

การศึกษาอิทธิพลในการเพิ่มความแข็งด้วยทองแดงในเศษโลหะอลูมิเนียมผสมเกรด 3xxx โดยผ่านกระบวนการบ่มแข็ง

Effect of copper on enhancement of hardness in age-hardened scrap 3xxx Aluminium

นายณพล รัตนเพียร

นายศิรา ไทยรัตน์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิศิษฐ์ โล้เจริญรัตน์, วศ.ม.

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โทร. 02-942-8555 โทรสาร 02-955-1811 Email: fengwsl@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของการบ่มแข็งต่อค่าความแข็งของโลหะอลูมิเนียมผสมทองแดง ซึ่งงานทดสอบทั้งหมดถูกทำให้เป็นสารละลายของแข็งเฟสเดียว โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว และทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 กับ 190 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาต่างๆ ตั้งแต่ 5 นาที ถึง 100 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเย็นตัวอย่างรวดเร็วและการบ่มแข็งมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบรอกเวล พบว่าค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงเวลา ณ อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งค่าความแข็งในช่วง GP Zone จะมากกว่าช่วงสารละลายของแข็งอิ่มตัวยังขาด และหากเกิดเฟส  $\theta''$  และ  $\theta'$  จะสามารถส่งผลต่อสมบัติทางกล เช่น ค่าความแข็ง ฯลฯ ได้ ในทางกลับกัน ค่าความแข็งลดลงในช่วงเกิดเฟส  $\theta$  (over-aged) ที่ผ่านการบ่มแข็งเป็นเวลานาน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ค่าความแข็งนั้นขึ้นกับโครงสร้างจุลภาคของการตกตะกอน

Abstract

This research was to study the effects of aging on the hardness of aluminum-copper alloy. All specimens were single phase solid solution. By heating the specimens at 550 ° C for 8 hours and then cooled rapidly. Then ageing at 170 and 190 °C with various times since 5 minutes to 100 hours. After the specimen is cooled rapidly and aged are testing with Rockwell hardness test machine for testing the hardness level. The hardness increased from time to time, at the same temperature. The hardness of the GP Zone is greater than the super saturated

solid solution. And the phase  $\theta''$  and  $\theta'$  can affect the mechanical properties such as hardness, etc. On the-other hand, the hardness decreases during the phase  $\theta$  (over-aged) was aged for long times. It can be concluded that the hardness depends on the microstructure of the precipitate.

1. บทนำ

อุตสาหกรรมโลหะในประเทศไทยปัจจุบันนี้มีความก้าวหน้าและหลากหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมโลหะอลูมิเนียม เช่น ในอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอากาศยาน และอุตสาหกรรมเครื่องจักรป้องกันแต่ด้วยเหตุที่แหล่งแร่ที่ใช้ผลิตอลูมิเนียมในเมืองไทยมีไม่เพียงพอเมืองไทยจึงไม่เหมาะสมนักในการถลุงแร่อลูมิเนียมเอง ดังนั้นในอุตสาหกรรมต่างๆ จะใช้การนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งหากสามารถนำขยะอลูมิเนียมที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ จะเป็นการลดการนำเข้าอลูมิเนียมและค่าใช้จ่ายได้อีกมาก ด้วยเหตุนี้หากนำเศษขยะอลูมิเนียมกลับมาใช้ใหม่โดยผ่านกระบวนการทางความร้อนหรือการเค็มโลหะบางชนิดเข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการเพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ น่าจะมีประโยชน์และเหมาะสมกับอุตสาหกรรมอลูมิเนียมในประเทศไทย

การบ่มแข็งเป็นกระบวนการปรับปรุงสมบัติทางกลอย่างหนึ่งของการเพิ่มความแข็งให้กับอลูมิเนียมผสมโดยตกผลึกกระบวนการตกผลึกนี้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคของอลูมิเนียมผสม และเนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคนี้นำผลทำให้สมบัติทางกลของ

อุณหภูมิเนื้อมผสม โดยเฉพาะค่าความแข็งมีค่าสูงยิ่งขึ้นมี ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาอิทธิพลในการเพิ่มความแข็งด้วยทองแดงใน เศษโลหะอลูมิเนียมผสมเกรด 3xxx (เศษกระป๋องอลูมิเนียม) โดย ผ่านกระบวนการบ่มแข็งในอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน เนื่องจากการเติมทองแดงทำให้สามารถปรับปรุงโครงสร้างทาง จุลภาคได้ด้วยการตกผลึกและยังเป็นการรีไซเคิลวัสดุเหลือใช้ได้อีกทางหนึ่ง

## วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ปรับปรุงสมบัติทางกลของตัวกระป๋องอลูมิเนียม ด้วยการเติมทองแดงผ่านกระบวนการอบชุบแข็งและกระบวนการตกผลึกตกผลึก
2. ศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อค่าความแข็งของอลูมิเนียมผสม Al-5% wt Cu

## วิธีการดำเนินโครงการ

### 1. การหล่อชิ้นงานทดสอบ

- 1.1. อุ่นเตาหลอม โดยค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทีละน้อย และนำแบบหล่อกราไฟต์มาวางบริเวณข้างเตาหลอม เพื่อทำการไล่ความชื้นและป้องกันการขยายตัวโดยฉับพลัน
- 1.2. นำทองแดงที่เตรียมไว้เป็นชิ้นเล็กๆ ไล่ลงไปในเตาหลอมและทำการหลอมละลายจนทองแดงทั้งหมดละลาย จากนั้นลดอุณหภูมิให้ได้ประมาณ  $780 \pm 20^\circ\text{C}$
- 1.3. ใส่เศษของตัวกระป๋องอลูมิเนียมที่จัดเตรียมไว้ในเตาหลอม ทำการกวนและดักสแลกพวกแอกไซด์ที่ลอยอยู่บนผิวหน้าของโลหะหลอมเหลวออก
4. ทำการโรยและกวนฟลักซ์ โดยใช้ปริมาณ 0.2-0.3 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของโลหะหลอมเหลวปล่อยทิ้งไว้ประมาณ 20 วินาที กวาดฟลักซ์ทิ้ง
5. เป่ากวนไล่แก๊สไฮโดรเจนด้วยแก๊สอาร์กอน
6. เทอลูมิเนียมหลอมเหลวลงในแบบหล่อกราไฟต์ โดยให้ได้อุณหภูมิที่  $720 \pm 10^\circ\text{C}$
7. ทิ้งอลูมิเนียมหลอมเหลวไว้ในแบบ 90 – 120 วินาที แล้วจึงเทชิ้นงานออกจากแบบและทิ้งให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง

### 2. การทดลองปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อน

1. ตั้งอุณหภูมิเตาอบที่ 1 (MODUTEMP) ไว้ที่  $550^\circ\text{C}$  ทิ้งไว้จนกระทั่งอุณหภูมิของเตาเป็น  $550 \pm 10^\circ\text{C}$
2. นำชิ้นงานทั้งหมดใส่ลงในเตาอบ และทำการอบเป็นเวลา 8 ชั่วโมง
3. ตั้งอุณหภูมิเตาอบที่ 2 (WTB BINDER) ไว้ที่  $170^\circ\text{C}$  ทิ้งไว้จนกระทั่งอุณหภูมิของเตาเป็น  $170 \pm 5^\circ\text{C}$

4. ทำการอบชุบ โดยนำชิ้นงานออกมาจากเตาอบที่ 1 แล้วนำมาจุ่มลงในน้ำที่มีอุณหภูมิ  $25 \pm 5^\circ\text{C}$
5. ทำชิ้นงานให้แห้ง โดยต้องใช้เวลาไม่เกิน 40 วินาที
6. นำชิ้นงานที่ได้จากเตาอบที่ 1 ใส่ในเตาอบที่ 2 เป็นเวลา 8, 10, 12 และ 16 ชั่วโมง ตามลำดับ
7. นำออกจากเตา ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
8. ทำซ้ำในข้อ 3-7 โดยที่เปลี่ยนอุณหภูมิเป็น  $190 \pm 5^\circ\text{C}$

### 3. วิธีทดสอบค่าความแข็ง

ในการตรวจสอบค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ ผู้วิจัยได้ทำการวัดค่าความแข็งแบบรอกเวล สเตก B และใช้โหลดสำหรับกดชิ้นงาน 100 kgf. หัวกดแบบลูกบอลเหล็กขนาด 1/16 นิ้ว รายละเอียดขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

1. ทำการตรวจสอบความแม่นยำของเครื่องด้วยชิ้นงานมาตรฐาน ซึ่งมีค่าความแข็ง  $92.16 \pm 3$  HRB
2. วางชิ้นงานทดสอบบนแท่น หมุนแท่นทดสอบจนมีเสียงสัญญาณ
3. อ่านค่าความแข็งที่ได้บนจอแสดงผลและบันทึก ค่าความแข็ง
4. โดยมีการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน ชิ้นงานละ 3 ครั้ง
5. ทำซ้ำในข้อ 2 – 4 ตามลำดับ จนครบตามจำนวนชิ้นงานทดสอบ

### 4. การเตรียมชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

- 1.1. ชัดชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 240, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ โดยทิศทางการขัดชิ้นงานในแต่ละเบอร์กระดาษทรายจะขัดตั้งฉากกัน
- 1.2. ชัดละเอียดด้วยผงอลูมิเนียมขนาด 1 ไมครอน
- 1.3. นำชิ้นงานมาข้อมสีด้วยสารละลายเคมีที่เตรียมไว้
- 1.4. ล้างด้วยน้ำแล้วเป่าด้วยลมร้อนให้แห้ง ชิ้นงานพร้อมสำหรับนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์

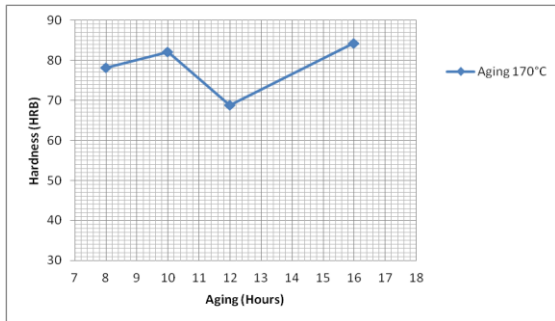
### 5. การเตรียมสาละลายสำหรับกัดผิวหน้างานทดสอบ (Etching)

- 1.1. เตรียมน้ำปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์
- 1.2. เตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม
- 1.3. เตรียมโปแตสเซียมเปอร์แมงกานेट 4 กรัม
- 1.4. ใส่สารทั้งหมดลงในบีกเกอร์
- 1.5. ใช้แท่งแก้วคนสารละลายจนสารทั้งหมดละลาย

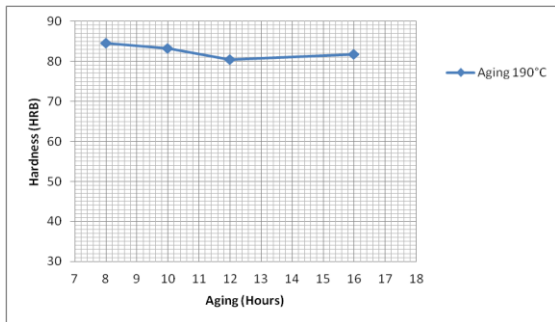
## วิจารณ์ผลการทดลอง

### 1. ผลของค่าความแข็งของอลูมิเนียมผสมทองแดงที่ผ่านกระบวนการบ่มแข็ง

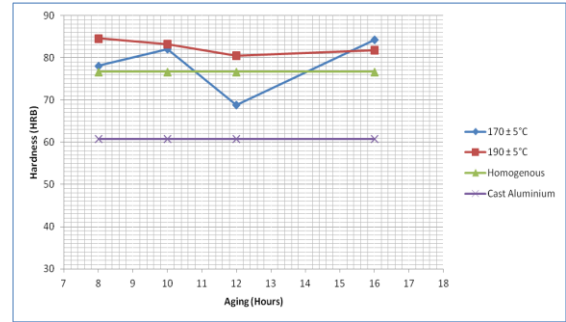
เมื่อได้ทำการทดลองนำชิ้นงานตัวอย่างมาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนของชิ้นงาน โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มแข็ง 2 อุณหภูมิ คือ ที่ช่วงอุณหภูมิ 170°C กับ 190°C และเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการบ่มแข็งหลังจากอบชุบไว้ 4 รูปแบบ คือ ที่ช่วงระยะเวลา 8, 10, 12 และ 16 ชั่วโมง เมื่อนำชิ้นงานมาวัดค่าความแข็งแบบ Rockwell Hardness Test และเมื่อนำข้อมูลค่าความแข็งที่ได้มาทำกราฟเส้น จะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2



รูปที่ 1 กราฟค่าความแข็งของอลูมิเนียมผสมทองแดงที่ผ่านกระบวนการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170°C



รูปที่ 2 กราฟค่าความแข็งของอลูมิเนียมผสมทองแดงที่ผ่านกระบวนการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 190°C



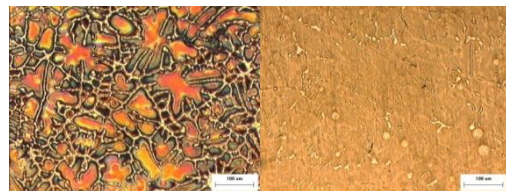
รูปที่ 3 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานต่างๆ

อลูมิเนียมผสมทองแดงที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีการเพิ่มความแข็งด้วยวิธีการตกตะกอนจะมีค่าความแข็งสูงกว่าอลูมิเนียมผสมที่ไม่ได้ผ่านกรรมวิธีการเพิ่มความแข็งด้วยวิธีการตกตะกอน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับทฤษฎีการเพิ่มความแข็งด้วยวิธีการตกตะกอน ที่กล่าวว่า กระบวนการเพิ่มความแข็งด้วยวิธีการตกตะกอนจะเพิ่มความแข็งได้ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงเฟสที่เกิดขึ้นในสถานะของแข็ง โดยมีการเกิดเฟสของแข็งที่เป็นอนุภาคขนาดเล็กจากการตกตะกอน และมีแรงยึดเหนี่ยวกับแมทริกซ์ (J.W. Martin, 1968)

### 2. ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มแข็งต่อโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสมทองแดง

หลังจากอบชุบไว้ที่อุณหภูมิ 2 อุณหภูมิ คือ ที่ช่วงอุณหภูมิ 170°C กับ 190°C และระยะเวลาการบ่มแข็งหลังจากอบชุบไว้ 4 รูปแบบ คือ ที่ช่วงระยะเวลา 8, 10, 12 และ 16 ชั่วโมง จึงนำชิ้นงานมาทำการขัดเปิดผิวหน้าและย้อมสีเพื่อดูโครงสร้างจุลภาค จากการดูโครงสร้างทางจุลภาคสามารถสรุปเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกระบวนการบ่มแข็ง ได้ดังนี้

รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าในรูป (ก) มีการแบ่งแยกแต่ละเฟสออกจากกันอย่างชัดเจน แต่เมื่อการอบละลาย (Homogenous) ทำให้แต่ละเฟสที่กระจายตัวแยกกันอยู่แทบเป็นเนื้อเดียวกัน



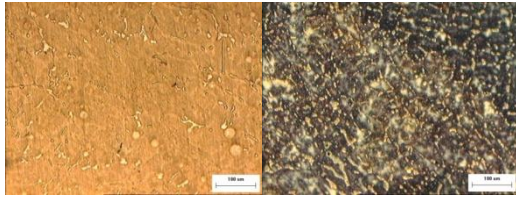
(ก)

(ข)

รูปที่ 4 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสมทองแดงที่ผ่านและไม่ผ่านการเพิ่มความแข็งด้วยการตกตะกอน

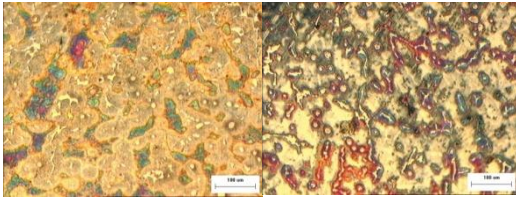
(ก) ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มความแข็งด้วยการตกตะกอน

(ข) ผ่านกระบวนการเพิ่มความแข็งด้วยการตกตะกอน



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

รูปที่ 5 การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสมทองแดงที่มีระยะเวลาการบ่มแข็งแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 190°C (ก) 8 ชั่วโมง (ข) 10 ชั่วโมง (ค) 12 ชั่วโมง (ง) 16 ชั่วโมง

จากรูปโครงสร้างในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปเกิดการแยกตัวของเฟส  $\theta''$  ขึ้นในเมทริกซ์ โดย (ก) เป็นช่วงที่เฟส  $\theta''$  เริ่มตกตะกอน และในรูป (ข) เกิดการกระจายตัวของอนุภาค  $\theta''$  ที่ตกตะกอนกระจายไปทั่วเนื้อชิ้นงาน แต่ในรูป (ค) และ (ง) เมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเกิดการรวมตัวเกิดเป็นเฟสที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมีขนาดใหญ่ความแข็งแรงก็จะเริ่มลดลงเรื่อยๆ แต่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มแข็งว่า ณ เวลาใดที่เฟสของ  $\theta''$  จะเกิดการรวมตัวกันแล้วทำให้ความแข็งแรงลดลง

## สรุป

1. ในทุกๆ ช่วงเวลาที่เท่ากัน ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 190°C มีความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170°C รวมทั้งชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นสารละลายของแข็งและชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน

2. จากการวัดค่าความแข็งแรงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิ 540°C พบว่าค่าความแข็งแรงที่วัดได้มีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน เพราะชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นสารละลายของแข็งนั้นมีการกระจายตัวของทองแดงอย่างทั่วถึง เกิดเป็นสารละลายของแข็งแบบแทรกตัว (Interstitial Solid Solution) จึงทำให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันทำได้ยากขึ้น ค่าความแข็งแรงจึงสูงขึ้น

3. ที่เวลาในการบ่มแข็งประมาณ 12 ชั่วโมง ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบ่มแข็งมีแนวโน้มที่จะต่ำลง แต่หลังจาก 12 ชั่วโมง ค่าความแข็งแรงจะมีแนวโน้มที่จะสูงเพิ่มขึ้น

4. การเติมทองแดงลงในชิ้นงานหล่อเศษกระป๋อง อลูมิเนียมผสมทำให้ชิ้นงานที่ได้มีค่าความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานหล่อของเศษกระป๋องอลูมิเนียมผสมเพียงอย่างเดียว

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำงานวิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.วิศิษฐ์ ไล่เจริญรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการปริญญาโทที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ แนวทางการปฏิบัติงาน และคำปรึกษาในเรื่องต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย เป็นผลให้งานวิจัยดำเนินไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ปฏิภาณ ขุ้ยเจิมหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่ได้กรุณาอบรมสั่งสอนให้ความรู้ในรายวิชาที่แต่ละท่านเป็นผู้สอน ทำให้สามารถนำเอาองค์ความรู้ที่ได้ศึกษามารวบรวมและประยุกต์ใช้ในงานวิจัยที่ศึกษาอยู่ได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1]Annual Book of ASTM Standards. Aluminum and Magnesium Alloys Volume 02.02. Easton, MD, U.S.A.. American Society for Testing and Materials. 1999.
- [2]Beraha E. and Shpigler B.. Color Metallography. First Edition. The United State of America. American Society for Metals. 1977. 30-87.p
- [3]Dell K. Allen and Kay S. Mortensen. Metallurgy and Materials Science Laboratory Manual. The United State of America. American Technical Society. 1973.
- [4]Frank T. Sisco. Modern Metallurgy for Engineer. Second edition. Pitman Metallurgy Series. The United States of America. Pitman Publishing Corporation. 1948. 324-362.p
- [5]Martin J.W., Precipitation Hardening. First edition, A. Wheaton & Co., Exeter. Pergamon Press Ltd. 1968.
- [6]Silcock J.M., Heal T.J. and Hardy H.K. 1953. Structural Ageing Characteristic of Binary Aluminium-Copper Alloys. X-Ray Metallography of Ageing. Precipitation Hardening. 134-147.p