

**พฤติกรรมการสึกหรอแบบขูดขีดของชั้นผิวแพร่โดยการ
Pack Cementation บนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ
Abrasive Wear Behavior of Diffusion Layer by
Pack Cementation on Low Carbon Steel**

สุพร ฤทธิภักดี^{1*} สุอังคณา ลิ² นลิน เพียรทอง² นภิสพร มีมงคล³

¹นักศึกษา ²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

จังหวัดอุบลราชธานี 34190

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 91100

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอแบบขูดขีดของชั้นผิวแพร่โดยการ Pack Cementation บนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ส่วนผสมทางเคมีของการ Pack Cementation ประกอบด้วยเฟอร์โรซิลิคอน 42 เปอร์เซ็นต์, ทราย 17 เปอร์เซ็นต์, แอมโมเนียคลอไรด์ 3 เปอร์เซ็นต์, ดินเหนียว 12 เปอร์เซ็นต์, น้ำแก้ว 26 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้อุณหภูมิการอบชุบ 950 และ 1050 องศาเซลเซียส เวลาอบชุบ 20 และ 30 ชั่วโมง โดยทำการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นผิวแพร่ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และทำการทดสอบความแข็งผิวแพร่แบบวิกเกอร์ ส่วนทดสอบการสึกหรออยู่ภายใต้มาตรฐาน ASTM G65 ด้วยเครื่องทดสอบแบบล้ออย่าง จากการทดลอง พบว่า ที่อุณหภูมิอบชุบ 1050 องศาเซลเซียส เวลาอบชุบ 20 ชั่วโมง มีค่าความแข็งชั้นผิวแพร่สูงสุดเฉลี่ย 394.26 HV_{0.02} อัตราการสึกหรอต่ำสุดเฉลี่ย 0.0751 กรัม ลักษณะการสึกหรอแบบร่องลึก และเวลาอบชุบ 30 ชั่วโมง ชั้นผิวแพร่สูงสุดเฉลี่ย 910 ไมครอน โครงสร้างที่เกิดขึ้นในชั้นผิวแพร่ประกอบด้วย Fe₅Si₃, α₁ และ αFe

Abstract

This research aims to study abrasive wear behavior of diffusion layer by pack cementation on low carbon steel. Chemical compositions of pack cementation include 42wt% Ferro-silicon, 17wt% sand, 3wt% NH₄Cl, 12wt% clay, and 26wt% Liquid glass. The specimens were heated in the induction furnace at 950°C and 1050°C for 20 and 30 hrs. Microstructure of diffusion layer was analyzed with Optical and Scanning Electron Microscopy and hardness of diffusion layer was tested with a Vickers indenter. The abrasive wear tests were carried out in a Dry Sand Rubber Wheel abrasion machine according to ASTM G65 standard. Results showed that the heating temperature of 1050°C for 20 hrs. yielded high hardness level of approximately 394.26HV_{0.02} and low average wear resistance of 0.0751g. The worn surface exhibited deep grooves. On the other hand, the heated treatment for 30 hrs. yielded the highest diffusion layer of approximately 910 μm and the microstructure of Fe₅Si₃, α₁ and αFe.

คำสำคัญ : การสึกหรอแบบขูดขีด เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ชั้นผิวแพร่

Keywords: Abrasive Wear, Low Carbon Steel, Diffusion Layer

* ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ Suporn44us@yahoo.com โทร. 08 6418 5732

1. บทนำ

ปัญหาการสึกหรอแบบขูดขีดที่เกิดขึ้นกับวัสดุ นั้นมีผลกระทบต่อเศรษฐกิจและค่าใช้จ่าย โดยได้ ประมาณการไว้ที่ 1 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์ของมูลค่า มวลรวมประชาชาติของประเทศ (V. Jankauskas et al., 2008) และเป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วน ของเครื่องจักรประมาณ 80 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ เป็นการเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของชิ้นส่วน (Wang et al., 2008) ฉะนั้น วิศวกรจึงมีความจำเป็นที่จะต้อง ทราบปัจจัยหรือสาเหตุที่ทำให้เกิดการสึกหรอ และควรเลือกวัสดุหรือหาวิธีการป้องกันการเกิด การสึกหรอให้ถูกต้องและเหมาะสม ในส่วนของ เหล็กที่จะนำมาใช้งานในด้านการต้านทานการ สึกหรอนั้น จะต้องนำมาทำการปรับปรุงสมบัติของ พื้นผิวหน้าก่อนด้วยกรรมวิธีทางการอบชุบด้วยความร้อน (Milo, 2002)

กระบวนการ Pack Cementation เป็น กระบวนการอย่างหนึ่งของกรรมวิธีการอบชุบ ทางความร้อน ซึ่งเป็นการเพิ่มสมบัติของวัสดุทาง กายภาพ (ASM, 1995 และ สุพร ฤทธิภักดี และ คณะ, 2547) เพื่อให้เหล็กทนต่อการเกิดออกซิเดชัน และต้านทานการสึกหรอ กระบวนการ Pack Cementation จะต้องมีธาตุหลักในการแพร่เข้าไป ภายในเนื้อเดิมของวัสดุหรือเคลือบติดอยู่บนผิวหน้า ของวัสดุ ธาตุหลักที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น Al, B, Cr, Si, Ti, V นอกจากนี้ ยังมีสารกระตุ้น ในกลุ่มฮาโลเจน เช่น AlF_3 , NH_4Cl ซึ่งจะเป็นตัว ทำให้เกิดการแพร่ของอะตอมของธาตุที่เติมเข้าไป ในเนื้อเดิมหรือผิวหน้าของวัสดุ อุณหภูมิในการ อบชุบ 900 ถึง 1150 องศาเซลเซียส นอกจากนี้

ยังมีต้นทุนและค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ ตลอดจนเป็น กระบวนการเพิ่มความแข็งแรงผิวที่ง่ายและสะดวก (สุพร ฤทธิภักดี และคณะ, 2552)

สำหรับการทดสอบการสึกหรอแบบ Dry Sand Rubber Wheel : DSRW เป็นวิธีการทดสอบ ที่ใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากสามารถกำหนด เงื่อนไขการทดสอบได้ เช่น แรงกดชิ้นงานที่คงที่ หรือการกำหนดระยะทางในการทดสอบ และการ ทดสอบแต่ละครั้งจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน (สุพร ฤทธิภักดี และคณะ, 2553 และ Selvi et al., 2008 และ Vernon, 2009) จากเหตุผลในการ ทดสอบการสึกหรอดังกล่าวข้างต้น นำมาสู่ การทดลองครั้งนี้ อุตสาหกรรมที่นิยมนำการทดสอบ ดังกล่าวมาทดลอง เช่น อุตสาหกรรมน้ำมัน เหมือนแร่ อุตสาหกรรมด้านการเกษตร และ เช่นเดียวกันมีการใช้ในห้องปฏิบัติการทาง วิทยาศาสตร์โดยเฉพาะการทดสอบด้านวัสดุ วิศวกรรมซึ่งเป็นการทดสอบในลักษณะ Low Stress Abrasion อย่างเช่น เครื่องดัก เครื่องลาก หรือใบเกลี่ยถนน ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ เครื่องมือด้าน การเกษตร ส่วนประกอบของโครงสร้าง และการ ทดสอบผิวเคลือบ

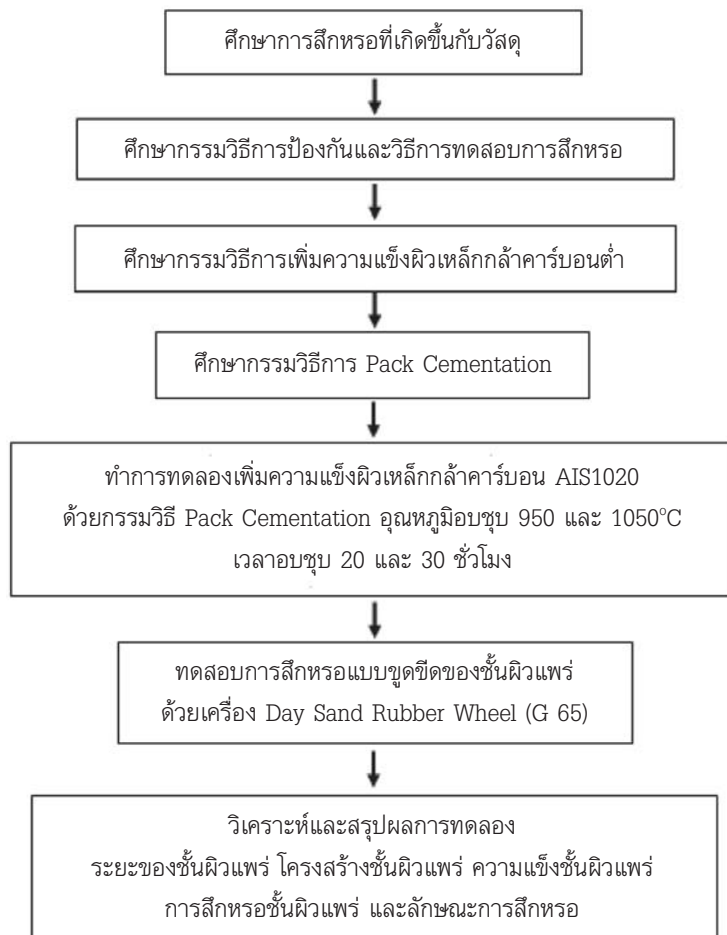
จากข้อมูลปัญหาดังกล่าวข้างต้น จึงทำให้ มีแนวคิดหาวิธีการและขั้นตอนการเพิ่มความแข็งแรง ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เพื่อให้ได้มาซึ่งความ ต้านทานการสึกหรอแบบขูดขีด โดยใช้อุปกรณ์และ วัสดุที่มีอยู่ในประเทศไทย และมีความสะดวก ราคาถูก ง่าย และปลอดภัย ตลอดจนสามารถ นำมาใช้ในการเรียนการสอนในสถาบันการศึกษา ที่เกี่ยวข้องกับวิชาด้านโลหะวิทยาได้อีกด้วย

2. วิธีการทดลอง

2.1 ขั้นตอนการวิจัยและการทดลอง

ขั้นตอนการทำวิจัยและทดลองในครั้งนี้
เริ่มด้วยทำการศึกษาปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับ

การสึกหรอ แนวทางการแก้ไข การเพิ่มความแข็งแรงให้กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ การทดสอบการสึกหรอแบบชุดขีด และด้านอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัยครั้งนี้ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการปฏิบัติงานวิจัยและการทดลอง

2.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

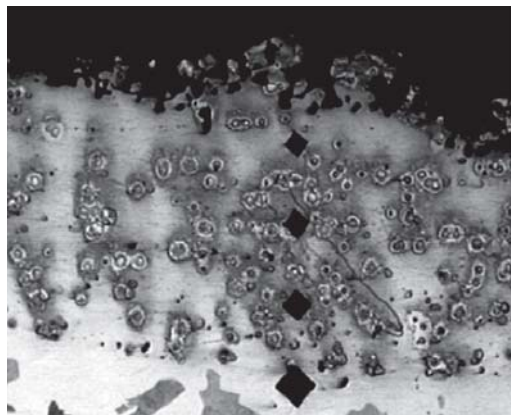
ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นเหล็กคาร์บอนต่ำ AISI1020 ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป มีส่วนผสมทางเคมี 0.1991 %C, 0.1725 %Si, 0.0121 %S, 0.0144 %P, 98.7454 %Fe เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำสามารถนำไปเป็นโครงสร้างในส่วนต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ง่ายต่อการตัดแต่ง และนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน นอกจากนี้ ยังนำมาสร้างชิ้นส่วนของเครื่องจักร ตลอดจนสามารถนำมาปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติดีขึ้น (John et al., 2009 และ Buchanan et al., 2007)

ส่วนผสมทางเคมีของกระบวนการ Pack Cementation ประกอบด้วย Ferro silicon 42% (ขนาดอนุภาค 70 mesh), Sand 17%, NH_4Cl 3%, Clay 12%, Liquid glass 26% โดยน้ำหนัก สำหรับการผสมส่วนผสมทางเคมีได้ใช้เครื่องผสมแบบ Ball Mill (Amado et al., 2008) ใช้เวลาผสม 10 นาที เตาอบชุบที่นำมาใช้ในการทดลองแบบ Box Type โดยมีเงื่อนไขการทดลองที่อุณหภูมิอบชุบ 950 และ 1050 องศาเซลเซียส เวลาอบชุบในแต่ละช่วงอุณหภูมิ 20 และ 30 ชั่วโมง อัตราความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที (Ching et al., 2004) และปล่อยให้ชิ้นงานทดลองให้เย็นตัวภายในเตาอบชุบจนถึงอุณหภูมิห้อง

2.3 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของชิ้นผิวแปรของชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 4 การทดลอง ประกอบด้วยเครื่อง Optical Microscopy : OM, Scanning Electron Microscopy : SEM, Energy Dispersive

Spectrometer : EDS และการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นผิวแปรใช้ระบบการทดสอบแบบ Vickers Micro-hardness น้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบความแข็ง 200 กรัม เวลา 15 วินาที การวัดค่าความแข็งผิวแปรเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการทดลองในแต่ละชิ้นจะทำการวัด 12 ตำแหน่ง ในแต่ละตำแหน่งจะทำการวัดจากผิวแปรเคลือบเข้าไปภายในผิวชิ้นงาน 12 จุด โดยทำการวัดจุดแรกห่างจากผิวแปรเคลือบเข้ามา $100\ \mu\text{m}$ และจุดถัดไปห่างจุดละ $100\ \mu\text{m}$ เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2

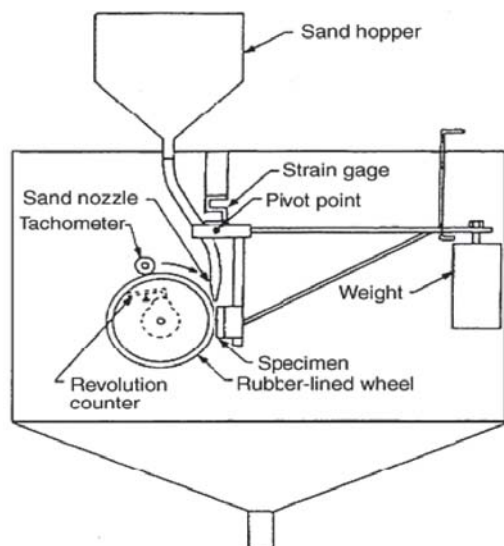


รูปที่ 2 ภาพตัดขวางของชิ้นงานในการวัดค่าความแข็งผิวแปร

2.4 การทดสอบการสึกหรอ

ก่อนการทดสอบการสึกหรอแบบชุดขีด ชิ้นงานจะต้องทำความสะอาดด้วยอะซิโตน (Acetone) และทำการชั่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งแบบไฟฟ้าที่มีความละเอียด 0.0001 กรัม (Wang et al., 2006) การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM G65 โดยใช้เครื่องทดสอบแบบ Dry Sand/Rubber Wheel ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยล้อเหล็กและขอบยาง มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 228 มิลลิเมตร กว้าง 12.7 มิลลิเมตร ความแข็งขอบยาง Curometer

A-60 ± 2 อัตราการไหลของทรายที่ปลายท่อ 300 ถึง 400 กรัมต่อนาที และจะต้องสามารถนับจำนวนรอบของการหมุนของล้ออย่าง ตลอดจนสามารถวัดน้ำหนักของแรงกดขึ้นงานได้ แรงหรือน้ำหนักที่เกิดขึ้นงานจะต้องตั้งฉากกับการไหลของทราย



รูปที่ 3 เครื่องทดสอบ Dry Sand Rubber Wheel

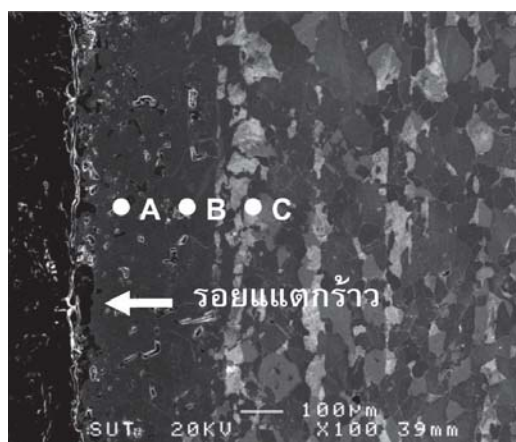
สำหรับเงื่อนไขการทดสอบที่ได้กำหนดไว้ ประกอบด้วย แรงกดขึ้นงาน 49 นิวตัน ระยะในการทดสอบ 6 ระดับ คือ 718, 1436, 2154,

2872, 3590 และ 4308 เมตร ความเร็วรอบของล้อยาง 200 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของทราย 300 กรัมต่อนาที. สำหรับทรายที่นำมาทดสอบครั้งนี้เป็นทรายแก้วมีขนาด 212 ถึง 300 ไมครอน และทำการอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้องก่อนจึงจะนำมาทดสอบ หลังจากการทดสอบในแต่ละช่วงระยะทางการทดสอบขึ้นงานจะต้องนำมาทำความสะอาดด้วยอะซิโตนและนำไปชั่งน้ำหนัก และทำการบันทึกน้ำหนักที่สูญเสีย

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

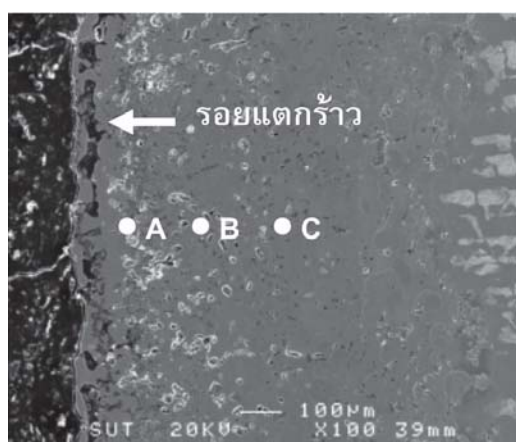
3.1 โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างที่เกิดขึ้นในชั้นผิวแพรมบนเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1020 ที่ผ่านการ Pack Cementation ที่อุณหภูมิอบชุบ 950 และ 1050 องศาเซลเซียส เวลาอบชุบ 20 และ 30 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy : SEM, Energy Dispersive Spectrometer : EDS ดังแสดงในรูปที่ 4 (a), (b) และรูปที่ 5 (a), (b) ตามลำดับ



Composition at. (semi-quantitative)		
Location	Fe	Si
A	71.47	28.26
B	79.10	20.90
C	90.53	9.47

(a)



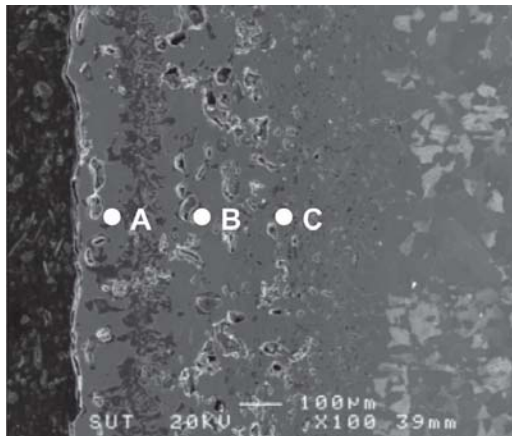
Composition at. (semi-quantitative)		
Location	Fe	Si
A	81.46	18.54
B	88.65	11.35
C	95.31	4.69

(b)

รูปที่ 4 โครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของชั้นผิวแพร์ที่อุณหภูมิอบชุบ 950 องศาเซลเซียส (a) 20 ชั่วโมง (b) 30 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4 (a) แสดงโครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของชั้นผิวแพร์ชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลาอบชุบ 20 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ปริมาณของซิลิคอนที่มากที่สุดจะอยู่ในบริเวณผิวหน้าของชั้นผิวแพร์ในตำแหน่ง A ซึ่งมีปริมาณของซิลิคอน 28.26 at% และในตำแหน่ง B และ C มีปริมาณของซิลิคอน 20.90 และ 9.47 at% ตามลำดับ และเมื่อนำปริมาณของเปอร์เซ็นต์อะตอมซิลิคอนทั้งสามตำแหน่งเทียบกับแผนภาพสมดุลโลหะผสมเหล็กกับซิลิคอน พบว่า เฟสที่เกิดขึ้นในตำแหน่งจุด A, B และ C คือ เฟส Fe_5Si_3 , α_1 และ αFe ตามลำดับ

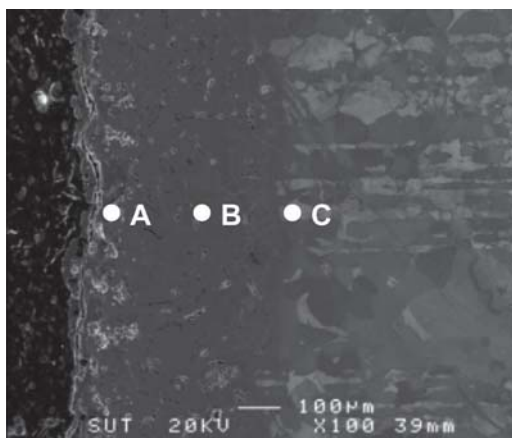
และจากรูปที่ 4 (b) แสดงโครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของชั้นผิวแพร์ชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลาอบชุบ 30 ชั่วโมง ผลการทดลองเป็นไปในลักษณะเดียวกับชั้นผิวแพร์ชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบเวลา 20 ชั่วโมง กล่าวคือ ปริมาณของซิลิคอนที่มากที่สุดจะอยู่ในบริเวณผิวหน้าของชั้นผิวแพร์ในตำแหน่ง A ซึ่งมีปริมาณของอะตอม 18.54 at% และในตำแหน่ง B และ C มีปริมาณของอะตอม 11.35 และ 4.69 at% และเมื่อนำปริมาณของเปอร์เซ็นต์อะตอมทั้งสามตำแหน่งเทียบกับแผนภาพสมดุลโลหะผสมเหล็กกับซิลิคอน พบว่า เฟสที่เกิดขึ้นในตำแหน่งจุด A คือ เฟส α_1 จุด B และ C เฟสที่เกิดขึ้น คือ αFe นอกจากนี้ จะสังเกตเห็นบริเวณผิวหน้าของชั้นผิวแพร์จะมีรอยแตกร้าวซึ่งเป็นลักษณะแผ่นฟิล์มของซิลิคอนออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการอบชุบ และอาจจะมีผลต่อการต้านทานการสึกหรอต่อไป



Composition at. (semi-quantitative)

Location	Fe	Si
A	72.41	27.59
B	79.10	20.90
C	89.86	10.14

(a)



Composition at. (semi-quantitative)

Location	Fe	Si
A	79.68	20.32
B	85.95	14.05
C	91.84	8.16

(b)

รูปที่ 5 โครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของชั้นผิวแพร์ที่อุณหภูมิอบชุบ 1050 องศาเซลเซียส (a) 20 ชั่วโมง (b) 30 ชั่วโมง

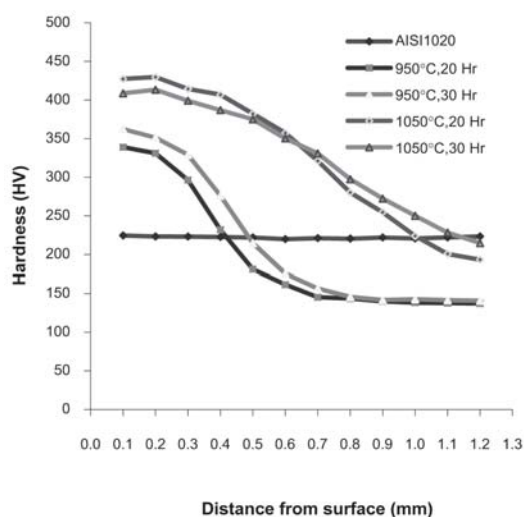
และจากรูปที่ 5 (a) แสดงโครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของชั้นผิวแพร์ชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส เวลาอบชุบ 20 ชั่วโมง การทดลองเป็นไปในลักษณะเดียวกับชิ้นผิวแพร์ชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส กล่าวคือ ปริมาณของซิลิคอนที่มากที่สุดจะอยู่ในบริเวณผิวหน้าของชั้นผิวแพร์ในตำแหน่ง A ซึ่งมีปริมาณของอะตอม 27.59 at% และในตำแหน่ง B และ C มีปริมาณของอะตอม 20.90 และ 10.14 at% และเมื่อนำปริมาณของเปอร์เซ็นต์อะตอมทั้งสามตำแหน่งเทียบกับแผนภาพสมดุลโลหะผสมเหล็กกับซิลิคอน พบว่าเฟสที่เกิดขึ้นในตำแหน่งจุด A และ B คือ เฟส α_1 และจุด C คือ เฟส α_{Fe}

และจากรูปที่ 5 (b) แสดงโครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของชั้นผิวแพร์ชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส เวลาอบชุบ 30 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณของซิลิคอนที่มากที่สุดจะอยู่ในบริเวณผิวหน้าของชั้นผิวแพร์ในตำแหน่ง A ซึ่งมีปริมาณของอะตอม 20.32 at% และในตำแหน่ง B และ C มีปริมาณของอะตอม 14.05 และ 8.16 at% เฟสที่เกิดขึ้นในตำแหน่งจุด A คือ เฟส α_1 และเฟสที่เกิดขึ้นในตำแหน่งจุด B และ C คือ เฟส α_{Fe} และสิ่งที่สังเกตอีกอย่างหนึ่ง คือ จากการทดลองครั้งนี้พบว่า ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของซิลิคอนจะลดลงตามความลึกของระยะผิวแพร์

3.2 ความแข็ง

ชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบในแต่ละการทดลองจะต้องนำมาตัดตามขวางและทำการขัดเงาด้วยกระดาษทรายน้ำและผงอลูมิน่า เพื่อให้ได้มาซึ่งผิวที่มีความสะอาดและไม่มีรอยขูดขีด ตลอดจนเป็น

มันเงา เพื่อนำผิวแพร์ดังกล่าวไปวัดค่าความแข็ง และระยะความหนาของชั้นผิวแพร์ สำหรับการ วัดค่าความแข็งของชั้นผิวแพร์จะวัดจากผิวนอกสุด ของชั้นผิวแพร์เข้าสู่ภายในชิ้นงาน โดยในแต่ละจุด ห่างกัน 100 ไมครอน ผลการทดลองที่ได้ดังแสดง ในรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งเหล็กคาร์บอน AISI1020 ผ่านวิธี Pack Cementation อุณหภูมิอบชุบ 950 และ 1050 องศาเซลเซียส

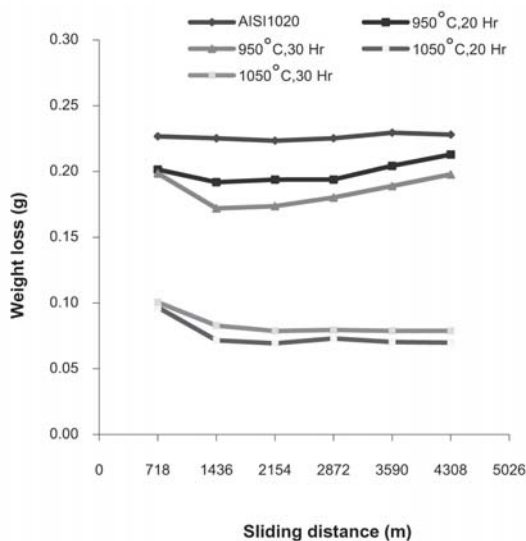
จากรูปที่ 6 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบ ค่าความแข็งเหล็กคาร์บอน AISI1020 ผ่านวิธี Pack Cementation อุณหภูมิอบชุบ 950 และ 1050 องศาเซลเซียส ผลการทดลอง พบว่า ความ แข็งผิวของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบมีค่าความ แข็งเฉลี่ย 214.6 HV_{0.02} และค่าความแข็งผิวแพร์ ของชิ้นงานผ่านการอบชุบที่อุณหภูมิ 950 องศา เซลเซียส เวลา 20 และ 30 ชั่วโมง มีค่าความแข็ง ผิวแพร์เฉลี่ย 319.27 และ 332.28 HV_{0.02} มีความหนาของชั้นผิวแพร์ 375.00 และ 435.00 ไมครอน ตามลำดับ และค่าความแข็งผิวแพร์เฉลี่ย

ของชิ้นงานผ่านการอบชุบที่อุณหภูมิ 1050 องศา เซลเซียส เวลา 20 และ 30 ชั่วโมง มีค่าความแข็ง ผิวแพร์เฉลี่ย 394.26 และ 377.22 HV_{0.02} มีความหนาของชั้นผิวแพร์ 825.00 และ 910.00 ไมครอน ตามลำดับ ค่าความแข็งของผิวแพร์ที่มี ค่าสูงสุดสำหรับการทดลองนี้อยู่ภายใต้เงื่อนไข การอบชุบที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส เวลา 20 ชั่วโมง และค่าความแข็งที่ต่ำสุดอยู่ภายใต้ เงื่อนไขการอบชุบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 20 ชั่วโมง ส่วนระยะความหนาของชั้นผิวแพร์ ที่หนาที่สุดอยู่ภายใต้เงื่อนไขการอบชุบที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส เวลา 30 ชั่วโมง และค่าที่ ต่ำสุดอยู่ภายใต้เงื่อนไขการอบชุบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 20 ชั่วโมง

ผลการทดลองค่าความแข็งชั้นผิวแพร์ครั้งนี้ พบว่าอุณหภูมิการอบชุบมีผลต่อค่าความแข็ง กว่า คือ เมื่ออุณหภูมิอบชุบเพิ่มขึ้นค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ตาม และเวลาการอบชุบจะไม่มีผลต่อค่าความแข็ง ผิวแพร์ ส่วนระยะความหนาของชั้นผิวแพร์พบว่า เมื่ออุณหภูมิและเวลาอบชุบเพิ่มขึ้นระยะผิวแพร์ เพิ่มขึ้นตามเช่นกัน

3.3 การสึกหรอ

การทดสอบการสึกหรอภายใต้เงื่อนไขการ ทดสอบแบบ Dry Sand Rubber Wheel : DSRW ตามมาตรฐาน ASTM G65 น้ำหนักที่ใช้ในการ กดชิ้นงาน 49 นิวตัน ระยะทางที่ใช้ในการทดสอบ แต่ละช่วงห่างกัน 718 เมตร และการหาอัตรา การสึกหรอวัดได้จากน้ำหนักของชิ้นงานก่อนและ หลังการทดสอบในแต่ละช่วงระยะทาง ซึ่งผลการ ทดลองดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของเหล็ก AISI1020 ที่ผ่านวิธี Pack Cementation อุณหภูมิอบชุบ 950 และ 1050 องศาเซลเซียส

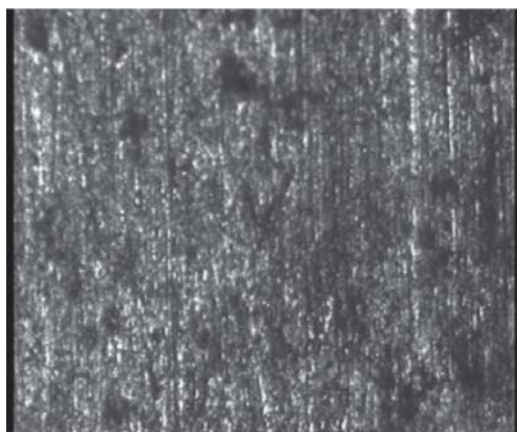
จากรูปที่ 7 เป็นกราฟเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของเหล็ก AISI1020 ที่ผ่านวิธี Pack Cementation อุณหภูมิอบชุบ 950 และ 1050 องศาเซลเซียส ผลการทดลอง พบว่า ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบ (AISI1020) มีอัตราการสึกหรอค่อนข้างสม่ำเสมอเมื่อระยะทางการทดสอบเพิ่มขึ้น โดยมีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 0.2264 กรัม และเมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบทั้ง 4 การทดลอง พบว่า ที่ระยะทางการทดสอบ 718 เมตร มีอัตราการสึกหรอที่สูงและเป็นไปในลักษณะเดียวกัน ทั้งนี้อาจจะมาจากสาเหตุบริเวณผิวหน้า

ของชิ้นผิวแพร์มีการเกาะยึดติดกันไม่ดี และอาจมีการแตกร้าวของชิ้นผิวแพร์ และเมื่อพิจารณาอัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลาอบชุบ 20 และ 30 ชั่วโมง พบว่า มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 0.1997 และ 0.1852 กรัม และที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส เวลาอบชุบ 20 และ 30 ชั่วโมง มีอัตราการสึกหรอเฉลี่ย 0.0751 และ 0.0832 กรัม ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาอัตราการสึกหรอของชิ้นผิวแพร์ที่มีค่าการสึกหรอสูงสุด คือ ชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลาอบชุบ 30 ชั่วโมง และอัตราการสึกหรอต่ำสุดที่ชิ้นงานผ่านการอบชุบที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส เวลาอบชุบ 20 ชั่วโมง

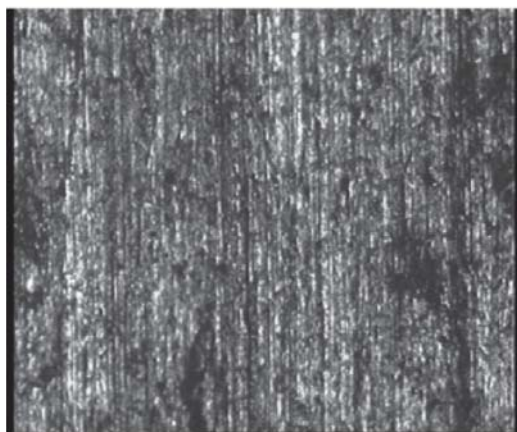
จากผลการทดลองครั้งนี้ พบว่า ระยะผิวแพร์ยังมีความหนาอายุการใช้งานของชิ้นงานยิ่งเพิ่มขึ้น และเมื่อชิ้นผิวแพร์มีค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้น การต้านทานการสึกหรอยิ่งเพิ่มสูงขึ้นตาม

3.4 ลักษณะการสึกหรอ

ลักษณะการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนชิ้นผิวแพร์ของเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1020 ที่ผ่านการอบชุบที่อุณหภูมิ 950 และ 1050 องศาเซลเซียส เวลาอบชุบ 20 และ 30 ชั่วโมง ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 8 (a), (b) และรูปที่ 9 (a), (b)



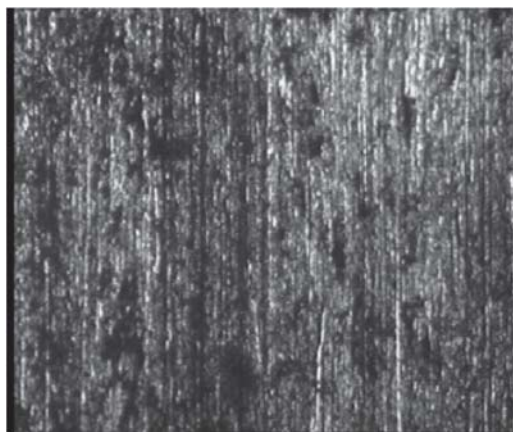
(a)



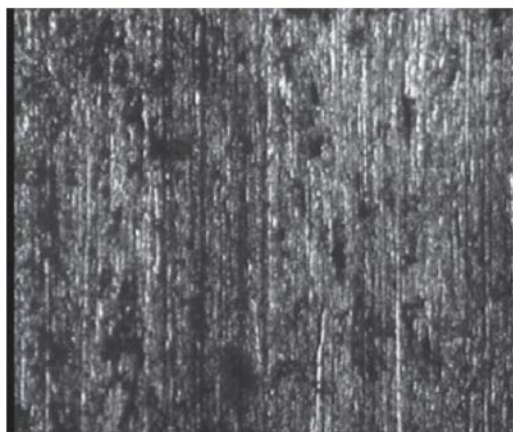
(b)

รูปที่ 8 ลักษณะการสึกหรอบนชั้นผิวแพร์ที่อุณหภูมิ
อบชุบ 950 องศาเซลเซียส (a) เวลาอบชุบ
20 ชั่วโมง (b) เวลาอบชุบ 30 ชั่วโมง

จากรูปที่ 8 (a) และ (b) แสดงลักษณะการ
สึกหรอของชั้นผิวแพร์ที่อุณหภูมิอบชุบ 950 องศา
เซลเซียส เวลาอบชุบ 20 และ 30 ชั่วโมง ลักษณะ
การสึกหรอที่เกิดขึ้นมีลักษณะแบบราบเรียบ ทั้งนี้
มีผลมาจากค่าความแข็งของชั้นผิวแพร์ที่มีค่า
ค่อนข้างต่ำ จึงทำให้ชั้นผิวแพร์สึกหรอได้ง่าย และ
การเกาะยึดของชั้นผิวแพร์ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน
ทั้งที่โครงสร้างในบริเวณผิวหน้าของชั้นผิวแพร์มี
โครงสร้างเป็นเฟส Fe_5Si_3 ซึ่งมีค่าความแข็งกว่า
โครงสร้าง α_1



(a)



(b)

รูปที่ 9 ลักษณะการสึกหรอบนชั้นผิวแพร์ที่อุณหภูมิ
อบชุบ 1050 องศาเซลเซียส (a) เวลาอบชุบ
20 ชั่วโมง (b) เวลาอบชุบ 30 ชั่วโมง

และจากรูปที่ 9 (a) และ (b) แสดงลักษณะ
การสึกหรอของชั้นผิวแพร์ที่อุณหภูมิอบชุบ 1050
องศาเซลเซียส เวลาอบชุบ 20 และ 30 ชั่วโมง
ลักษณะการสึกหรอที่เกิดขึ้นมีลักษณะแบบร่องลึก
(Grooves) และเส้นยาว (Cutting) ทั้งนี้มีผล
มาจากค่าความแข็งของชั้นผิวแพร์ที่สูง ประกอบกับ
การเกาะยึดของชั้นผิวแพร์มีลักษณะเป็นเนื้อ
เดียวกัน และในขณะที่มีค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้น
ค่าความเปราะของชั้นผิวแพร์ย่อมเกิดขึ้นตาม

จึงอาจจะส่งผลให้ชั้นผิวแพร่ในส่วนที่มีความเปราะเกิดการสึกหรอแบบร่องลึกได้

4. สรุป

จากการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอแบบชุดขีดของชั้นผิวแพร่โดยการ Pack Cementation บนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำสามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

4.1 อุณหภูมิและเวลาการอบชุบมีผลต่อหนาของชั้นผิวแพร่ กล่าวคือ อุณหภูมิและเวลาการอบชุบเพิ่มสูงขึ้นทำให้ชั้นผิวแพร่มีความหนาเพิ่มขึ้น อุณหภูมิอบชุบที่ 1050 องศาเซลเซียส เวลาอบชุบ 30 ชั่วโมง มีความหนาของชั้นผิวแพร่มากที่สุดเฉลี่ย 910 ไมครอน

4.2 อุณหภูมิอบชุบมีผลต่อค่าความแข็งของชั้นผิวแพร่ กล่าวคือ อุณหภูมิอบชุบเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแข็งของชั้นผิวแพร่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบชุบที่ 1050 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งมากที่สุดเฉลี่ย $394.26 \text{ HV}_{0.02}$

4.3 ค่าความแข็งของชั้นผิวแพร่มีผลต่อการต้านทานการสึกหรอ กล่าวคือ ค่าความแข็งของชั้นผิวแพร่ยังเพิ่มขึ้นการต้านทานการสึกหรอยังเพิ่มขึ้นที่ค่าความแข็งชั้นผิวแพร่เฉลี่ย $394.26 \text{ HV}_{0.02}$ มีอัตราการสึกหรอต่ำสุดเฉลี่ย 0.0751 กรัม

4.4 โครงสร้างเฟส α_1 ที่เกิดขึ้นในชั้นผิวแพร่ที่อุณหภูมิอบชุบ 1050 องศาเซลเซียส มีผลต่อการต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่า โครงสร้างเฟส Fe_3Si_3 ที่เกิดขึ้นในชั้นผิวแพร่ที่อุณหภูมิอบชุบ 950 องศาเซลเซียส

4.5 ลักษณะการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนชั้นผิวแพร่จะมีลักษณะแบบราบเรียบสำหรับชั้นผิวแพร่ที่มีค่าความแข็งต่ำ และจะมีลักษณะแบบร่องลึก (Grooves) และแบบเส้น (Cutting) สำหรับชั้นผิวแพร่ที่มีค่าความแข็ง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการใช้เครื่องมือและสถานที่ในการทดลองจาก สาขาวิศวกรรม-อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และภาควิชาวิศวกรรม-อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และขอขอบคุณบุคลากรทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ จนทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- สุพร ฤทธิภักดี, นภิสพร มีมงคล, สงวน ตั้งโพธิ์ธรรม, เสน่ห์ ธีรธาดาลักษณ์ และสมพร พงศ์ขจร. 2547. การศึกษาการสึกหรอของผิวเชื่อมพอกแข็งเพื่อหาอายุการใช้งานด้วยลวดเชื่อมพอกแข็งชนิดต่าง ๆ. สาขาวิศวกรรม-อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สุพร ฤทธิภักดี, สุขอังคณา ลิ, สุริยา ไชยสวัสดิ์, เจริญ ชุ่มมวอล, นลิน เพียรทอง, และนภิสพร มีมงคล. 2552. Improving the Surface Hardening by Pack Cementation on AISI1020 Steel. การประชุมวิชาการ ข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2552, โรงแรมพูลแมนขอนแก่น ราชอาณัติ, ขอนแก่น, 21-22 ตุลาคม พ.ศ. 2552.

- สุพร ฤทธิภักดี, และสุรพล สุภารัตน์. 2553. **การสึกหรอแบบขัดสีของเนื้อเดิมลวดเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็กกล้า AISI1020.** การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2553, โรงแรมสุนีย์แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชันเซ็นเตอร์, อุบลราชธานี, 13-15 ตุลาคม พ.ศ. 2553.
- ASM Handbook. 1995. **Mechanical Testing.** Vol. 08. United States of America. ASM International. pp. 90-103, 604-607.
- Amado Cruz Crespo, Américo Scotti, Manuel Rodriguez Pérez. 2008. **Operational behavior assesment of coated tubular electrodes for SMAW hardfacing.** journal of processing technology 199, 265-273.
- Ching-Yuan Baia, Yi-Jun Luob, Chun-Hao Koob. 2004. **Improvement of high temperature oxidation and corrosion resistance of superalloy IN-738LC by pack cementation.** Surface and Coatings Technology 183 (2004), 74-88.
- John J. Coronado, Holman F. Caicedo and Adolfo L. Gómez. 2009. **The effects of Welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits.** Tribology International 42, 745-749.
- Milo Dumovic. 2002. **Repair and Maintenance Procedures for Heavy Machinery Components.** Welding Technology Centre The Lincoln Electric Company. Australia.
- S.-H. Wang, J.-Y. Chen, L. Xue. 2006. **A study of the abrasive wear behaviour of laser-clad tool steel coatings.** Surface & Coatings Technology 200 (2006) 3446-3458.
- S. Selvi, S.P. Sankaran, R. Srivatsavan. 2008. **Comparative study of hardfacing of valve seat Ring using MMAW process.** journal of materials processing technology 207, 356-362.
- V.E. Buchanan, P.H. Shipway, D.G. McCartney. 2007. **Microstructure and abrasive wear Behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry.** Wear 263 (2007) 99-110.
- V. Jankauskas, R. Kreivaitis, D. Milčius, A. Baltušnikas, 2008. **Analysis of abrasive wear performance of arc welded hard layers.** Wear 265 (2008) 1626-1632.
- Vernon E. Buchanan. 2009. **Solidcation and microstructural characterisation of iron-chromiu based hardfaced coatings deposited by SMAW and electric arc spraying.** Surface & Coatings Technology 203, 3638-364.
- X.H. Wang, F. Han b, X.M. Liu, S.Y. Qu, Z.D. Zou. 2008. **Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of Fe-based hardfacing coatings.** Materials Science and Engineering A 489, 193-200.