

## ผลกระทบของค่าความเหนียวที่ต้านทานการแตกหัก ของเซฟไฟร์ต่อสมบัติ EDM

อภิวัฒน์ มุตตามระ<sup>1</sup>

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12121

Yasushi Fukuzawa<sup>2</sup>

Nagaoka University of Technology, Japan

Naotake Mohri<sup>3</sup>

Tokyo University, Japan

and Takayuki Tani<sup>4</sup>

Tsukuba College Technology, Japan

รับเมื่อ 25 เมษายน 2548 ตอรับเมื่อ 7 กันยายน 2548

### บทคัดย่อ

เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machine) หรือ เครื่อง EDM ได้นำมาใช้ประโยชน์อย่างมากในการเจาะวัสดุที่นำไฟฟ้า เมื่อไม่นานมานี้เครื่อง EDM ได้นำมาใช้เจาะวัสดุเซรามิกส์ที่ไม่นำไฟฟ้า โดยใช้วิธีการช่วยอิเล็กโทรดสปาร์ค (Assisting Electrode Method, AEM) ถึงกระนั้น การใช้เครื่องนี้เจาะวัสดุเซรามิกส์บางชนิดก็ยังทำได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ชิ้นงานที่ทำด้วยอลูมินาความบริสุทธิ์สูง (99.99%) เพราะว่าชั้นตัวนำที่สร้างระหว่างกระบวนการ EDM หลุดจากผิวสปาร์คได้อย่างง่าย มากไปกว่านั้น ผลึกเดี่ยวอลูมินาหรือเซฟไฟร์นั้นมีองค์ประกอบส่วนอื่นเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพในการสปาร์ค การทดลองเพื่อตรวจสอบสมบัติในการสปาร์คเปรียบเทียบกับระนาบผลึกได้กระทำบนระนาบ C (0001), A(11 $\bar{2}$ 0) และ R(1 $\bar{1}$ 02) ค่าความเหนียวที่ต้านทานการแตกหักของแต่ละระนาบมีผลต่อการสร้างชั้นตัวนำไฟฟ้า (Electrical conductive layer) และรอยแตกร้าวรอบๆ รูเจาะซึ่งสอดคล้องกับสมบัติของ EDM

<sup>1</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

<sup>2</sup> ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

<sup>3</sup> ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต

<sup>4</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

## Effect of Fracture Toughness of Sapphires on EDM Properties

**Apiwat Muttamara**<sup>1</sup>

Thammasat University (Rangsit Campus), Khlong Luang, Pathum Thani 12121

**Yasushi Fukuzawa**<sup>2</sup>

Nagaoka University of Technology, Japan

**Naotake Mohri**<sup>3</sup>

Tokyo University, Japan

**and Takayuki Tani**<sup>4</sup>

Tsukuba College Technology, Japan

*Received 25 April 2005 ; accepted 7 September 2005*

### Abstract

Electrical Discharge Machine (EDM) is utilized for drilling electrical conductive materials. Recently, insulating ceramics materials can be machined successfully with the assisting electrode method (AEM). Some ceramics recognized as hard materials, especially the high purity alumina (99.99%) are difficult to machine with this method because the conductive layer easily peels off during the process. Moreover, fracture toughness of the alumina single crystal or sapphire affect machining properties. Investigation of machining properties comparing with crystallographic planes, C (0001), A(11 $\bar{2}$ 0) and R(1 $\bar{1}$ 02) were carried out. The fracture toughness of each plane was found to affect the conductive layer fabrication and cracks around the EDM holes corresponding to the EDM properties.

---

<sup>1</sup> Lecturer, Department of Industrial Engineering.

<sup>2</sup> Professor, Department of Mechanical Engineering.

<sup>3</sup> Professor, Department of Precision Machinery Engineering Manufacturing System.

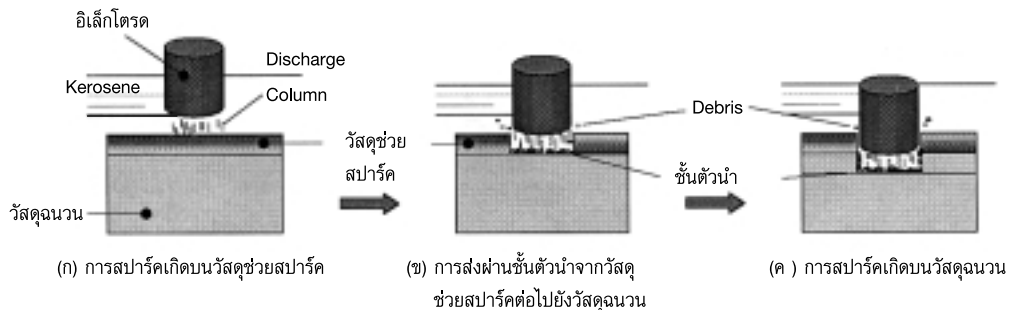
<sup>4</sup> Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering.

## 1. บทนำ

ปัจจุบัน แชนโฟไฟร์เป็นวัสดุที่มีประโยชน์อย่างมากในอุตสาหกรรม เนื่องจากสมบัติทางกลและทางกายภาพ สมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับระนาบของผลึก (crystallographic plane) เช่น ความเหนียวที่ต้านทานการแตกหัก (fracture toughness), การขยายตัวทางความร้อน (thermal expansion), ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) เป็นต้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวการประยุกต์ใช้จึงเลือกใช้ตามความเหมาะสมของแต่ละระนาบ โดยทั่วไป ระนาบที่ใช้มากในแชนโฟไฟร์ ได้แก่ ระนาบ C(0001), A(11 $\bar{2}$ 0) และ R(11 $\bar{2}$ 0) อย่างที่ทราบกันดีว่าวัสดุเซรามิก ชนิดนี้ยากที่จะถูกเจาะด้วยเครื่องจักรทั่วไป เมื่อไม่นานมานี้คณะผู้วิจัยได้เสนอวิธีการสปาร์คชนิดใหม่ด้วยเครื่อง EDM สำหรับวัสดุที่เป็นฉนวน วิธีนี้สามารถกระทำได้โดยการใช้วัสดุช่วยอิเล็กโทรดสปาร์ค (assisting electrode) [1-2] และในปัจจุบันนี้วิธีการดังกล่าวได้พัฒนาและสามารถนำไปใช้ได้กับวัสดุอลูมินา [3] ในการศึกษาครั้งนี้ความเหนียวที่ต้านทานการแตกหักซึ่งมีค่าแตกต่างกันตามแต่ละระนาบ (crystal orientation) ถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกับ ประสิทธิภาพทางการสปาร์คด้วย

## 2. ความเป็นมาของการเจาะวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าด้วยเครื่อง EDM

การเจาะวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าด้วยเครื่อง EDM ครั้งแรกนั้นได้กระทำบนซิลิคอนไนไตรด์ (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) ซึ่งมีความต้านทานจำเพาะ: >10<sup>16</sup> Ω·cm หลักการนั้นอาศัยเทคนิคการช่วยอิเล็กโทรดสปาร์ค ตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 หลักการ EDM บนวัสดุฉนวนโดยใช้หลักการวัสดุช่วยอิเล็กโทรดสปาร์ค

การช่วยอิเล็กโทรดสปาร์ค ในยุคแรกๆ นั้นใช้แผ่นโลหะหรือแผ่นตาข่ายทองแดงกดแนบกับวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า เมื่อเริ่มสปาร์คอิเล็กโทรดจะสปาร์คบนวัสดุช่วยอิเล็กโทรดสปาร์คก่อน จากนั้นจะผ่านมายังวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าโดยมีชั้นตัวนำ (conductive layer) ซึ่งถูกสร้างระหว่างกระบวนการสปาร์ค ชั้นตัวนำนี้ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยสารคาร์บอน ซึ่งมาจากส่วนผสมของน้ำมัน EDM การ EDM วัสดุที่ไม่นำไฟฟ้านี้สามารถกระทำได้ตรงๆ โดยที่ชั้นตัวนำนี้สามารถถูกสร้างขึ้นระหว่างกระบวนการ EDM ต่อมากลุ่มผู้เขียนได้เสนอว่าวัสดุที่ใช้ช่วยอิเล็กโทรดสปาร์คที่ดีที่สุดสำหรับซิลิคอนไนไตรด์ คือ PVD-TiN [1] แต่ถึงกระนั้นกระบวนการเคลือบ PVD-TiN นั้น ต้องใช้เวลาและต้นทุนค่อนข้างสูง รายงานวิจัยล่าสุดได้เสนอว่าวัสดุที่ใช้ช่วยอิเล็กโทรดสปาร์คสามารถกระทำได้โดยใช้คอลลอยด์คาร์บอน (Colloidal carbon) ทาบนวัสดุแล้วนำไปอบ วิธีนี้ถูกเรียกว่า ชั้นคาร์บอนอบ (Carbon baked layer) [3] วิธีการคือการนำคอลลอยด์คาร์บอน ทาบนชิ้นงานแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ประมาณ 7 นาที โดยค่าความหนา

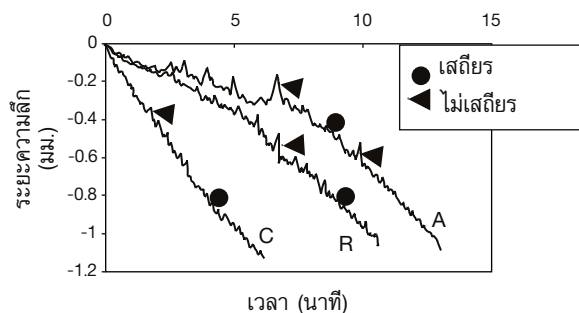
ของชั้นวัสดุช่วยอิเล็กทรอนิกส์ต้องมีค่ามากกว่า 0.5 มม. วิธีนี้ผู้ปฏิบัติการทดลองสามารถปฏิบัติได้เองโดยง่าย ความแตกต่างของวัสดุในวัสดุช่วยอิเล็กทรอนิกส์ และความหนาของชั้นวัสดุช่วยอิเล็กทรอนิกส์นั้นไม่มีผลกระทบต่อสมบัติของการ EDM มากไปกว่านั้น ข้อได้เปรียบอย่างสำคัญคือเมื่อใช้ชั้นคาร์บอนอบเป็นวัสดุช่วยอิเล็กทรอนิกส์ การ EDM จะสามารถกระทำได้สำเร็จบนวัสดุอลูมินา ( $Al_2O_3$ ) [3]

### 3. วิธีการทดลอง

การทดลองได้กระทำขึ้นโดยใช้เครื่อง EDM ทั่วไป โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์ทองแดงซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร ช่างงานแซฟไฟร์ที่นำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้คือ ระบาย C(0001), A(11 $\bar{2}$ 0) และ R(1 $\bar{1}$ 02) เพื่อศึกษาผลกระทบของ orientation เพื่อความมั่นใจในการควบคุมสมบัติของวัสดุเริ่มต้น ช่างงานแซฟไฟร์แต่ละระบายจัดซื้อมาจาก Dalian Danning Industries Development Co. Ltd. การทดลองครั้งนี้ใช้ชั้นคาร์บอนอบเป็นวัสดุช่วยอิเล็กทรอนิกส์ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการ EDM วัสดุอลูมินานั้น มีเพียงไม่กี่ชุดเพื่อเจาะรูได้สำเร็จ ค่ากระแส นั้นต้องมีค่าไม่เกิน 2 แอมแปร์ ส่วนเวลาเปิด ใช้ค่าน้อยที่สุดจะได้ประสิทธิภาพมากที่สุด ค่ากระแสที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้ได้เลือกค่าที่ให้ประสิทธิภาพในการเจาะมากที่สุด ซึ่งได้แก่ กระแส = 1.5 แอมแปร์, เวลาเปิด = 2 ms, เวลาปิด = 4 ms, ความต่างศักย์วงจรเปิด = 320 โวลต์, และอิเล็กทรอนิกส์ด้วยความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที การทดลองแต่ละครั้งได้ทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง เพื่อแสดงว่าผลการทดลองที่ได้น่าเชื่อถือ

### 4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในระหว่างการทดลอง EDM บนแต่ละระบาย การเคลื่อนที่ของอิเล็กทรอนิกส์ได้ถูกบันทึกที่ระหว่างกระบวนการรูปที่ 2 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กทรอนิกส์เปรียบเทียบกับเวลา สำหรับการ EDM บนวัสดุไม่นำไฟฟ้านั้นประกอบไปด้วยการคายประจุ (สปาร์ค) ปกติ (normal discharge) และการคายประจุไม่ปกติ (abnormal discharge) จากข้อมูลที่เคยได้รับการนำเสนอแล้วนั้น [3] พบว่า การสปาร์คบนวัสดุอลูมินานั้นส่วนใหญ่จะเป็นการคายประจุไม่ปกติ ซึ่งประกอบไปด้วย การลัดวงจร (short) การคายประจุเฉพาะจุด (concentrate discharge) และแบบพัลส์ที่นานเกินไป (long pulse) จากรูปการเคลื่อนที่ของอิเล็กทรอนิกส์ สามารถสังเกตได้ว่า การเคลื่อนที่ที่สามารถถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของอิเล็กทรอนิกส์กับเวลา

กลุ่มแรกคือการเคลื่อนที่อย่างเสถียร ซึ่งหมายถึงการเคลื่อนที่ขึ้นและลงโดยลักษณะการเคลื่อนที่ขึ้นของอิเล็กโทรดอยู่ภายในระยะของการเคลื่อนที่ในระยะยกขึ้นของคำสั่ง JUMP ส่วนกลุ่มที่ 2 คือการเคลื่อนที่แบบไม่เสถียร กลุ่มนี้จะสังเกตได้ว่ามีระยะการเคลื่อนที่ยกขึ้นสูงกว่าระยะยกขึ้นตามปกติในคำสั่ง JUMP ปรากฏการณ์การเคลื่อนที่แบบยกขึ้นแบบไม่ปกตินี้แสดงถึงสภาวะการลัดวงจรและการคายประจุเฉพาะจุด [4] จากรูปนี้พบว่า การลัดวงจรและการคายประจุเฉพาะจุด ถูกพบมากเมื่อ EDM บนระนาบ A, R และ C ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด สามารถบอกได้ว่าอัตราการสปาร์คบนระนาบ C เร็วกว่าบนระนาบ R และ A ตามลำดับ รูปที่ 3 แสดงถึงชั้นตัวนำระหว่างกระบวนการ EDM การสังเกตการณ์นี้ได้ถูกกระทำเมื่อกระบวนการ EDM ได้สปาร์คลึก 0.2 มม. พื้นที่สีดำที่ปกคลุมพื้นที่ EDM แสดงถึงชั้นตัวนำ จากรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) สามารถสังเกตได้ว่าพื้นที่บางส่วนที่ถูกสปาร์คไม่ปกคลุมด้วยชั้นตัวนำ ส่วนรูปที่ 3(ค) นั้นชั้นตัวนำบนระนาบ C จะปกคลุมได้ทั่วถึงมากกว่าบนระนาบ R และ A



รูปที่ 3 ชั้นตัวนำบนชิ้นงานแซฟไฟร์ (ก) A(1120) (ข) R(1102) และ (ค) C(0001)

กระบวนการ EDM สามารถเจาะทะลุสำเร็จบนแซฟไฟร์ที่มีความหนา 1 มม. รูปที่ 4 แสดงรูเจาะซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะทางเข้าของรูในแต่ละระนาบ จากการสังเกตรูเจาะ EDM นั้นพบว่ารอบๆ รูเจาะมีลักษณะเป็นเทเปอร์ (taper) และมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นรอบๆ รูเจาะ รอยแตกร้าวถูกพบมากบนระนาบ A และ R ตามลำดับ ส่วนระนาบ C นั้นแทบไม่มีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นเลย ลักษณะเทเปอร์บริเวณรูเจานั้นสามารถอธิบายได้โดยค่าความร้อนสะสมระหว่างการสปาร์ค ซึ่งมีค่าแปรผันตรงกับเวลาในการสปาร์ค เวลาที่ใช้ในการสปาร์คบนระนาบ A มากกว่า R และ C ตามลำดับ เพราะฉะนั้นความร้อนสะสมบริเวณทางเข้าบนระนาบ A จึงมากกว่า R และ C ซึ่งมีผลสอดคล้องกับลักษณะเทเปอร์ ส่วนรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในแต่ละระนาบนั้นถูกวิเคราะห์ด้วยค่าความเหนียวที่ต้านทานการแตกหัก (fracture toughness) ซึ่งค่าความเค้นวิกฤต (critical stress intensity factor (K1c)) ได้ถูกแสดงตามสมการ (1) และค่าที่คำนวณได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1

$$K_{1c} = 0.016(E/H)^{1/2} (P/C_0^{3/2}) \quad (1)$$

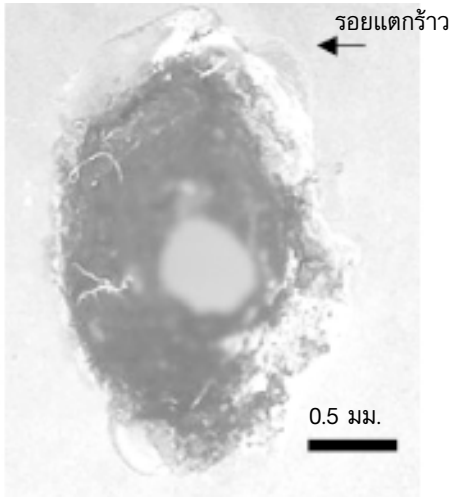
E : Elastic Young Modulus (400GPa)

H : Hardness (Vickers)

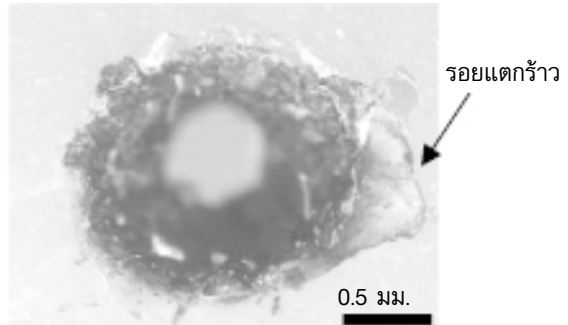
P : Load

C<sub>0</sub> : Crack length (from center)

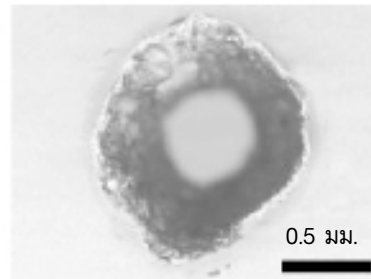
(ก) ระนาบ A



(ข) ระนาบ R



(ค) ระนาบ C



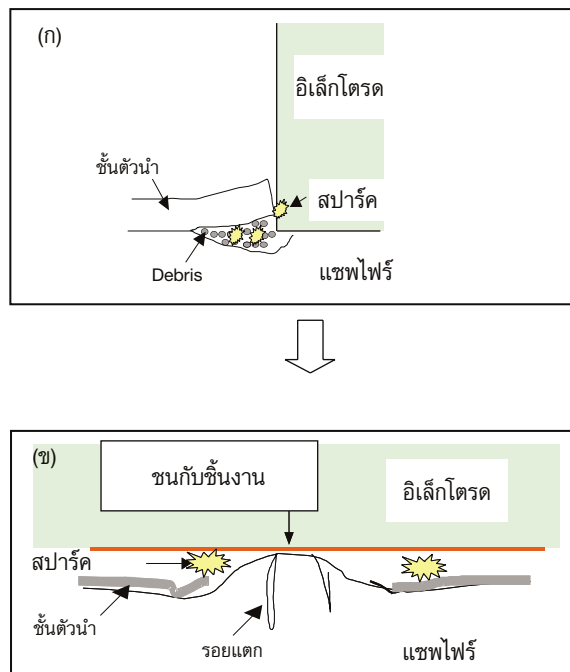
รูปที่ 4 ตัวอย่างรูเจาะ EDM บนเซฟไฟร์ (ก) A(1120) (ข) R(1102) และ (ค) C(0001)

ตารางที่ 1 ค่าความเหนียวที่ต้านทานการแตกหักที่ได้จากการคำนวณ

ระนาบ	ค่าความเหนียวที่ต้านทานการแตกหัก (MPa.m <sup>1/2</sup> )
C	2.94
R	2.16
A	1.82

จากค่าความเหนียวที่ต้านทานการแตกหักที่ได้จากการคำนวณ สามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่าความเหนียวที่ต้านทานการแตกหักนั้นมีความสัมพันธ์กับรอยแตกร้าวบริเวณรูเจาะ EDM บนเซฟไฟร์ ค่าความเหนียวที่ต้านทานการแตกหักบนระนาบ A นั้น น้อยกว่าระนาบอื่นๆ นั้นแสดงถึงระนาบ A เกิดการแตกร้าวได้ง่ายกว่าระนาบ R และ C ตามลำดับ และค่าความเหนียวที่ต้านทานการแตกหักนี้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ของการสร้างชั้นตัวนำระหว่างกระบวนการ EDM ที่แสดงไว้บนรูปที่ 3 ได้ด้วย

รูปที่ 5 แสดงปรากฏการณ์การเกิดรอยแตกร้าวบนเซฟไฟร์ระหว่างกระบวนการ EDM จากรูปที่ 5 (ก) เนื่องจากเซฟไฟร์มีค่าความเหนียวที่ต้านทานการแตกหักค่อนข้างต่ำ เพราะฉะนั้นการเกิดรอยร้าวนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายระหว่างกระบวนการสปาร์ค เนื่องจากการลัดวงจรและการคายประจุเฉพาะจุดเกิดขึ้นบ่อยครั้ง การเกิดรอยแตกร้าวมีส่วนในการช่วยให้ชั้นตัวนำหลุดจากชิ้นงานในระหว่างที่ถูกสปาร์คและมีผลต่ออัตราการสปาร์คเมื่อชั้นตัวนำหลุดจากชิ้นงานทำให้กระบวนการสปาร์คนั้นเกิดไม่สมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) อิเล็กโตรดไม่สามารถสปาร์คบนชิ้นงานได้ ทำให้บางครั้งอิเล็กโตรดได้กดกระแทกไปที่ชิ้นงาน เพราะเหตุนี้เซฟไฟร์ระนาบ A ซึ่งมีค่าความเหนียวที่ต้านทานการแตกหักต่ำที่สุดจึงเกิดรอยแตกร้าวมากที่สุดและมีอัตราการสปาร์คต่ำที่สุดแต่กระนั้นกระบวนการ EDM ยังสามารถดำเนินต่อไปได้ เนื่องจากอิเล็กโตรดสามารถสปาร์คที่ชั้นตัวนำบริเวณรอบๆบริเวณที่ขาดการปกคลุมของชั้นตัวนำและอีกเหตุผลหนึ่งคือ จากการหมุนของอิเล็กโตรดนั้นสามารถนำพาชั้นตัวนำจากบริเวณอื่นมาช่วยในการสปาร์คบริเวณที่ขาดชั้นเหนียวนำได้ด้วย



รูปที่ 5 ปรากฏการณ์ EDM บนเซฟไฟร์

## 5. สรุปผลการทดลอง

1. รอยแตกร้าวรอบๆ รูเจาะบนระนาบ C มีน้อยกว่า ระนาบ R และ A ตามลำดับ
2. ลักษณะรอยแตกร้าวรอบๆ รูเจาะนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยค่าความเหนียวที่ด้านทานการแตกหัก ซึ่งค่าความเหนียวที่ด้านทานการแตกหักจะแปรผกผันกับรอยแตกร้าว
3. ค่าความเหนียวที่ด้านทานการแตกหักมีผลกระทบต่อการสร้างและหลุดของชิ้นตัวนำซึ่งสอดคล้องกับอัตราการสปาร์ค

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. N., Mohri, Y., Fukuzawa, T., Tani, N., Saito, and K., Furutani 1996, "Assisting Electrode Method for Machining Insulating Ceramics", *Annals of the CIRP*, Vol. 1, pp. 201-204.
2. Y., Fukuzawa, N., Mohri, and T., Tani, 1997, "Electrical Discharge Machining Phenomena of Insulating SiAlON Ceramics with an Assisting Electrode", *International Journal of Electrical Machining (IJEM)*, No. 2, pp. 25-30.
3. Y., Fukuzawa, N., Mohri, T., Tani, and A., Muttumara, 2004, Electrical Discharge Machining Properties of Noble Crystals, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 149, No. 1-3, pp. 393-397.
4. A., Goto, T., Yuzawa, T., Magara, and K., Kobayashi, 1998, Study on Deterioration of Machining Performance by EDMed Sludge and its Prevention, *International Journal of Electrical Machining (IJEM)*, No. 3, pp. 1-6.