

# อิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงและระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับแคโทดต่อความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ที่ผ่านการทำบอไรดิ้งแบบแพค

## Effects of direct current field and distance between anode and cathode on thickness layer of pack borided hot work tool steel AISI H13

นายทรงกลด ปลอดกระโทก

นางสาวปรีชาต ศรีสุวรรณ

นางสาวศศิวิมล เทศพิทักษ์

อ.ดร.ปฎิภาณ จุ้ยเจิม

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โทร. 0-2942-8555 ต่อ 2102-4 โทรสาร 0-2955-1811 E-mail: fengppj@ku.ac.th

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ทำการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 ด้วยวิธีการบอไรดิ้งแบบแพค โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง ใช้อุณหภูมิ 850-950 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 2-6 ชั่วโมงและระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดแคโทด 1.5 3 และ 4.5 เซนติเมตร ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพร้อมด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ และทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส จากการทดสอบพบว่าชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์เกิดเฟสคู่ (FeB, Fe<sub>2</sub>B) มีความแข็งประมาณ 1550 HV อย่างไรก็ตามพบว่ากระบวนการบอไรดิ้งโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงและการลดระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดแคโทดเข้ามาช่วยสามารถลดระยะเวลา และเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่มีความหนามากขึ้น

**คำสำคัญ:** บอไรดิ้งแบบแพค, เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13, ไฟฟ้ากระแสตรง

### Abstract

In this research, surface of hot work tool steel AISI H13 was coated by pack boriding with direct current at temperature range of 850-950°C for 2-6 hour and distance between anode and cathode was 1.5 3 and 4.5 cm. The thickness of boride layer was examined using an optical microscope and image analysis program. The hardness values of boride layer were measured by Micro vickers hardness Tester. they were about 1550 HV. The

boride layer was found that double phases (FeB and Fe<sub>2</sub>B).

However, effects of direct current field and decreasing distance between anode and cathode could reduce time of boriding and add thickness of boride layer.

**Keywords:** Pack boriding, Hot work tool steel AISI H13, Direct current

### บทนำ

ปัจจุบันมีการนำเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน (Hot work tool steel) AISI H13 มาผลิตเป็นเครื่องจักรที่ใช้งานในกระบวนการทางอุตสาหกรรมกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งปัญหาที่พบโดยส่วนใหญ่คือ มักมีการใช้งานที่อุณหภูมิสูง และมีอัตราการผลิตอย่างต่อเนื่องส่งผลให้อายุการใช้งานของเครื่องจักรหรือแม่พิมพ์มีอายุการใช้งานสั้นลง ซึ่งปัญหาดังกล่าวก่อให้เกิดความเสียหายแก่เครื่องจักรหรือแม่พิมพ์ ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงตามมาภายหลัง ดังนั้นจึงมีวิธีการช่วยลดปัญหาดังกล่าว โดยการปรับปรุงสภาพผิวให้มีความแข็งและทนต่อการสึกหรอ ทำให้อายุการใช้งานยาวนานขึ้น กระบวนการบอไรดิ้ง (Boriding) หรือ บอโรไนซิง (Boronizing) เป็นอีกวิธีที่ช่วยปรับปรุงสภาพผิวและช่วยเพิ่มความแข็งให้เหมาะสมกับสภาวะการใช้งาน ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานมากยิ่งขึ้น

กระบวนการบอไรดิ้ง หรือ บอโรไนซิงเป็นกระบวนการหนึ่งที่จะช่วยในการเพิ่มความแข็งให้กับเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 โดยการเคลือบบริเวณที่ผิวของชิ้นงาน (Surface

coating) ซึ่งอาศัยการแพร่ของอะตอมโบรอนเข้าไปในผิวชิ้นงาน ทำให้เกิดการรวมตัวของอะตอมโบรอนและอะตอมของเหล็กเกิดเป็นเฟสเหล็กบอไรด์ (FeB, Fe<sub>2</sub>B) บริเวณผิว โดยปัจจัยที่มีผลต่อความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ ได้แก่ ความเข้มข้นของอะตอมโบรอน เวลาและอุณหภูมิ ในทางอุตสาหกรรมการลดปัจจัยในการผลิตลงถือเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการผลิตลงเช่นกัน ดังนั้น เพื่อต้องการลดปัจจัยในการผลิตลง แนวทางที่น่าสนใจ คือ แรงอัตราการแพร่ของอะตอมโบรอนสู่ผิวชิ้นงานโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current, DC) ซึ่งเป็นอีกวิธีการที่สามารถลดระยะเวลาในการแพร่ การนำไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยในการเร่งอัตราการแพร่ของอะตอมโบรอนนั้น ระยะห่างระหว่างขั้วของอิเล็กโทรด (Electrode) เป็นอีกปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการแพร่ของอะตอมโบรอนเช่นกัน ดังนั้น โครงการงานนี้จึงศึกษาการนำไฟฟ้ากระแสตรงและระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับแคโทดเข้ามาช่วยในการเร่งอัตราการแพร่ของอะตอมโบรอนในกระบวนการบอไรดิ้งแบบแพค เพื่อให้ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์มีความหนาและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่กระบวนการมากขึ้น

## วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ เวลาและระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับแคโทด ที่ส่งผลต่อความหนาของชั้นเคลือบและสมบัติทางกลของเหล็กบอไรด์
2. ศึกษาอิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในกระบวนการทำบอไรดิ้งแบบแพค (Pack boriding) ที่ส่งผลต่อความหนาของชั้นเคลือบและสมบัติทางกลของเหล็กบอไรด์

## วิธีการดำเนินโครงการ

### 1. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

1.1. นำเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 มาตัดให้ได้ขนาด 1.4 mm. X 2.5 mm. X 0.8 mm. นำไปเจาะรูสำหรับร้อยลวดสแตนเลสเพื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ชิ้นงานในการทำบอไรดิ้งแบบแพค

1.2. ขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 120 240 320 400 และ 600 เพื่อกำจัดสนิมหรือสิ่งสกปรกออกและล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด

### 2. ขั้นตอนการเคลือบผิว

2.1. ทำความสะอาดกล่องบรรจุชิ้นงานและผิวหน้าชิ้นงานหลังจากที่ผ่านการขัดกระดาษทรายมาแล้วให้สะอาด

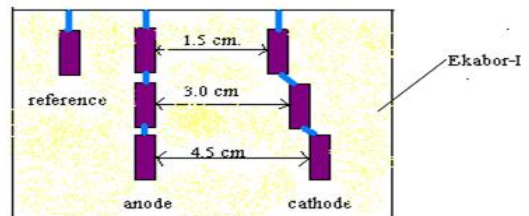
2.2. ผูกชิ้นงานเข้ากับลวดแล้ววางในกล่องใส่ชิ้นงานตามระยะห่างที่กำหนด ดังรูปที่ 1

2.3. เติมน้ำ Ekabor-I ลงในกล่อง ใส่ชิ้นงานแล้วอัดให้แน่นพร้อมกับติดตั้งตัววัดอุณหภูมิเข้ากับตัวชิ้นงาน ต่ออุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง โดยกำหนดให้ชิ้นงานที่ต้องการให้เกิดความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ต่อกับขั้วแคโทด พร้อมทั้งติดตั้งเครื่องวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิ

2.4. ปิดฝากล่องบรรจุชิ้นงาน และปิดรอยต่อของกล่องที่เกิดช่องว่างด้วยซีเมนต์ให้สนิท รอซีเมนต์แข็งตัวแล้วนำเข้าเตาไฟฟ้า

2.5. เปิดเตาให้อุณหภูมิความร้อน กระแสไฟฟ้า และเวลาการเคลือบผิวตามเงื่อนไขการทดลองแต่ละครั้ง เมื่อครบกำหนดเวลาตามเงื่อนไขแล้วนำกล่องบรรจุชิ้นงานออกมาเย็นตัวในอากาศ

2.6. นำชิ้นงานที่ได้มาตรวจสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 1 แสดงการจัดเรียงชิ้นงานเพื่อทำการบอไรดิ้ง

### 3. ขั้นตอนการวิเคราะห์ชั้นเคลือบ

3.1. ตัดชิ้นงานตามขวาง (Cross section) ด้วยเครื่องตัดความเร็วสูง หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาอัดด้วยวิธีเมทแบบเย็นนำไปขัดหยาบด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 1200 ขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินา และกัดผิวชิ้นงานด้วยกรดไนตริกแล้วเป่าให้แห้ง

3.2. ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและวัดความหนาของชั้นเคลือบบอไรด์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

3.3. วัดความแข็งของชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส โดยใช้แรงในการกด 100 กรัม และกดทิ้งไว้เป็นเวลานาน 10 วินาที

3.4. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

## วิจารณ์ผลการทดลอง

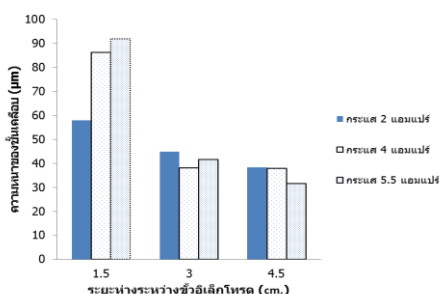
### 1. ลักษณะของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์

อะตอมโบรอนแตกตัวจากผงอะเจนต์และแพร่เข้าสู่ชิ้นงานจับกับอะตอมของเหล็กเป็นเฟส Fe<sub>2</sub>B ที่ชิ้นงานจึงมีความเข้มข้น

ของอะตอม โบรอนเพิ่มขึ้น และเมื่อความเข้มข้นของอะตอม โบรอนบริเวณรอยต่อระหว่าง  $Fe_2B$  กับผงอะเจนต์มีค่าสูงเกิน 16.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแล้วจึงเกิดเฟส  $FeB$  ขึ้นที่ผิวนอกสุดของชิ้นงาน โดยหลังจากนี้ก็ยังคงเกิดการแพร่ของอะตอม โบรอนจากบริเวณรอบชิ้นงานที่มีความเข้มข้นสูงไปยังชิ้นงานที่มีความเข้มข้นต่ำอยู่ จึงทำให้ชั้นของเฟส  $FeB$  ( $Fe_2B$ ) แต่ละชั้นมีการเติบโต และจะเกิดลักษณะเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนความเข้มข้นของอะตอม โบรอนบริเวณรอบชิ้นงานลดต่ำลงมากจนไม่สามารถเกิดการแพร่ของอะตอม โบรอนจากบริเวณรอบชิ้นงานเข้าสู่ชิ้นงานได้อีก จากนั้นอะตอม โบรอนในชิ้นงานจะเกิดการแพร่จากเฟส  $FeB$  ที่มีความเข้มข้นสูงไปยังเฟส  $Fe_2B$  ที่มีความเข้มข้นต่ำ และอะตอม โบรอนที่เฟส  $Fe_2B$  สามารถแพร่เข้าไปในเนื้อพื้นชิ้นงานได้ ซึ่งเป็นผลให้ชั้นเฟส  $FeB$  มีความหนาลดลง แต่ความหนารวมของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และถ้ากระบวนการยังดำเนินต่อไปเฟสของ  $FeB$  ก็จะหมดไปเหลือเพียงเฟส  $Fe_2B$  ซึ่งเป็นเฟสเดียว

## 2.อิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรงและระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่อความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์

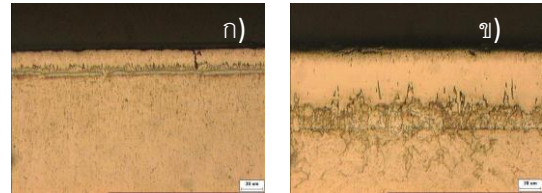
ที่ระยะ 1.5 เซนติเมตร มีความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์มากกว่าที่ระยะ 3 และ 4.5 เซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากว่าการใส่ไฟฟ้ากระแสตรงทำให้มีผลต่อการเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์คือ ไฟฟ้ากระแสตรงช่วยให้อะตอม โบรอนแพร่ไปยังชิ้นงานได้มากขึ้น เนื่องจากเมื่อเราให้กระแสไฟฟ้าครบวงจร ทิศทางของกระแสไฟฟ้าจะไหลออกจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นภายใต้ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง ส่งผลให้อะตอมของโบรอนภายใต้สนามไฟฟ้าถูกควบคุมให้แพร่ไปในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า ทำให้มีอะตอม โบรอนเป็นจำนวนมากบริเวณขั้วแคโทด



รูปที่ 2 ความหนาของชั้นเคลือบกับระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ระยะต่างๆ ของ 2 4 และ 5.5 แอมแปร์

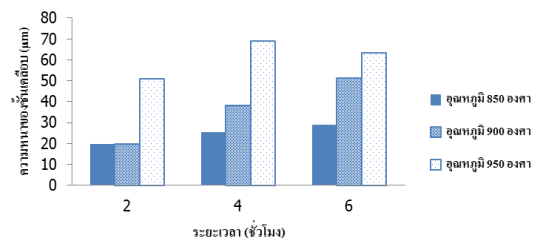
## 3. อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาต่อความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์

ชิ้นงานซึ่งเป็นขั้วอิเล็กโทรด (ชิ้นงานแคโทด) ความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์มีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 3 ความแตกต่างชั้นความหนาที่อุณหภูมิ เวลา และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่างกัน ก) 850 °C/ 2 ชั่วโมง/ระยะห่าง 4.5 เซนติเมตร ข) 950 °C/6 ชั่วโมง/ 1.5 เซนติเมตร

ดังนั้นหากในกระบวนการใช้อุณหภูมิที่สูงก็จะสามารถเกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ขึ้นได้เร็วกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ ทำให้ได้ความหนาชั้นเคลือบที่มากกว่าเมื่อใช้เวลาเท่ากัน และจากทฤษฎีของการแพร่ กล่าวไว้ว่าที่อุณหภูมิสูงอะตอมสามารถแพร่ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำเพราะมีพลังงานในการเคลื่อนที่มากขึ้นทำให้สามารถแพร่ได้เร็วขึ้น



รูปที่ 4 ความหนาของชั้นเคลือบกับระยะเวลาในการทำกระบวนการที่อุณหภูมิ 850-950 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่ขั้วแคโทด ระยะห่าง 1.5 ซม.

## 4.อิทธิพลของธาตุประกอบในเนื้อพื้นวัสดุที่มีผลต่อลักษณะของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์

รูปร่างและลักษณะของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบอไรดิงในโลหะกลุ่มเหล็กแตกต่างกันขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของวัสดุนั้นๆ และสามารถปรับปรุงสมบัติของเนื้อพื้นให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน ซึ่งธาตุผสมแต่ละชนิดมีผลต่อโครงสร้างและสมบัติของชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์แตกต่างกัน

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทำบอโรดิงแบบแพค โดยใช้ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง และมี ระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับแคโทด 1.5 เซนติเมตร ของ เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน AISI H13 มีค่าความหนาของชั้น เคลือบเหล็กบอโรดิง 75.91 ไมโครเมตร ซึ่งมีธาตุประกอบใน ปริมาณที่น้อยกว่าเหล็กกล้าเครื่องมือทำงาน AISI D2 ที่มีความ หนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิง 51.79 ไมโครเมตร จากการ ทดลองที่เงื่อนไขไปเดียวกัน กล่าวได้ว่าปริมาณและชนิดของธาตุ ประกอบที่มีอยู่ในเนื้อของชิ้นงาน ส่งผลให้ความหนาและ ลักษณะของชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิงมีความแตกต่างกัน

## สรุป

- 1.เคลือบเหล็กบอโรดิงที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานเหล็กกล้า เครื่องมืองานร้อน AISI H13 มีลักษณะเป็นเฟสคู่ (FeB และ Fe<sub>2</sub>B)
2. ปริมาณ ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในกระบวนการบอโรดิงแบบ แพคและทำให้เกิดความหนาชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิงมากที่สุด คือ 5.5 แอมแปร์
3. จากการทำบอโรดิงแบบแพคที่เกิดความหนาของชั้นเคลือบ เหล็กบอโรดิงมากที่สุด คือที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 6 ชั่วโมง และระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับแคโทด 1.5 เซนติเมตร โดยความหนาของชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิงที่วัดได้คือ 84.67 ไมโครเมตร
4. ความแข็งของชั้นเคลือบเหล็กบอโรดิงที่มีค่าความแข็งมาก ที่สุด คือ 1548 HV จากการทดลองที่ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับแคโทด 1.5 เซนติเมตร และค่าความแข็งลดลงเมื่อระยะห่างลึกลงไปจากผิว มากขึ้น

## กิตติกรรมประกาศ

สำหรับรายงานเล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับการ สนับสนุนและความอนุเคราะห์จากหลายฝ่ายด้วยกัน ทั้งนี้คณะ ผู้จัดทำจึงต้องขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ขอขอบพระคุณท่าน อ.ดร.ปฎิภาณ อึ้งเจิม อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ สำหรับ คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำโครงการวิจัยตลอดจนการตรวจ แก้ไขโครงการวิจัยเล่มนี้จนเสร็จสิ้นสมบูรณ์ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ ที่ช่วยให้คำแนะนำและ

ความร่วมมือในการทำโครงการวิจัยครั้งนี้ รวมถึงขอขอบคุณ คุณ ธีรภา สุพรรณโรจน์ และคุณศัพพชัย บุญปลูก นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ ที่ให้คำปรึกษา ดูแลและตรวจสอบเกี่ยวกับการ จัดทำเล่มเสนอโครงการวิจัยจนเสร็จสิ้นสมบูรณ์

คณะผู้จัดทำจึงต้องขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการ ทำโครงการวิจัยครั้งนี้ที่ผ่านไปด้วยดี ขอขอบคุณทุกคำปรึกษา และข้อมูลที่มีส่วนทำให้โครงการเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ ตลอดจน ประสพการณ์ที่ไม่ได้หาได้จากห้องเรียน โดยตรง จึงต้อง ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

## เอกสารอ้างอิง

1. พัชรินทร์ แนมจันทร์.การปรับปรุงกระบวนการบอโรดิงของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 440C ด้วยไฟฟ้ากระแสตรง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท.ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ,คณะ วิศวกรรมศาสตร์,มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,2554
2. Davis, J.R. 2002. Surface Hardening of Steels Understanding the Basics. ASM International,USA.
3. Fei XIE Qihua ZHU JINJUN LU (2006). "Influence of Direct Current Field on Powder-pack Boriding"Solid state Phenomena 118(2006): 167-172.
4. Genel, K. (2006). "Boriding kinetics of H13 steel." Vacuum 80(5): 451-457.
5. Kartal, G., O. L. Eryilmaz, et al. (2011). "Kinetics of electrochemical boriding of low carbon steel." Applied Surface Science 257(15): 6928-6934.
6. Keddani, M. and S. M. Chentouf (2005). "A diffusion model for describing the bilayer growth (FeB/Fe<sub>2</sub>B) during the iron powder-pack boriding." Applied Surface Science 252(2): 393-399.
7. Taktak, S. (2007). "Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels." Materials & Design 28(6): 1836-1843.

