น โดยหากอบชุบแข็งเป็นเวลาเท่ากัน จะพบว่า White brass มีสมบัติทางกลที่สูงกว่า Yellow brass ก็เนื่องจากมีโลหะนิกเกิลผสมอยู่ด้วยนั่นเอง [49] นอกจากการปรับปรุงสมบัติทางกลในทองเหลืองแล้ว ยังมีการพัฒนาสมบัติด้านความสวยงาม ทำให้ทองเหลืองมีสีแตกต่างกันออกไปขึ้นกับส่วนผสมของโลหะทองแดงผสม เช่น ผสมแล้วได้ทองเหลืองที่มีสีต่างๆ เช่น สีชมพู สีเขียว เป็นต้น ซึ่งเหมาะกับการนำไปผลิตเครื่องประดับเทียมหรือเครื่องประดับแฟชั่น อย่างไรก็ตามทองเหลืองสีพาสเทลเหล่านี้มีความต้านทานการหมอง (Tarnish resistance) ต่ำจึงจำเป็นต้องชุบเคลือบผิวด้วยแลกเกอร์เพื่อรักษาสภาพผิวไม่ให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือซัลเฟอร์ในบรรยากาศต่อไป

โลหะไทเทเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม

ไทเทเนียมเป็นโลหะชนิดหนึ่ง มีเลขอะตอม 22 ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1791 โดยถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลากหลายอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมสีทาบ้านและสีรถยนต์ (สารประกอบไทเทเนียมออกไซด์เป็นสารให้สีขาวทำให้รถยนต์สีขาวมักมีราคาแพงกว่าสีอื่นๆ) อุตสาหกรรมการแพทย์ และทันตกรรม (ใช้ทำกระดูก ข้อต่อและรากฟันเทียม) [43] และอุตสาหกรรมการบิน ด้วยสมบัติที่โดดเด่นของไทเทเนียมที่มีน้ำหนักเบา มีความแข็งสูงมาก ยากต่อการเกิดปฏิกิริยา ไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้ (Hypoallergenic) [45] และแร่ไทเทเนียมสามารถหาได้ง่ายกว่าโลหะมีค่าโดยกระจายอยู่ในเปลือกโลกชั้นบน ไทเทเนียมเป็นธาตุที่พบได้มากที่สุดอันดับต้นๆ ของธาตุทั้งหมดบนโลก เมื่อเทียบกับทองคำและแพลทินัมก็นับว่าไทเทเนียมสามารถพบได้ง่ายกว่ามาก ทำให้ราคาของโลหะมีค่าอย่างทองคำกับไทเทเนียมห่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ไทเทเนียมยังมีการใช้ในอีกรูปแบบหนึ่ง คือการใช้ในรูปสารประกอบซึ่งมีสีเฉพาะสามารถนำไปใช้เป็นส่วนประกอบเคลือบผิวได้ ตัวอย่างเช่น ไทเทเนียมไนไตรด์ (Titanium nitride, TiN) ซึ่งมักใช้ในการเคลือบผิวขอบหน้าปัดนาฬิกา ซึ่งการชุบไทเทเนียมไนไตรด์ลงบนขอบหน้าปัดหรือสายนาฬิกาจะทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นโลหะผิวสีทอง งาม มีความแข็ง ทนการขีดข่วน ทนความร้อนและเคมีที่ก่อให้เกิดความหมองได้ดี [46] นอกจากนี้การทำไทเทเนียมเกิดสารประกอบที่ผิวในสภาวะที่กำหนดจะส่งผลให้ไทเทเนียมซึ่งเป็นโลหะสีเงินเปลี่ยนเป็นสีต่างๆ ได้ เช่น การทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ที่ผิวจะควบคุมให้ไทเทเนียมมีสีดำได้ หรือการอะโนไดซ์ (Anodizing) สามารถทำให้ไทเทเนียมมีสีน้ำเงิน และสีแดงได้นอกจากนี้ยังสามารถใช้เลเซอร์ในการทำปฏิกิริยาเพื่อสร้างงานที่มีความละเอียดสูงอีกด้วย [47]

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าสมบัติข้างต้นของไทเทเนียมจะมีข้อดีมากมาย แต่ข้อดีเหล่านั้นก็ได้สร้าง ความ ยุ่งยากในการขึ้นรูปไทเทเนียมเองด้วยเนื่องจากจุดหลอมเหลวที่สูงและความแข็งที่มีมากนั้นทำให้ การขึ้นรูป ไทเทเนียมด้วยการหล่อ (Casting) เป็นไปด้วยความยากลำบาก ชัดให้ขึ้นเงาได้ยาก และมีต้นทุน การผลิต ที่สูง จึงต้องมีการใช้ธาตุอื่นๆ มาช่วยปรับปรุงสมบัติของไทเทเนียมให้สามารถใช้งานได้จริง โดย ธาตุที่เป็นที่นิยมมากที่สุดคือ อะลูมิเนียม วาเนเดียม (Vanadium) และ ไนโอเบียม (Niobium) เช่น Ti-6Al-4V (ใส่ธาตุอะลูมิเนียม 6% และ วาเนเดียม 4%) หรือ Ti-6V-7Nb (ใส่ธาตุวาเนเดียม 6% และ ไนโอเบียม 7%) ซึ่งจะทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น และขัดเงาได้ดีขึ้น

แต่ถึงผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้ว ผู้บริโภคควรทราบถึงข้อเสียของการใช้ไทเทเนียมอัลลอย เป็นวัสดุของเครื่องประดับ นั่นก็คือเครื่องประดับไทเทเนียมไม่สามารถปรับขนาดได้เหมือนโลหะชนิดอื่น และเนื่องจากมีความแข็งแรงสูงมาก จึงยากที่จะตัดออกในกรณีฉุกเฉินทางการแพทย์ โดยในอดีตมีกรณีของการ ถอดแหวนไทเทเนียมในกรณีฉุกเฉินหลายวิธี ตั้งแต่ใช้เลื่อยไฟฟ้าขนาดเล็ก เลื่อยสำหรับทันตกรรม คีม หรือวิธีอื่นๆ ที่ไม่ทำลายแหวน เช่น การใช้สารหล่อลื่น ก็ล้วนเสี่ยงต่ออาการบาดเจ็บของคนไข้ ทั้งจาก อาการบวมของนิ้ว ผลลึกลับ และผลจากความร้อนจากการตัด วิธีที่จะก่อให้เกิดอาการบาดเจ็บน้อยที่สุด คือการใช้คีมตัดแหวนก่อนล่างออกด้วยคลิปหนีบกระดาดขนาดใหญ่ ซึ่งเพิ่งค้นพบในปี ค.ศ. 2015 [48-50]

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมที่นิยมใช้ไทเทเนียมมากที่สุดคือ หน้าปัด และสายนาฬิกา เนื่องจาก ต้องการความคงทนสูง หรือใช้ทำแหวนแต่งงาน เนื่องจากความทนทานของไทเทเนียมสามารถสื่อถึงความรัก ที่มั่นคงถาวร รวมไปถึงการนำไปใช้ทำลูกบิดโลหะที่มีสีสดใสเพราะไทเทเนียมสามารถมีออกไซด์ที่ใสได้ดี อีกด้วย

โลหะผสมอีกหนึ่งชนิดที่ได้ถูกค้นพบในปลายศตวรรษที่ 20 และมีสมบัติที่น่าสนใจ นั่นคือ เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) โลหะผสมชนิดนี้เกิดจากการเติมธาตุโครเมียมมากกว่า 11 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ซึ่งจะทำให้เกิดแผ่นฟิล์มที่ช่วยต้านทานการกัดกร่อนของพื้นผิว เหล็กกล้าไร้สนิมมีส่วนผสม ที่หลากหลายขึ้นกับการใช้งาน เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (Martensitic stainless steel) เกรด 403 มีการผสมคาร์บอนและโมลิบดีนัมในโลหะ สามารถชุบแข็งและทนการกัดกร่อนได้ดี มักใช้ในการทำ ใบพัดอุตสาหกรรมการบิน ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel) เกรด 303 และ 304 ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ

เหล็กกล้าไร้สนิม หรือสแตนเลสสตีล จึงเป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่สามารถใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับได้ โดยข้อดีของโลหะผสมตระกูลนี้คือมีราคาถูกกว่าทั้งในเชิงวัสดุ และกระบวนการ มีความทนทานสูง ไม่เป็นสนิม อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปได้ง่าย ทำให้รูปแบบของเครื่องประดับสแตนเลสมีหลากหลาย เป็นที่ นิยมในกลุ่มเครื่องประดับแฟชั่น แต่ข้อเสียที่ไม่อาจมองข้ามของวัสดุชนิดนี้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับคือ อาจก่อให้เกิดอาการแพ้ निकิล (Nickel allergy) เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดคือ ชนิดออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel) เกรด 303 มีการใส่ निकิล เพื่อเพิ่มความเหนียวและความ โหลตัว โดยอาการแพ้ निकิลเป็นหนึ่งในอาการแพ้ที่พบได้มากที่สุดในโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับกลุ่มผู้หญิง ชาวยุโรปที่อาจพบผู้มีอาการแพ้สูงถึง 19 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนประชากร [51] นอกจากนั้นแม้เหล็กกล้า ไร้สนิมจะมีความคงทนแข็งแรงสามารถทนต่อปฏิกิริยาทางเคมีได้ดี แต่ไม่ค่อยทนต่อรอยขีดข่วน ทำให้เมื่อ ใช้งานเป็นระยะเวลาหนึ่ง เครื่องประดับจากโลหะผสมชนิดนี้มักเกิดรอยจนสูญเสียความเงางามไป

ในปัจจุบันงานวิจัยเกี่ยวกับเหล็กกล้าไร้สนิมมีการพัฒนาไปมาก รวมถึงในอุตสาหกรรมเครื่องประดับเองก็มีการวิจัยที่จะพยายามลดข้อเสียที่เด่นชัดที่สุดอย่างการแพ้ที่เกิดในการใช้โลหะกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิม โดยในปี ค.ศ. 2015 มีการค้นพบที่น่าสนใจว่า ปริมาณของนิกเกิลที่ถูกปล่อยออกมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมไม่ได้เกี่ยวข้องกับปริมาณนิกเกิลในโลหะผสมนั้นๆ แต่เกี่ยวข้องกับสัดส่วนของธาตุทุกชนิดในโลหะผสม โดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมในอุตสาหกรรมเครื่องประดับคือชนิดเกรด 303 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชนิดเกรด 304 ที่มีนิกเกิลปริมาณมากกว่ากลับพบว่าเกรด 304 มีการปล่อยนิกเกิลต่ำกว่าถึง 25 เท่า และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 303 จะยิ่งปล่อยนิกเกิลมากขึ้นเมื่อใช้งานไประยะเวลาหนึ่งจนเกิดการสึกกร่อนของผิว ทำให้ในปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 303 เริ่มมีการใช้ลดลงจากอุตสาหกรรมเครื่องประดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องประดับชนิดเจาะ เช่น ต่างหู หรือ หมุดเจาะสะดือ เป็นต้น โดยที่มีการเปรียบเทียบองค์ประกอบธาตุต่างๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 303 และ 304 ดังตารางที่ 3 [52]

ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบธาตุต่างๆ ในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 303 และ 304

เกรดเหล็กกล้าไร้สนิม	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
304	0.064	0.58	0.84	0.021	0.018	18.16	8.21	-	72.107
303	0.081	0.62	1.08	0.038	0.262	17.64	8.13	0.04	72.109

เนื่องจากนิกเกิลเป็นหนึ่งในโลหะที่สามารถพบอาการแพ้ได้มากที่สุด (ประกอบไปด้วย โคบอลต์ นิกเกิล โปรท และ โครเมียม) ในการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมในเชิงการแพทย์ ที่จะต้องมีความแข็งแรงสูงและมีภาวะการเข้ากันได้กับร่างกาย (Biocompatibility) ที่ดีเยี่ยม จึงได้มีการพัฒนาเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดไนโตรเจนสูงและปราศจากนิกเกิล (Nickel-Free, High Nitrogen stainless steel) ขึ้น ซึ่งนอกจากจะปราศจากอาการแพ้ที่เกิดแล้วยังมีความแข็งแรงและความทนต่อการกัดกร่อนมากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่มักถูกใช้ในทางการแพทย์แบบเดิม เนื่องจากไนโตรเจนเมื่ออยู่ในโลหะในปริมาณที่เหมาะสม (ประมาณ 1.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนต่อการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดี ซึ่งในปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดไนโตรเจนสูงและปราศจากนิกเกิลถูกทดลองใช้ในการทำศัลยกรรมหัวใจและหลอดเลือดของสัตว์ทดลองอยู่อีกด้วย [53-54]

นอกจากการปรับปรุงสมบัติของไทเทเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยการเติมธาตุต่างๆ แล้ว กระบวนการผลิตก็ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็วเพื่อให้สามารถผลิตชิ้นงานให้ได้คุณภาพสูงที่สุดและราคาต่ำที่สุดสำหรับไทเทเนียมซึ่งมีสมบัติที่ดีมากโดยธรรมชาติอยู่แล้ว การปรับปรุงคุณภาพของการผลิตจึงเป็นเรื่องของรูปแบบกระบวนการมากกว่าการปรับปรุงสมบัติโดยการเติมธาตุต่างๆ โดยที่เป็นที่นิยมอย่างมากที่สุดคือการหล่อ (Casting)

การหล่อ เป็นวิธีพื้นฐานที่ได้รับความนิยมมากที่สุดวิธีหนึ่งในการผลิตชิ้นงานเครื่องประดับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยมีสัดส่วนถึง 96 เปอร์เซ็นต์ ของการผลิตชิ้นงานเครื่องประดับ แต่วิธีนี้ก็กลับสร้างปัญหาอย่างมากเมื่อนำมาใช้กับโลหะไทเทเนียม เนื่องจากว่าเมื่อให้ความร้อนสูงเพื่อหลอมเหลวไทเทเนียม

ที่ผิวของโลหะมักจะเกิดปฏิกิริยากับธาตุที่ใช้เป็นเบ้าหลอมหรือแม่กระทังอากาศ ทำให้เกิดเฟสที่ไม่ต้องการ (Inclusion) และเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกร้าวได้ แม้จะมีการใช้สารประกอบออกไซด์อย่างซิลิกา (Silica) หรืออิตเทรียมออกไซด์ (Yttrium oxide) มาช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาก็ยังไม่ได้ผลดีมากนัก ในปี ค.ศ. 2019 มีการใช้อิตเทรียมอะลูมิเนต (Yttrium aluminate) มาขึ้นรูปเป็นเบ้าหลอม และเผาที่อุณหภูมิสูงจนเปลี่ยนสภาพกลายเป็นอิตเทรียมอะลูมิเนตการ์เนต (Yttrium aluminate garnet, YAG) ผสมกับคอร์รันดัม (Corundum) และได้ผลลัพท์ที่น่าพอใจคือลดการเกิดปฏิกิริยาที่ชั้นของผิวไทเทเนียมที่ไม่ต้องการได้มาก [55]

นอกจากการหล่อแล้วอีกหนึ่งรูปแบบที่ถูกพัฒนาขึ้นคือ การใช้ไทเทเนียมในรูปแบบที่ง่ายต่อการขึ้นรูปเครื่องประดับโดยการใช้ไทเทเนียมผง ซึ่งจะทำให้กระบวนการผลิตเปลี่ยนจากวิธีการหล่อหึงเป็นการกด/เผาผนึก (Press/Sintering) กระบวนการเผาผนึกผงไทเทเนียมจะช่วยแก้ปัญหาในเรื่องการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวที่ไม่ต้องการได้เป็นอย่างดี เพราะใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าการหล่อ

ในการใช้ผงไทเทเนียมผลิตชิ้นงานเครื่องประดับนั้น การควบคุมขนาดของผงให้เหมาะกับการใช้งานเป็นสิ่งสำคัญมาก ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ควรควบคุมขนาดผงให้มีขนาดเล็กประมาณ 22 ไมครอน แต่ในวิธีผลิตแบบแอดดิทีฟ (Additive manufacturing) ควรใช้ผงขนาด 40-150 ไมครอน เพื่อให้ชิ้นงานออกมาอย่างมีคุณภาพตามต้องการ [56]

การลากขึ้นรูป (Deep drawing) เป็นอีกหนึ่งวิธีการที่สำคัญในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ โดยวิธีนี้นิยมใช้ในการผลิตชิ้นส่วนข้อต่อ หรือหมามเตยเล็กๆ ที่ไม่มีความละเอียดมากนัก แต่ต้องการปริมาณมากและมีอัตราเร็วในการผลิตสูง วิธีนี้จะใช้แรงกดจากพUNCH ที่กดลงบนแผ่นโลหะที่ถูกจับยึดไว้เปลี่ยนรูปทรงของแผ่นโลหะไปตามที่ต้องการ แต่เมื่อนำกระบวนการนี้มาใช้กับไทเทเนียม ชิ้นงานมักจะเกิดการล้าจากการถูครูด (Fritting fatigue) นำไปสู่การเกิดรอยแตกของชิ้นงานได้ เพื่อแก้ปัญหานี้โลหะผสมไทเทเนียมจะต้องถูกนำไปให้ความร้อน (750 องศาเซลเซียส) เพื่อให้เกิดชั้นของไทเทเนียมออกไซด์ที่ผิวช่วยป้องกันไม่ให้เครื่องจักรสัมผัสผิวโลหะโดยตรง ป้องกันการเสียดสีจากการถูครูด นอกจากนั้นการให้ความร้อนเป็นบางส่วน (Partial heat) ระหว่างการลากขึ้นรูปสามารถช่วยเพิ่มสัดส่วนความลึกลับ (Drawing ratio) ของไทเทเนียมได้ และได้มากกว่าการให้ความร้อนทั้งชิ้นงาน (Whole heating) อีกด้วย [57-58] และเมื่อนำเทคนิคนี้มาใช้กับกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมก็พบว่าความเค้นสะสมที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะตอนขึ้นรูปสามารถทำให้สมบัติการป้องกันการกัดกร่อนลดลงจึงนำไปสู่การพัฒนากระบวนการลากขึ้นรูปแบบให้ความร้อน (Warm deep drawing) โดยการให้ความร้อนระหว่างกระบวนการ 500 องศาเซลเซียส (สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม) จะช่วยลดแรงกดที่จะต้องใส่ รวมถึงความเค้นสะสมในชิ้นงานได้ [59]

บทสรุป

เครื่องประดับถูกมนุษย์คิดค้น และนำมาใช้ตั้งแต่ยุคก่อนประวัติศาสตร์ จนถึงปัจจุบัน จากวิวัฒนาการการใช้เครื่องประดับ จะเห็นได้ว่า มนุษย์มีความชาญฉลาดในการนำวัสดุต่างๆ มาใช้ทำเป็นเครื่องประดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการนำแร่ธาตุที่พบในธรรมชาติ มาผ่านกระบวนการหลากหลายเพื่อให้ได้เป็นเครื่องประดับที่มีคุณค่า และมีความสวยงามอย่างที่เห็นกัน อย่างไรก็ตามเมื่อเครื่องประดับได้รับความนิยมมากทำให้มีผู้ใช้งานหรือผู้บริโภคเพิ่มมากขึ้นอย่างกว้างขวาง ก็จะพบว่าความต้องการของผู้บริโภคเครื่องประดับในแง่มุมต่างๆ ก็จะมีมากตามขึ้นไปด้วย ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติของวัสดุ จึงเป็นสิ่งจำเป็น

มากในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อให้ตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคให้มากที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ เครื่องประดับที่ทำจากโลหะเป็นกลุ่มที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคเป็นอย่างสูง ดังนั้นในบทความวิชาการนี้ จึงกล่าวถึงการปรับปรุงสมบัติของโลหะเพื่อใช้ในงานเครื่องประดับ โดยจะเลือกจากโลหะและโลหะผสมที่เป็นที่นิยม และเพื่อให้ครอบคลุมเครื่องประดับที่ทำจากโลหะ จึงมีการเน้นไปที่โลหะมีค่า เช่น ทองคำ แพลทินัม และเงิน สำหรับกลุ่มเครื่องประดับแท้ ส่วนในกลุ่มของเครื่องประดับเทียมหรือเครื่องประดับแฟชั่น จะกล่าวถึงทองแดงและทองแดงผสมนอกจากนี้ยังมีโลหะที่เป็นทางเลือกใหม่สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ได้แก่ ไทเทเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม

การปรับปรุงสมบัติของโลหะที่ใช้ในงานเครื่องประดับส่วนใหญ่จะเป็นการเติมธาตุผสมหนึ่งธาตุหรือมากกว่า โดยการเติมธาตุผสมชนิดต่างๆ ลงไปนั้นจะมีวัตถุประสงค์ที่ต่างกันออกไป เช่น เพื่อให้สามารถขึ้นรูป หรือผลิตได้ง่ายขึ้น เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลเพื่อให้มีสีสันทึบหลากหลายขึ้น สำหรับในกลุ่มโลหะมีค่า ได้แก่ ทองคำ แพลทินัมและเงิน จะต้องมีการคำนึงถึงปริมาณของธาตุผสมที่เติมลงไปด้วย เนื่องจากจะส่งผลโดยตรงกับความบริสุทธิ์ของโลหะมีค่า และราคาของเครื่องประดับ อย่างไรก็ตามธาตุผสมที่เติมลงไปบางชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งนิกเกิลที่เป็นธาตุที่ทำให้เกิดการแพ้ได้ง่าย ซึ่งจะเป็นปัญหาอย่างมากสำหรับเครื่องประดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องประดับที่ต้องมีการสัมผัสกับเนื้อเยื่อ เช่น ต่างหูหรือหมุดเจาะสะดือ ดังนั้นการลดปัญหาที่เกิดขึ้น สามารถทำได้โดยการเลือกใช้ธาตุอื่นที่สามารถปรับปรุงสมบัติแบบเดียวกันได้มาทดแทนการใช้นิกเกิล เช่น การใช้แพลเลเดียมแทนนิกเกิลในทองคำสีขาวหรือการพัฒนาเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดไนโตรเจนสูงและปราศจากนิกเกิล เป็นต้น นอกจากนี้การพัฒนาในกระบวนการผลิตก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตรงตามความต้องการของผู้บริโภคอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. Waltner, A. (1986). The Moral status of the child in late imperial China: Childhood in ritual and in law. *Social Research*, 53(4), 667-687.
2. Cohn, J. G., Stern, E. W. & Etris, S. F. (2000). Gold and gold compounds. In *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. John Wiley & Sons, Inc.
3. Fieberg, M., Renner, H., & Schlamp, G. (2003). Silver, gold, and other noble metals. In *Digital Encyclopedia of Applied Physics*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA.
4. Seymour, R. J., & O'Farrelly, J. I. (2000). Platinum-group metals. In *Kirk-Othmer Encyclopedia of chemical technology*. John Wiley & Sons, Inc.
5. Schlamp, G. (2006). *Noble metals and their alloys, in Materials science and technology*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
6. Drost, E., & Haußelt, J. (1992). Uses of gold in jewellery. *Interdisciplinary Science Reviews*, 17(3), 271-280.
7. Bühner, J. F. (2005). Hardening of low-alloyed gold. *Gold Bulletin*, 38(3), 120-131.
8. Kain, J.D. (1975). *Cast pewter jewelry*. Davis Publications.

9. Gamelsky, W. (1958). *Jewelry chain constructions and method of manufacture of costume jewelry therefrom* (US2852923A). United States Patent.
10. Vilaplana, J., Romaguera, C., Grimalt, F., & Cornellana, F. (1991). New trends in the use of metals in jewellery. *Contact Dermatitis*, 25(3), 145-148.
11. Michaels, T. (1998). *Jewelry with links and visible substrate* (US5816072A). United States Patent.
12. Iler, R. K., & Palmer, A. B. (1972). *Titanium and/or zirconium nitride based articles of jewelry* (US3669695A) United States Patent.
13. Miller, G. A. (2012). *Tungsten carbide ring composition* (US20120093675). United States Patent.
14. Grimwade, M. (2009). *Introduction to precious metals*. Maine, USA, Brynmorgen Press.
15. Renner, H., Schlamp, G., Hollmann, D., Lüscho, H. M., Tews, P., Rothaut, J., Dermann, K., Knödler, A., Hecht, C., Schlott, M., Drieselmann, R., Peter, C., & Schiele, R. (2000). Gold, gold alloys, and gold compounds. In *Ullmann's Encyclopedia of industrial chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
16. Russell, A. M., & Lee, K. L. (2005). Cu, Ag, and Au, in structure-property relations in nonferrous metals (pp. 302-336). John Wiley & Sons, Inc.
17. Süß, R., Lingen, E. van der., & Glaner, L. (2004). 18 Carat yellow gold alloys with increased hardness. *Gold Bulletin*, 37, 196-207.
18. Rapson, W. S. (1990). The metallurgy of the coloured carat gold alloys. *Gold Bulletin*, 23(4), 125-134.
19. Cretu, C., & Lingen, E. van der. (1999). Coloured gold alloys. *Gold Bulletin*, 32(4), 115-126.
20. Leuser, J. (1949). über die Besonderheiten der Edelmetallegierungen im Schmuckgewerbe. *Metall*, 3 (7-8), 105-110.
21. Henderson, S., & Manchanda D. (2005). White gold alloys: Colour measurement and grading. *Gold Bulletin*, 38(2), 55-67.
22. Cahn, R.W. (1998). Materials science: A precious stone that isn't. *Nature*, 396(6711), 523-524.
23. Miyama, S. (1987). Purple sintered gold alloy for ornamentation, Japan Patent JPS62240729.
24. Loh, P.C. (2005). Jewelry alloy compositions. US Patent US6929776.
25. Supansomboon, S., Maaroo, A., & Cortie, M.B. (2008). "Purple Glory": The optical properties and technology of AuAl₂ Coating. *Gold Bulletin*, 41(4), 296-304.

26. Gafner, G. (1989). The development of 990 gold-titanium, and its production, use, and properties. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 89(6), 173-181.
27. ElGuindy, M. (2001). *Platinum group metals: Alloying, properties, and applications*. Encyclopedia of materials science and technology. Oxford, Elsevier.
28. Raykhtsaum, G. (2013). Platinum alloys: A selective review of the available literature. *Platinum Metals Review*, 57(3), 202-213.
29. Steinemann, S. G., Wolf, W., & Podloucky, R. (2002). Colour and optical properties. In J. H. Westbrook, & R. L. Fleischer (Eds), *Intermetallic compounds-Principles and practice: Progress* (Vol. 3), John Wiley & Sons, Ltd.
30. Knuth, B.G. (2000). *Jeweler's resource: A reference of gems, metals, formulas, and terminology for jewelers* (revised ed., pp. 46-50). USA. Jewelers Press.
31. Smith, E. A. (1978). *Working in precious metals* (pp. 278-293). London. N.A.G. Press.
32. ASM Handbook. (1992). *Properties and selection nonferrous alloys and special purpose materials* (Vol. 2). ASM International. pp. 702.
33. Rhines, F. N. (1956). *Phase diagram in metallurgy*. New York. McGraw-Hill Companies, Inc.
34. Chairerk, N., Imurai, S., Chairuangri, T., & Nisaratanaporn, E. (2015). Effect of beryllium and tin on spring property of aged silver alloys 935 without solutionization treatment. *Key Engineering Materials*, 658, 64-68.
35. Sakultanchareonchai, S., Chairuangri T., & Nisaratanaporn, E. (2016). Microstructure and mechanical properties of as-cast and heat-treated 935AgCuBeSn alloys. *Chiang Mai Journal of Science*, 43, 206-214.
36. Chaston, J. C. (1975). Oxygen in silver. In A. Butts & C. D. Coxe (Eds.), *Silver: Economics, metallurgy, and use* (pp. 304-307). Krieger.
37. Price, L. E., & Thomas, G.J. (1938). The tarnishing of silver and silver alloys and its prevention. *The Journal of the Institute of Metals*, 63(2), 29-65.
38. Gardam, G. E. (1953). A Sterling silver containing aluminium, *Metallurgia*, 47(279), 29-33.
39. McCloskey, J. C., Aithal, S., & Welch, P.R. (2001). Silicon microsegregation in 14K yellow gold jewelry alloys. *Gold Bulletin*, 34(1), 3-13.
40. Nisaratanaporn, E., Wongsriuksa, S., Pongsukitwat, S., & Lothongkum, G. (2007). Study on the microstructure, mechanical properties, tarnish and corrosion resistance of sterling silver alloyed with manganese. *Materials Science and Engineering: A* 445-446, 663-668.
41. Hirunyagird, J., Chianpairot, A., Nisaratanaporn, E., & Lothongkum, G. (2014). Effects of Zn/Cu ratio and silicon on microstructure, mechanical properties, tarnish and corrosion Resistance of as-cast 940 silver alloys. *Materials Testing*, 56(9), 649-655.

42. Praiphruk, S., Lothongkum, G., Nisaratanaporn, E., & Lohwongwatana., B. (2013). Effects of copper (Cu), indium (In), tin (Sn), antimony (Sb) and zinc (Zn) in sterling silver alloys on mechanical properties improvement. *Materials Testing*, 55(11-12), 819-823.
43. Callister, W. D. Jr. (2003). *Materials science and engineering: An introduction* (6th ed.). John Wiley and Sons, Inc.
44. Ashby, M., & Johnson, K. (2002). *Materials and design: The art and science of material selection in product design*. 1st Edition. Elsevier Butterworth-Heinemann.
45. Stevenson, G. C., & Connelly, M. E. (1992). Titanium palate maxillary overdenture: A clinical report. *Journal of Prosthodontics*, 1(1), 57-60.
46. Vershinin, N., Filonov, K., Straumal, B., Gust, W., Wiener, I., Rabkin, E., & Kazakevich, A. (2000). Corrosion behaviour of the protective and decorative TiN coatings on large area steel strips. *Surface and Coatings Technology*, 125(1-3), 229-232.
47. Pérez del Pino, A., Fernández-Pradas, J., Serra, P., & Morenza, J. (2004). Coloring of titanium through laser oxidation: Comparative study with anodizing. *Surface and Coatings Technology*, 187(1), 106-112.
48. Salibi, A., & Morrirt, A. N. (2015). Removing a titanium wedding ring. *Emergency Medicine Journal*, 33(2), 170.
49. Chambers, A. F., & Harper, A. (2012). Removal of a titanium ring using a dental saw. *Journal of Plastic Reconstructive and Aesthetic Surgery*, 65(5), 128-129.
50. Kalkan, A., Kose, O., Tas, M., & Meric, G. (2013). Review of techniques for the removal of trapped rings on fingers with a proposed new algorithm. *The American Journal of Emergency Medicine*, 31(11), 1605-1611.
51. Ahlström, M. G., Thyssen, J.P ., Wennervaldt, M., Menné, T., & Johansen, J. D. (2019). Nickel allergy and allergic contact dermatitis: A clinical review of immunology, epidemiology, exposure, and treatment. *Contact Dermatitis*, 81, 227-241.
52. Yuan, J. P., Chen, D. D., & Bo, H. R. (2015). Nickel release rate of type 303 free cutting austenitic stainless steel. *Advanced Materials Research*, 1096, 114-119.
53. Katada, Y., & Taguchi, T. (2015). Nickel-free high-nitrogen stainless steel. *Advances in Metallic Biomaterials*, 125-156.
54. Katsuhito, F., Ichiro, M., Makoto, S., Motoki, I., Hiroshi, I., Eriko, H., Issei, K., Yasuyuki, K., Tetsushi T., & Ryoza, N. (2012). Nickel-free stainless steel avoids neointima formation following coronary stent implantation. *Science and Technology of Advanced Materials*, 13, 1-10.

55. Shcherbakova, G. I., Varfolomeev, M. S., & Storozhenko, P. A. (2019). Solution to technological problems of raising the reliability and quality of castings based on titanium alloys. *Materials Science Forum*, 946, 258-264.
56. Whittaker, D., & Froes, F. H. (2015). Future prospects for titanium powder metallurgy markets. *Titanium Powder Metallurgy*, 579-600.
57. Harada, Y., Maeda, Y., Ueyama, M., & Fukuda, I. (2014). Improvement of formability for multistage deep drawing of Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al alloy sheet. *Procedia Engineering*, 81, 819-824.
58. Maeno, T., Tomobe, M., Mori, K., & Ikeda, Y. (2018). Hot stamping of titanium alloy sheets using partial contact heating. *Procedia Manufacturing*, 15, 1149-1155.
59. Ethiraj, N., & Kumar, V. S. S. (2010). Experimental investigation on warm deep drawing of stainless steel AISI 304. *Applied Mechanics and Materials*, 26-28, 436-442.