

การศึกษาการพอกผิวโลหะผสมเอนโทรปีสูงด้วยกระบวนการอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคคูลุม

Study of High Entropy Alloy Cladding Using Gas Tungsten Arc Cladding

ศักดิ์พัฒน์ จตุรพรเพิ่ม¹, ภูวดล ถนัดหัตถกรรม¹, ธนวัฒน์ แสนทวี¹,
สุรพิชญ์ โพธิ์ศรี¹ และ อภิชาติ โจนโรวรรณ^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Sakdipat Jaturapronperm¹, Bhuwadol Thanathattakum¹, Thanawat Santawee¹,
Surapit Posri¹ and Aphichart Rodchanarowan^{1*}

¹Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

Corresponding Author Email : fengacrw@ku.ac.th

Received 19 April 2025

Revised 19 June 2025

Accepted 04 August 2025

บทคัดย่อ

โลหะผสมเอนโทรปีสูงเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติที่โดดเด่นหลายด้าน เช่น ความแข็งแรงเชิงกล การทนความร้อน และความต้านทานการสึกหรอ โดยบทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวนงานวิจัยการเตรียมผงโลหะผสมเอนโทรปีสูงด้วยการบดแบบลูกบอลพลังงานสูง เพื่อนำมาใช้ในการพอกผิวด้วยกระบวนการอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคคูลุม เพื่อศึกษาโครงสร้างและความต้านทานการกัดกร่อนหลังจากการพอกผิวโลหะผสมเอนโทรปีสูงบนโลหะ โดยพบว่ากระบวนการดังกล่าวช่วยให้ธาตุต่างๆ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เกิดโครงสร้างเดนไดรต์ที่มีความแข็งแรง หลังการพอกผิว วัสดุแสดงความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และคุณสมบัติด้านการกัดกร่อนดีขึ้น เนื่องจากธาตุบางชนิดมีความสามารถในการสร้างฟิล์มป้องกันการกัดกร่อน ดังนั้นโลหะผสมเอนโทรปีสูงจึงมีศักยภาพในการพัฒนาวัสดุในเชิงวิศวกรรม

คำสำคัญ: โลหะผสมเอนโทรปีสูง, กระบวนการบดแบบลูกบอลพลังงานสูง, กระบวนการอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคคูลุม

Abstract

High-entropy alloys (HEAs) are materials that have attracted much attention due to their outstanding properties, such as mechanical strength, heat resistance, and wear resistance. This paper reviews literature on the preparation of high entropy alloy powders using the high-energy ball milling process for application in the gas tungsten arc cladding process to examine the structure and corrosion resistance of the resulting cladded layers. It is found that the process distributes various elements uniformly, resulting in a strong dendritic structure. After cladding, the material exhibits

increased hardness and improved corrosion resistance, as some elements have the ability to form a protective, corrosion-resistant film. Therefore, high-entropy alloys have significant potential for the development of advanced engineering materials.

Keywords: High Entropy Alloys, High Energy Ball Mill, Gas Tungsten Arc

1. บทนำ

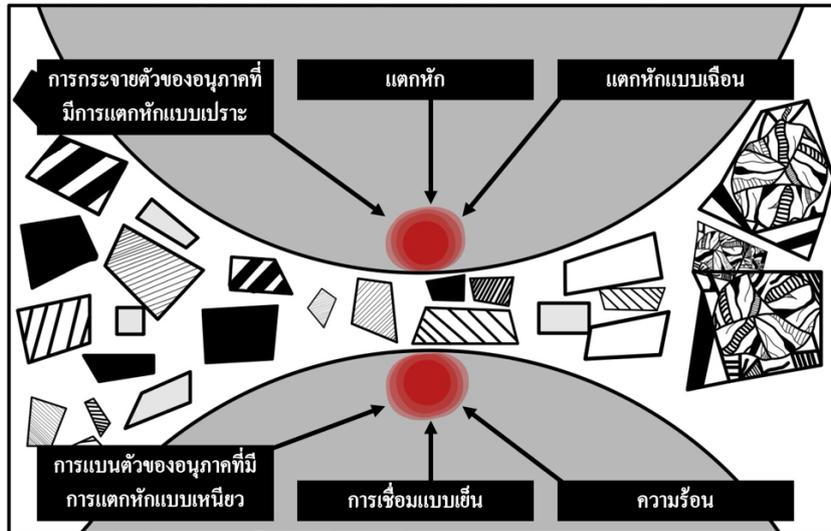
โลหะผสมเอนโทรปีสูง (High Entropy Alloys: HEA) ถูกนำมาใช้เป็นแนวคิดใหม่สำหรับการออกแบบวัสดุในปี พ.ศ. 2547 [1] ซึ่งเป็นการผสมธาตุประกอบโลหะมารวมกัน และมีธาตุประกอบตั้งแต่ 5 ถึง 7 ธาตุ ซึ่งมีสัดส่วนอะตอมอยู่ที่ร้อยละ 5 ถึง 35 ส่วนประกอบของแต่ละธาตุในโลหะผสมเอนโทรปีสูง [2] ส่งผลให้เกิดโครงสร้าง และสมบัติที่โดดเด่น ได้แก่ ความแข็ง ความต้านทานการสึกหรอ ความต้านทานการกัดกร่อน ความแข็งแรงในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ความเหนียวในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ สมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติทางการเชื่อมที่ดี โลหะผสมเอนโทรปีสูงมีความเสถียรสูงเนื่องจากการผสมของเอนโทรปีที่ยับยั้งการก่อตัวของเฟส (Phase) ทำให้เกิดการก่อตัวของสารละลายในรูปของแข็งที่มีเฟส FCC BCC หรือ HCP โลหะผสมเอนโทรปีสูงสามารถสังเคราะห์ด้วยกระบวนการต่างๆ มากมาย ได้แก่ การหลอม การขึ้นรูปด้วยผงโลหะ และการเคลือบฟิล์ม ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ส่งผลให้โลหะผสมเอนโทรปีสูงมีโครงสร้างทางจุลภาคที่เสถียร [3] เนื่องจากคุณสมบัติที่โดดเด่นดังกล่าว โลหะผสมเอนโทรปีสูงจึงมีแนวโน้มที่ใช้งานสำหรับการสร้างผิวเคลือบ (Coating) หรือการพอกผิว (Cladding) ที่ใช้งานได้ เช่น ชั้นส่วนของเครื่องบิน วาล์วความดันสูง วัสดุเคลือบผิวในงานชีวแพทย์ เป็นต้น [4] จนปัจจุบันการสังเคราะห์ธาตุโลหะผสมเอนโทรปีสูง โดยการสังเคราะห์โลหะผสมเอนโทรปีสูงจากผงธาตุโลหะทั้ง 5 ธาตุที่มีความบริสุทธิ์สูงเกิดความเป็นเนื้อเดียวกันในสารละลายของแข็งจากกระบวนการบดแบบลูกบอลพลังงานสูง (High energy Ball Mill: HEBM) ที่เป็นการเตรียมก่อนพอกผิว โลหะผสมเอนโทรปีสูงบนโลหะตัวอย่างด้วยกระบวนการเชื่อมต่างๆได้

อดีตมีการศึกษาบางส่วนได้กล่าวถึงความสามารถในการเชื่อมของโลหะผสมเอนโทรปีสูง ในบรรดากระบวนการเชื่อมต่างๆที่มีอยู่ กระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ (Laser Beam Welding) ได้รับความสนใจมาก ถึงแม้กระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์มักถูกใช้เนื่องจากมีความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานที่ต่ำ แต่มีต้นทุนในการทำงานที่ค่อนข้างสูง จึงทำให้การกระบวนการอาร์คทังสแตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding) เป็นทางเลือกที่ต้นทุนต่ำ และสามารถสร้างแนวเชื่อมที่ปราศจากจุดบกพร่อง (Defect) และมีประสิทธิภาพสูง [5]

2. การศึกษากระบวนการบดแบบลูกบอลพลังงานสูง

กระบวนการบดแบบลูกบอลพลังงานสูง (High-Energy Ball Milling) เป็นกระบวนการแปรรูปเชิงกลที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตโลหะหรือโลหะผสมที่มีโครงสร้างระดับนาโนในรูปแบบผง โดยอาศัยแรงกระแทกและการเสียดสีระหว่างลูกบอลบด ทำให้โครงสร้างหายากเกิดการแตกแยกจนกลายเป็นโครงสร้างนาโนคริสตัลไลน์ [6] ดังรูปที่ 1 กระบวนการเริ่มต้นจากการผสมผงโลหะร่วมกับการเสียดสีเชิงพลาสติก (Plastic Deformation) ที่เกิดขึ้นพร้อมกัน อนุภาคผงโลหะจะเกิดการแตกหัก (Fracture) ส่งผลให้มีขนาดเล็กลงในช่วงแรกของการบด จากนั้นกระบวนการเชื่อมเย็น (Cold Welding) ระหว่างจุลภาคจะทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นจุลภาคขนาดใหญ่ขึ้นอีกครั้ง ในระยะนี้ ขนาดจุลภาคจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่จำนวนอนุภาคลดลง และความแข็งของจุลภาคจะเพิ่มขึ้นตามระดับการเสียดสีรูปถาวรที่สะสม เมื่อการบดดำเนินต่อไป จุลภาคที่รวมตัวจากการเชื่อมเย็นจะเริ่มแตกหักอีกครั้งจากความเปราะที่เพิ่มขึ้น เกิดเป็นจุลภาคขนาดเล็กและเชื่อมต่อกันใหม่ ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีความละเอียดและซับซ้อนขึ้น พร้อม

ทั้งเพิ่มความแข็งและลดความเหนียวของวัสดุ ซึ่งทั้งหมดนี้ช่วยให้เกิดการแตกหัก (Fracture) ของจุลภาคได้ง่ายขึ้นในระยะเวลาหลังของการบด [7] ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 แสดงลูกบอลบดในแรงกระแทกโดยตรงและแรงกระแทกแบบเฉือน [8]



รูปที่ 2 แสดงถึงอนุภาคที่เกิดจากการบดแบบลูกบอลพลังงานสูง [7]

3. การศึกษากระบวนการบดแบบลูกบอลพลังงานสูง

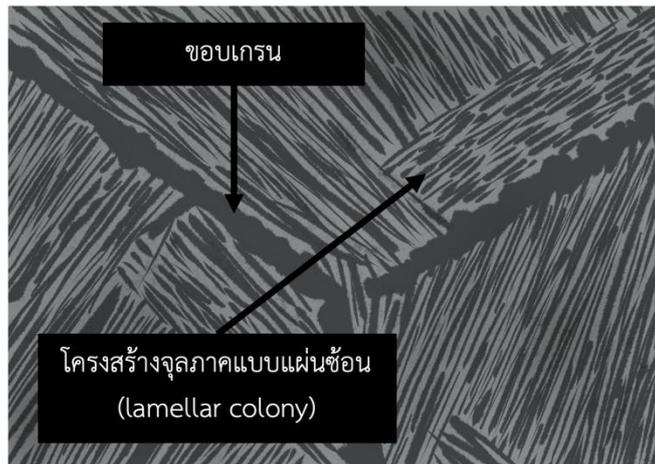
กระบวนการบดแบบลูกบอลพลังงานสูง (High-energy Ball Milling: HEBM) ถือเป็นเทคนิคสำคัญในการสังเคราะห์ผงโลหะผสมเอนโทรปีสูง เนื่องจากช่วยให้ได้ผงที่มีโครงสร้างนาโนและการกระจายตัวของธาตุอย่างสม่ำเสมอ ในงานวิจัยของ Huang และคณะ พบว่าเมื่อสังเคราะห์ผงโลหะผสมเอนโทรปีสูง ระบบ $Al_{0.8}Co_{0.5}Cr_{1.5}CuFeNi$ ด้วยความเร็วรอบ 250–350 รอบ/นาที ภายใต้สัดส่วนบอล:ผง (Ball-to-Powder Ratio: BPR) 5:1–15:1 เป็นเวลา 6–48 ชั่วโมง จะเกิดการสลับกันระหว่างการแตกหัก (Fracture) และเชื่อมเย็น (Cold Welding) อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ขนาดเกรนลดจากประมาณ 100 นาโนเมตร เหลือ 6–8 นาโนเมตร พร้อมความเครียดหรือการบิดเบี้ยวของโครงสร้างเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และภายใต้สัดส่วนบอล:ผง 15:1 ที่ 350 รอบ/นาที หลัง 48 ชั่วโมง พบเฟส FCC ที่เป็นโครงสร้างไม่เป็นระเบียบและธาตุ Al, Co, Cr, Cu, Fe, Ni กระจายตัวสม่ำเสมอ [9] ใน

ผงโลหะผสมเอนโทรปีสูงระบบ $Ti_{5+x}V_{35}(CrMnFe)_{60-x}$ ($x = 0, 10, 20, 30$) ในงานวิจัยของ Zhai และคณะสังเคราะห์ใช้ความเร็วรอบ 694 และ 1,388 รอบ/นาที ภายหลังบด 30–240 นาที ผงโลหะผสมเอนโทรปีสูงจะเปลี่ยนจากโครงสร้างหลายเฟสเป็นเฟส BCC ขนาดเฉลี่ย 10–40 นาโนเมตรภายใน 30–60 นาที และเฟส BCC จะคงตัวจนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสหลังการอบอ่อน [10] ในงานวิจัยของ Shkodich และคณะสังเคราะห์ผงโลหะผสมเอนโทรปีสูงระบบ $CoCrFeNiGa_x$ ($x = 0.5, 1.0$) ด้วยความเร็วรอบ 400 รอบ/นาที ภายใต้อัตราส่วนบดผง 10:1 ภายใต้อุณหภูมิ 190 นาที พบผงเป็นเฟสเดี่ยว FCC ขนาดเฉลี่ย 10 นาโนเมตร จากนั้นนำไปสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเผาด้วยพลาสมาอาร์กไฟฟ้า (Spark Plasma Sintering: SPS) [11] ในงานวิจัยของ Gómez-Esparza และคณะสังเคราะห์ผงโลหะผสมเอนโทรปีสูงระบบ $NiCoAlFe$ (Cr, Cu, Mo, Ti) ด้วยความเร็วรอบ 400 รอบ/นาที ภายใต้อัตราส่วนบดผง 10:1 เป็นเวลา 10, 20, 30 ชั่วโมง พบว่าในช่วงมากกว่า 10 ชั่วโมง ผง มีโครงสร้างผสมเป็นเฟส FCC+BCC แบบไม่เป็นระเบียบ เมื่ออบต่อเนื่องถึง 20–30 ชั่วโมง จะได้ผงขนาดเกรน 5–10 นาโนเมตร จากนั้นนำไปสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเผาด้วยพลาสมาอาร์กไฟฟ้า [12] การทบทวนงานวิจัยเหล่านี้พบว่าการปรับพารามิเตอร์หลัก ได้แก่ ความเร็วรอบ (rpm), อัตราส่วนบดผง (BPR), ระยะเวลาบด (Milling Time) และการเลือกการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างจุลภาค (ขนาดเกรน การเกิดเฟสและความเครียดในโครงสร้าง) และสมบัติทางกายภาพของผงโลหะผสมเอนโทรปีสูง (ความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness), เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability), สมบัติทางแม่เหล็ก (Magnetic Properties) และ ความสามารถในการเก็บกักไฮโดรเจน (Hydrogen Storage)) ส่งผลให้กระบวนการบดแบบลูกบอลล้างงานสูง เป็นเทคนิคพื้นฐานที่สำคัญก่อนการนำผงโลหะผสมเอนโทรปีสูงไปใช้ในกระบวนการต่อเนื่อง เช่น กระบวนการเผาด้วยพลาสมาอาร์กไฟฟ้า (Spark Plasma Sintering: SPS), การอัดร้อน (Hot Pressing) การพอกผิวด้วยเลเซอร์ (Laser Cladding) หรือการพอกผิวด้วยกระบวนการอาร์คทังสเตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Cladding: GTA cladding) เพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติทางกลและการต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าโลหะผสมทั่วไป

4. การศึกษาการพอกผิวด้วยโลหะผสมเอนโทรปีสูง

โลหะผสมเอนโทรปีสูงระบบ $CoCrFeMnNbNi$ ได้รับการสังเคราะห์และเคลือบบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ขนาด $50 \times 40 \times 8$ มิลลิเมตร โดยใช้การพอกผิวด้วยกระบวนการอาร์คทังสเตนแก๊สปกคลุมภายใต้กระแสตรงขั้วอิเล็กโทรดลบ (DCEN) ที่ 210 แอมแปร์ ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction: XRD) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่เกิดขึ้นประกอบด้วยเฟส FCC และเฟส Laves ซึ่งยอดของเฟส FCC สอดคล้องกับธาตุ Fe และ Ni ขณะที่เฟส Laves มีลักษณะของโครงสร้างของ Fe_2Nb โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบประกอบด้วยบริเวณเดนไดรต์ (Dendritic) และขอบเดนไดรต์ (Interdendritic) ซึ่งสลับกันในลักษณะโครงสร้างจุลภาคแบบแผ่นซ้อน (Lamellar Colony) ดังรูปที่ 3 ที่มีขนาดช่วงระยะของเฟสระดับนาโนเมตร (ประมาณ 100–200 นาโนเมตร) โดยพบว่า Nb มีแนวโน้มกระจุกตัวในบริเวณของโครงสร้างเดนไดรต์ ซึ่งเป็นเฟส Laves ในขณะที่บริเวณขอบเดนไดรต์ มีลักษณะเป็นเฟส FCC ส่งผลให้เกิดโครงสร้างแบบสองโครงสร้างที่มีความแข็งแรงและความเหนียวผสมกัน นอกจากนี้ ธาตุ Fe, Cr และ Ni จากโลหะฐาน (Substrate) ยังแพร่กระจายเข้าสู่ชั้นเคลือบในระหว่างการหลอม จึงช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างชั้นเคลือบและโลหะฐาน (Substrate) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทดสอบความแข็งและการสึกหรอแสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบมีความแข็งสูงกว่าโลหะฐาน (Substrate) อย่างมีนัยสำคัญ และมีความต้านทานการสึกหรอแบบแห้งดีกว่า โดยเกิดร่องการขีดข่วนที่ตื้นและละเอียดกว่าอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลจากเฟส Laves ที่แข็งและเฟส FCC ที่มีความเหนียวสูง ช่วยป้องกันการเสียรูปแบบถาวร (Plastic Deformation) และการแตกร้าวแบบเปราะบนผิววัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ [13]

โลหะผสมเอนโทรปีสูงระบบ AlCoCrFeNi ถูกสังเคราะห์โดยผสมผงธาตุบริสุทธิ์ผ่านกระบวนการบดแบบลูกบอลพลังงานสูงเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง จากนั้นนำไปพอกผิวลงบนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 แอล ขนาด 50 × 50 × 4 มิลลิเมตร ด้วยการพอกผิวด้วยกระบวนการอาร์คทั้งสแตนแก๊สปกคลุมในกระแสตรงขั้วลบ (DCEN) กระแสไฟ 105 แอมแปร์ แรงดันไฟ 12.3 โวลต์ และความเร็วหัวเชื่อม 215 มม./นาที ซึ่งให้ค่าปริมาณพลังงานความร้อน (Heat Input) เท่ากับ 0.172 กิโลจูล/มิลลิเมตร คำนวณจากสมการ (1)



รูปที่ 3 ลักษณะตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคแบบแผ่นซ้อน (lamellar colony) [14]

$$H.I. = (\eta \times V \times I) / v \quad (1)$$

เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพของกระบวนการอาร์คทั้งสแตนแก๊สปกคลุม เท่ากับ 0.48

V คือ แรงดัน

I คือ กระแส

v คือ ความเร็วในการเดิน

จากผลการทดลองพบว่าอัตราการเจือจางของโลหะฐาน (Substrate) เข้าสู่ชั้นเคลือบมีค่าสูงสุดที่ 38% เมื่อใช้องค์ประกอบ Al₁CoCrFeNi โดยการแพร่ของ Fe, Cr และ Ni จากโลหะฐาน (Substrate) เข้าสู่บริเวณหลอมมีผลต่อความหนาแน่นของพลังงานและการยึดเกาะของชั้นเคลือบ ส่วนผิวของชั้นพอกมีลักษณะเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendritic) และระหว่างเดนไดรต์ (Interdendritic) ดังรูปที่ 4 ที่ประกอบด้วยเฟส FCC และเฟส BCC/B2 โดยพบว่าบริเวณเดนไดรต์มีปริมาณ Al และ Ni สูง ขณะที่ขอบเดนไดรต์มี Fe และ Cr สูง ซึ่งเฟส B2 เป็นเฟสแข็งแรงบนเฟส BCC ที่มีความแข็งสูง และสัมพันธ์กับการมี Al-Ni อยู่ร่วมกัน ทั้งนี้ การเพิ่มปริมาณ Al จะส่งผลให้ปริมาตรเฟส BCC เพิ่มขึ้น ความแข็งของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้น (170-530 HV_{0.1}) และโครงสร้างเดนไดรต์เปลี่ยนจากแบบคอลัมน์นาร์เป็นแบบอควิแอกซ์ (Equiaxed Dendrites) แสดงถึงผลของ Al ต่อการควบคุมสัณฐานของผลึกและสมบัติเชิงกลของโลหะผสมเอนโทรปีสูงบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม [15]

โลหะผสมเอนโทรปีสูงระบบ AlCoCrFeNi ได้ถูกพอกเคลือบบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำขนาด 100 × 100 × 5 มิลลิเมตร โดยใช้การพอกผิวด้วยกระบวนการอาร์คทั้งสแตนแก๊สปกคลุมภายใต้กระแสไฟที่แตกต่างกันระหว่าง 150–

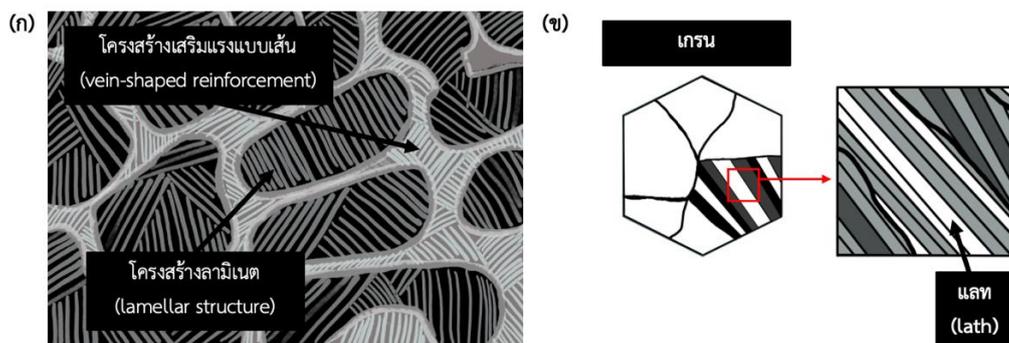
230 แอมแปร์ เพื่อศึกษาผลของค่าปริมาณพลังงานความร้อน (Heat Input) ต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติเชิงกล และความต้านทานการกัดกร่อน ผลการทดลองพบว่า กระแสที่สูงเกินไปหรือต่ำเกินไปอาจก่อให้เกิดข้อบกพร่อง เช่น การแตกร้าวร้อน (Hot Crack) และการหลอมไม่สมบูรณ์ (Lack of Fusion) โดยตัวอย่างที่กระแสระหว่าง 150–180 แอมแปร์ แสดงโครงสร้างที่มีการเปลี่ยนแปลงชัดเจนจากอิกวิแอกซ์ละเอียดไปจนถึงคอลัมน์าร์แบบหยาบเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น ผลจากเทคนิคการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ (Electron Backscatter Diffraction: EBSD) พบว่า S-150 มีโครงสร้างจากอิกวิแอกซ์ละเอียดขนาดเฉลี่ย $61 \mu\text{m}$ ขณะที่ S-180 มี อิกวิแอกซ์หยาบ ขนาด $241 \mu\text{m}$ และเกิดการเติบโตแบบคอลัมน์าร์ใกล้บริเวณเส้นผสม (Fusion Line) จากการเปลี่ยนโครงสร้างในสถานะของแข็ง (Solid-State Transformation) โดยเฉพาะที่กระแสสูงจะพบเฟส FCC มากขึ้นเนื่องจากการเจือจางที่สูงขึ้นซึ่งลดปริมาณ Al ภายในชั้นเคลือบ เฟสหลักที่พบคือ A2 (Disordered BCC) และ B2 (Ordered BCC) พร้อมด้วยโครงสร้างซ้อนระหว่างเดนไดรต์และขอบเดนไดรต์ โดยเฟส B2 ที่มีธาตุ Al-Ni ขณะที่เฟส A2 ที่มีธาตุ Cr-Fe และมีการเกิด σ -phase ที่ขอบเกรนในบางกรณี ด้านสมบัติเชิงกลพบว่าความแข็งจุลภาค (Microhardness) ลดลงตามกระแสไฟที่เพิ่มขึ้น โดย S-150 มีค่าความแข็งเฉลี่ย 518HV_1 ขณะที่ S-180 ลดลงเหลือ 467HV_1 ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดเกรนที่หยาบขึ้นและการเจือจางที่เพิ่มขึ้น [16]



รูปที่ 4 ลักษณะการแข็งตัวในการพอกผิวด้วยกระบวนการเชื่อม [17]

โลหะผสมเอนโทรปีสูงสองระบบ ได้แก่ NiCrAlCoCu และ NiCrAlCoMo ได้รับการสังเคราะห์โดยใช้ผงธาตุบริสุทธิ์ในอัตราส่วนเท่ากัน (Equimolar) ผ่านกระบวนการอบแบบลูกบอลพลังงานสูงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อขจัดความชื้น และพอกเคลือบบนพื้นผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1050 ขนาด $100 \times 20 \times 25$ มิลลิเมตร ด้วยการพอกผิวด้วยกระบวนการอาร์คทั้งสแตนแก๊สปกคลุม ผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) และการวิเคราะห์ด้วยหัววิเคราะห์จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบโพรบ (Electron Probe Microanalysis: EPMA) พบว่า ชั้นเคลือบ NiCrAlCoCu มีโครงสร้างเดนไดรต์ที่ไม่สม่ำเสมอ (Inhomogeneous) ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของอัตราความชันอุณหภูมิ (G) และอัตราการเจริญเติบโตของผลึก (R) ระหว่างการแข็งตัว โดยบริเวณผิวสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลว (Solid/Liquid Interface) จะเริ่มต้นด้วยการเติบโตแบบระนาบ (planar) จากนั้นเปลี่ยนเป็นเซลล์ลูลาร์ (cellular) และเดนไดรต์แบบคอลัมน์าร์ (Columnar Dendritic) ก่อนจะกลายเป็นเดนไดรต์แบบอิกวิแอกซ์ (Equiaxed Dendrite) ที่บริเวณด้านบนของชั้นหลอมดังรูปที่ 4 เนื่องจากเกิดภาวะการเย็นตัว (Undercooling) อย่าง

รุนแรง ทำให้เกิดการนิวเคลียชันในระดับสูง จากผลการวิเคราะห์ด้วยหัตถวิเคราะห์จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบโพรบแบบไม่ใช้กัดผิวชิ้นงาน (Non-Etched) พบว่า บริเวณโครงสร้างเดนไดรต์ของ NiCrAlCoCu มีองค์ประกอบหลักคือ Cr, Co และ Fe ขณะที่บริเวณระหว่างเดนไดรต์ (Interdendritic) มี Ni, Al และ Cu เป็นองค์ประกอบเด่น แสดงถึงการแยกตัวของธาตุระหว่างการแข่งขันตัวแบบไม่สมดุล (Non-Equilibrium Solidification) ในทางกลับกัน ชั้นพอก NiCrAlCoMo มีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่า โดยพบโครงสร้างเสริมแรงแบบเส้น (Vein-shaped Reinforcement) เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่าย (Network) ร่วมกับโครงสร้างลามิเนต (Lamellar Structure) ดังรูปที่ 5 (ก) โดยโครงสร้างเส้นมีองค์ประกอบเด่นคือ Mo, C และ Co ขณะที่โครงสร้างลามิเนตประกอบด้วย Al, Ni, Fe, Cr, Co และ Mo ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และการวิเคราะห์ด้วยหัตถวิเคราะห์จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบโพรบยืนยันว่า เฟสหลักของ NiCrAlCoMo คือ $Co_6Mo_6C_2$, $Fe_{63}Mo_{37}$ และ $AlFe_{0.23}Ni_{0.77}$ การทดสอบความแข็งแสดงให้เห็นว่า ชั้นพอกผิว NiCrAlCoMo มีความแข็งเฉลี่ยสูงกว่าชั้นพอก NiCrAlCoCu ถึง 4 เท่า เนื่องจากมีสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound) ที่มากกว่าและโครงสร้างที่แข็งแรงกว่า นอกจากนี้ยังพบโครงสร้างมาร์เทนไซต์ชนิดแลท (Lath Martensite) เป็นโครงสร้างจุลภาคแบบลำดับชั้น (Hierarchical Microstructure) ที่ประกอบด้วยแพ็คเกจ (Packet) บล็อก (Block) ซับบล็อก (Sub-block) และแลท (Lath) โดยซับบล็อกมักมีรูปร่างเป็นแผ่นบาง (Plate-like Morphology) ขนานกับระนาบ (Plane) [19] ดังรูปที่ 5 (ข) บริเวณกระทบความร้อน (Heat Affected Zone; HAZ) ของ NiCrAlCoCu ซึ่งมีค่าความแข็งสูงถึง 720 HV ผลการทดสอบการสึกหรอ (Wear Test) ชี้ว่า NiCrAlCoMo มีความต้านทานการสึกหรอดีกว่า NiCrAlCoCu อย่างมีนัยสำคัญ โดยโครงสร้างเสริมแรงแบบเส้นมีบทบาทสำคัญในการยึดกลไกและลดการหลุดลอกของวัสดุระหว่างการเสียดสี ในขณะที่ NiCrAlCoCu มีพฤติกรรมการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) ที่เด่นชัดเนื่องจากความแข็งต่ำ ส่งผลให้มีการเสีรูปพลาสติกง่ายและสูญเสียเนื้อวัสดุมากกว่า [18]



รูปที่ 5 (ก) โครงสร้างเสริมแรงแบบเส้น (vein-shaped reinforcement) ร่วมกับโครงสร้างลามิเนต (lamellar structure) (ข) ลักษณะของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ชนิดแลท (lath martensite) [18], [19]

5. การกัดกร่อน

หนึ่งในคุณสมบัติสำคัญของโลหะผสมเอนโทรปีสูงที่ส่งผลต่อการใช้งานในสภาวะแวดล้อมรุนแรงคือความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และเฟสที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ การศึกษาผลของการใช้การกระแทกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Impact Treatment: UIT) ต่อความต้านทานการกัดกร่อนของชั้นเคลือบโลหะผสมเอนโทรปีสูง FeCrMnCuNiSi ที่สร้างด้วยการพอกผิวด้วยกระบวนการอาร์คทั้งสแตนเลสสตีลกลุ่ม โดยพบว่าการกระแทกด้วยคลื่นอัลตราโซนิกในขณะยังหลอมเหลว (thermal

UIT) สามารถยับยั้งการแยกตัวของธาตุโลหะ ลดการเกิดรอยแยกที่แนวเกรน และส่งผลให้เกิดการจัดเรียงเกรนอย่างละเอียดสม่ำเสมอ ซึ่งนำไปสู่การก่อตัวของฟิล์ม ที่มีความหนาแน่นและเรียบเนียนมากขึ้นในสภาวะกัดกร่อนจากสารละลาย NaCl 3.5 wt% ทั้งนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) เพิ่มขึ้นจาก -507 mV เป็น -392 mV และค่ากระแสการกัดกร่อน (i_{corr}) ลดลงจาก 1.075 เป็น $0.465 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ บ่งชี้ถึงความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นประมาณ 23% พร้อมทั้งเปลี่ยนกลไกการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) ไปสู่แบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของกระแสตกด้วยคลื่นอัลตราโซนิกในขณะยังหลอมเหลวในการยกระดับสมรรถนะของชิ้นเคลือบโลหะผสมเอนโทรปีสูงในเชิงป้องกันการกัดกร่อนอย่างชัดเจน [20] การศึกษาการเคลือบผิวเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1050 ด้วยโลหะผสมเอนโทรปีสูงชนิด AlNiCoCrFe โดยการใช้การพอกผิวด้วยกระบวนการอาร์คทั้งสแตนเลสสปกคลุม ภายใต้กระแสไฟฟ้าที่ต่างกัน 90, 110 และ 130 แอมแปร์ เพื่อประเมินผลต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และความต้านทานการกัดกร่อนในสารละลาย HCl 1 โมล ซึ่งพบว่า การเคลือบที่ได้จากกระแส 110 แอมแปร์ พบเฟส BCC และ FCC พร้อมความแข็งผิวสูงถึง 658 HV และมีความต้านทานการกัดกร่อนดีที่สุด โดยค่าความต้านทานโพลาไรซ์ (Polarization Resistance) เพิ่มจาก $62.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ เป็น $834 \Omega \cdot \text{cm}^2$ และกระแสการกัดกร่อนลดลงจาก 572.2 เป็น $39.7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ แสดงถึงความสามารถในการยับยั้งการละลายของโลหะในสภาวะกรดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นผลจากการกระจายตัวขององค์ประกอบที่สม่ำเสมอและการก่อตัวของชั้นฟิล์มออกไซด์ผสมหลายชนิดบนพื้นผิวเคลือบ ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการอาร์คทั้งสแตนเลสสปกคลุมเป็นวิธีต้นทุนต่ำที่สามารถใช้ผลิตผิวพอกด้วยโลหะผสมเอนโทรปีสูงที่มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยม [21]

6. สรุป

บทความนี้ได้รวบรวมและวิเคราะห์ความก้าวหน้าล่าสุดในการพอกผิวโลหะผสมเอนโทรปีสูงด้วยการพอกผิวด้วยกระบวนการอาร์คทั้งสแตนเลสสปกคลุม โดยให้ความสำคัญกับการเตรียมผงโลหะผสมเอนโทรปีสูงด้วยการบดแบบพลังงานสูงช่วยให้ได้ผงโลหะขนาดนาโนที่มีโครงสร้างละเอียดและเกิดเฟสเดียวหรือผสมที่เสถียร เมื่อนำมาใช้ในการพอกผิวด้วยกระบวนการอาร์คทั้งสแตนเลสสปกคลุม คลุม เมื่อนำเอาผงที่ผ่านการบดไปพอกเคลือบบนพื้นผิวด้วยกระบวนการอาร์คทั้งสแตนเลสสปกคลุม ได้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาค การเกิดเฟส ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น และความต้านทานการกัดกร่อนของชั้นพอกผิว [22] จากการทบทวนงานวิจัย โครงสร้างทางจุลภาคในการพอกผิวโลหะผสมเอนโทรปีสูงนั้นมีความหลากหลายทางโครงสร้าง ได้แก่ โครงสร้างเซลล์ลูลาร์ โครงสร้างเดนไดรต์แบบคอลัมน์นาร์ โครงสร้างเดนไดรต์แบบอิคิเอกซ์ โครงสร้างจุลภาคแบบแผ่นซ้อน โครงสร้างเสริมแรงแบบเส้น และโครงสร้างลามิเนต เป็นต้น และสารประกอบระหว่างโลหะ (Intermetallic compound) เป็นเฟสที่พบและมีความสำคัญในระบบโลหะผสมเอนโทรปีสูง เนื่องจากส่งผลต่อความแข็งแรงยึดเหนี่ยวจุลภาค และการเชื่อมสภาพของวัสดุ โดยเฟสดังกล่าวมักมีโครงสร้างที่สอดคล้องกับเฟส BCC FCC หรือโครงสร้างระเบียบพิเศษ (A2 B2 Laves และอื่นๆ) [23] งานวิจัยส่วนใหญ่รายงานว่าชั้นเคลือบโลหะผสมเอนโทรปีสูงให้ความแข็งแรงสูงขึ้นหลายเท่าตัวเมื่อเทียบกับวัสดุฐาน และมีความสามารถในการต้านการสึกหรอและการกัดกร่อนที่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้เทคนิคเสริม เช่น การกระแสตกด้วยคลื่นอัลตราโซนิกซึ่งช่วยลด i_{corr} และเพิ่มเสถียรภาพของฟิล์มออกไซด์บนผิว จากการทบทวนนี้สามารถสรุปได้ว่า การพอกผิวด้วยกระบวนการอาร์คทั้งสแตนเลสสปกคลุมเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงในการเสริมสมบัติพื้นผิวโลหะฐาน ทั้งในด้านเชิงกลและเชิงเคมี โดยควรเน้นการออกแบบองค์ประกอบโลหะผสมเอนโทรปีสูงที่เหมาะสม ร่วมกับการควบคุมสภาวะกระบวนการ และอาจผสมผสานกับเทคโนโลยีหลังการพอกผิวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระดับอุตสาหกรรมในอนาคต

7. ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษานี้ สามารถเสนอแนวทางเพื่อการต่อยอดในการพัฒนาโลหะผสมเอนโทรปีสูงได้ในหลายด้าน โดยเริ่มจากการศึกษาและออกแบบองค์ประกอบธาตุของระบบโลหะผสมเอนโทรปีสูงต่อการก่อตัวของเฟสต่าง ๆ เพื่อหา ระบบที่ให้ความสมดุลระหว่างความแข็งแรงและความเหนียวที่เหมาะสม จากนั้นจึงพัฒนาเทคนิคการพอกผิวแบบผสมผสาน เช่น การใช้กระบวนการอาร์คทั้งสแตนแก๊สปกคลุมรวมกับกระบวนการให้ความร้อนหรือเทคโนโลยี Ultrasonic Impact Treatment (UIT) เพื่อลดข้อบกพร่องเชิงโลหะวิทยาและสมบัติเชิงกล อีกทั้งควรมีการศึกษาความสามารถด้านทานการกัดกร่อนและการสึกหรอในการซ่อมแซมผิวโลหะโดยการพอกผิวด้วยโลหะผสมเอนโทรปีสูง เพื่อต่อยอดสู่การใช้งานจริงในอุตสาหกรรม เช่น งานซ่อมแม่พิมพ์ โลหะหนัก หรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการสนับสนุนด้านองค์ความรู้และทรัพยากรทางวิชาการ รวมถึงข้อมูลวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโลหะผสมเอนโทรปีสูง และขอขอบพระคุณมูลนิธิโทรเพื่อส่งเสริมวิทยาศาสตร์ ประเทศไทย ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 28 ซึ่งผลจากโครงการดังกล่าวมีส่วนช่วยเกื้อหนุนต่อการสังเคราะห์องค์ความรู้และการจัดทำบทความปริทัศน์ฉบับนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Zendejas Medina, L. Riekehr, and U. Jansson, "Phase formation in magnetron sputtered CrMnFeCoNi high entropy alloy," *Surface and Coatings Technology*, vol. 403, Dec. 2020, Art. no. 126323, doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.126323.
- [2] พงศ์ภักดิ์ จิยาศักดิ์, ปิยนุช ม่วงทอง, R. Goodall และ อภิชาติ โรจนโรวรรณ, "โลหะผสมเอนโทรปีสูง," วารสารวิศวกรรมสาร มก., ปีที่ 32, ฉบับที่ 107, หน้า 31–38, ม.ค.-มิ.ย., 2562. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/kuengj/article/view/174287>
- [3] N.F. Shkodich *et al.*, "Structural evolution and magnetic properties of high-entropy CuCrFeTiNi alloys prepared by high-energy ball milling and spark plasma sintering," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 816, Mar. 2020, Art. no. 152611, doi: 10.1016/j.jallcom.2019.152611.
- [4] Y. Shi, B. Yang, and P.K. Liaw, "Corrosion-resistant high-entropy alloys: A review," *Metals*, vol.7, no. 2, Feb. 2017, Art. no. 43, doi: 10.3390/met7020043.
- [5] J. P. Oliveira *et al.*, "Gas tungsten arc welding of as-rolled CrMnFeCoNi high entropy alloy," *Materials & Design*, vol. 189, Apr. 2020, Art. no. 108505, doi: 10.1016/j.matdes.2020.108505.
- [6] L. Yang, *Nanotechnology-Enhanced Orthopedic Materials*. Waltham, MA, USA: Woodhead Publishing, 2015. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780857098443/nanotechnology-enhanced-orthopedic-materials>

- [7] B. J. M. Aikin, and T. H. Courtney, "The kinetics of composite particle formation during mechanical alloying," *Metallurgical transactions A*, vol. 24, pp. 647–657, Mar. 1993, doi: 10.1007/BF02656633.
- [8] A. B. D. Nandiyanto, R. Zaen, and R. Oktiani, "Working volume in high-energy ball-milling process on breakage characteristics and adsorption performance of rice straw ash," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 43, pp. 6057–6066, Apr. 2018, doi: 10.1007/s13369-018-3265-4.
- [9] M. Huang, J. Jiang, Y. Wang, Y. Liu, and Y. Zhang, "Effects of milling process parameters and PCAs on the synthesis of $Al_{0.8}Co_{0.5}Cr_{1.5}CuFeNi$ high entropy alloy powder by mechanical alloying," *Materials & Design*, vol. 217, May 2022, Art. no. 110637, doi: 10.1016/j.matdes.2022.110637.
- [10] Y. T. Zhai, Y. M. Li, L. Bolzoni, J. Kennedy, and F. Yang, "Effect of heat treatment on microstructural evolution and hydrogen storage performance of as-milled $Ti_{5+x}V_{35}(CrMnFe)_{60-x}$ ($x=0, 10, 20, 30$) high-entropy alloys," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 81, pp. 584–594, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.07.298.
- [11] N. F. Shkodich *et al.*, "Effect of high energy ball milling, heat treatment and spark plasma sintering on structure, composition, thermal stability and magnetism in $CoCrFeNiGa_x$ ($x = 0.5; 1$) high entropy alloys," *Acta Materialia*, vol. 284, Jan. 2025, Art. no. 120569, doi: 10.1016/j.actamat.2024.120569.
- [12] C. D. Gómez-Esparza, F. Baldenebro-López, L. González-Rodelas, J. Baldenebro-López, and R. Martínez-Sánchez, "Series of nanocrystalline $NiCoAlFe$ (Cr, Cu, Mo, Ti) high-entropy alloys produced by mechanical alloying," *Materials Research*, Vol. 19, pp. 39–46. Dec. 2016, doi: 10.1590/1980-5373-MR-2015-0668.
- [13] W.-Y. Huo, H.-F. Shi, X. Ren, and J.-Y. Zhang, "Microstructure and wear behavior of $CoCrFeMnNbNi$ high-entropy alloy coating by TIG cladding," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2015, Jan. 2015, Art. no. 647351, doi: 10.1155/2015/647351.
- [14] H. Shao, Y. Zhao, P. Ge, and W. Zeng, "In-situ SEM observations of tensile deformation of the lamellar microstructure in TC21 titanium alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 559, pp. 515–519, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.msea.2012.08.134.
- [15] M. Fereidouni, M. S. Khorrami, and M. H. Sohi, "Liquid phase cladding of $Al_xCoCrFeNi$ high entropy alloys on AISI 304L stainless steel," *Surface and Coatings Technology*, vol. 402, Nov. 2020, Art. no. 126331, doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.126331.

- [16] Q. Fan *et al.*, “AlCoCrFeNi high-entropy alloy coatings prepared by gas tungsten arc cladding: Microstructure, mechanical and corrosion properties,” *Intermetallics*, vol. 138, Nov. 2021, Art. no. 107337, doi: 10.1016/j.intermet.2021.107337.
- [17] S. Kou, *Welding Metallurgy*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley-Interscience, 2003. [Online]. Available: https://dl.ojocv.gov.et/admin_/book/Welding%20Metallurgy%20Second%20Edition%20By%20Sindo%20Kou.pdf
- [18] Y. C. Lin, and Y. H. Cho, “Elucidating the microstructural and tribological characteristics of NiCrAlCoCu and NiCrAlCoMo multicomponent alloy clad layers synthesized in situ,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 203, no. 12, pp. 1694–1701, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.surfcoat.2009.01.004.
- [19] S. Morito, Y. Adachi, and T. Ohba, “Morphology and crystallography of sub-blocks in ultra-low carbon lath martensite steel,” *Material Transactions*, vol. 50, no. 8, pp. 1919–1923, Jun. 2009, doi: 10.2320/matertrans.MRA2008409.
- [20] S. Gao, Y. Du, M. Cong, Y. He, and W. Lei, “The impact of ultrasonic shock surface treatment technology on the microstructure, mechanical and corrosion properties of FeCrMnCuNiSi high-entropy alloy coating via TIG arc melting,” *Materials Today Communications*, vol. 41, Dec. 2024, Art. no. 110282, doi: 10.1016/j.mtcomm.2024.110282.
- [21] M. Ardeshir, M. Yousefpour, S. M. Sadegh Nourbabksh, and M. Bozorg, “Microstructure and corrosion resistance of high entropy alloy (AlNiCoCrFe) coatings prepared by TIG process,” *Heliyon*, vol. 10, no. 24, Dec. 2024, Art. no. e41062, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e41062.
- [22] S. Jaturapronperm, P. Chiyasak, A. Taechamahaphan, C. Huang, W. Wattanathana, and A. Rodchanarowan, “The effect of Sn and Ti addition in CoCrFeNi to prepare equiatomic high entropy alloy clad on 304 stainless steels via gas tungsten arc cladding,” *Materials Characterization*, vol. 224, Jun. 2025, Art. no. 115048, doi: 10.1016/j.matchar.2025.115048.
- [23] J. Liu, X. Wang, A. P. Singh, H. Xu, F. Kong, and F. Yang, “The evolution of intermetallic compounds in high-entropy alloys: From the secondary phase to the main phase,” *Metals*, vol. 11, no. 12, Dec. 2021, Art. no. 2054, doi: 10.3390/met11122054.