

具壓切效應之研鑽刀具開發與光學玻璃研鑽技術研究

Development of a grinding-drilling tool with pressure-cutting effect for grinding-drilling optical glass

陳順同¹、江宗翰²、吳宜穎²、楊弘意³、郭巾萍^{3*}

¹ 國立台灣師範大學 機電工程學系教授

² 國立台灣師範大學 機電工程學系專題生

³ 國立台灣師範大學 機電工程學系研究生

*E-mail: hahayeah14751@gmail.com

摘要

本研究旨在開發一種多刃式微型的鑽石刀具，用於光學玻璃鑽削精密微孔。研究提出一種逆向同心微孔放電及逆向微線切割放電加工的技術，用以製作內外徑同心且具負後斜角的多刃式鑽石鑽頭刀具。加工完成的刀具，裝置於具研削力判斷的桌上型微研鑽機上，直接對光學玻璃或石英玻璃進行研鑽加工。由於硬脆材料適合承受壓應力，所以研鑽刀具採多刃式負斜角設計，具壓切效應，並可避免光學玻璃脆性崩裂。為避免過大的研鑽力，造成玻璃脆性破壞，桌上型微研鑽機設計荷重元迴路，以感測研鑽力，以便即時調整鑽削的進給速度。實驗結果顯示，荷重元感測機制提供了即時研鑽力的偵測，確保研鑽時能有最佳的進給率，防止擴孔現象；而負後斜角可在研鑽過程中，提供壓切力，避免裂紋發生；奈米等級的研鑽深度能將脆性材料轉為類延性模式切削，孔緣發生崩裂機率很低。透過刀具切刃的平均磨耗深度與加工次數估計，刀具壽命約為 30 次。研究證實所開發的多刃式鑽石鑽頭具市場競爭力。

關鍵詞：研鑽、多刃式鑽石鑽頭、壓切效應、荷重元迴路

Abstract

This study presents the development of a multi-edge diamond drill for grinding-drilling micro-holes on optical glass. A hybrid technique that combines a reverse micro-EDDrilling with micro-w-EDM for making a hollow diamond drill with multi-edge of negative rake angle is developed in this study. The reverse EDM facilitates debris disposal, reducing the probability of discharge short-circuit events and secondary discharge. The finished diamond-tool is mounted on an intellectualized tabletop drill machine for grinding-drilling directly microhole on an optical glass or quartz glass. Diamond drill with multi-edge of negative rake angle design is proposed for generating compressive stress on the optical glass to prevent brittle fracture from occurring. Application of a load-cell that detects in real-time the grinding-drilling force providing feedback for fine tuning the feed-rate of the tool is proposed. A ductile grinding regime is achieved by ensuring an appropriate nano-scale depth for cutting and modulating the feed-rate. Experimental results show that excellent geometric and dimensional accuracy of micro-holes can be realized. The estimated reasonable tool life is determined at a machining number of 30 times. The proposed grinding-drilling technique is cost effective and can significantly contribute to the precision micromachining industry.

Keywords: Grinding-drilling, multi-edge diamond drill, pressure-cutting effect, load-cell circuit

1. 前言

光學玻璃於現今製品應用，扮演著舉足輕重的角色，尤其是觸控面板，為因應各種產品需求，對光學玻璃切削、鑽孔、磨削等加工，都是無法避免的。由於光學玻璃具高硬度及高脆性，許多加工技術也隨之發展，如超精密加工[1,2]、蝕刻[3]、放電加工[4]及雷射加工[5,6]，

超音波振動輔助加工等[7, 8]，這些方法都有其應用的特點，但有些加工設備昂貴，只適合量產；有些製程涉及化學環保議題。本研究開發一結合高精度研鑽技術及逆向放電加工技術之桌上型微研鑽機，加工出同心空心軸及多刃結構的特殊造型，以利在光學玻璃上成型精密微孔，而荷重元感測機制能及時偵測研鑽時所造成的壓應力，並對進給速率作出及時的回饋調整。研鑽以逐層進行，亦對尺寸精度、幾何精度及刀具壽命作評估。

2. 研究方法

2.1 鑽石刀具同心微孔放電加工

鑽石磨棒中心靜點沒有切削速度，為避免此點對玻璃工件造成擠壓，必須將磨棒軸心去除。如圖1(a)所示的逆向同心微孔放電加工，鑽石磨棒素材定位於銅管上方，銅管電極與鑽石磨棒分別以20及500 rpm同時反方向旋轉。此「逆向同心微孔放電加工」是將刀具軸心與銅管電極中心對齊並加上啄鑽模式的加工，如圖1(b)所示。啄鑽抽吸使放電殘渣能因壓力差及重力而快速由下自動排出，減少放電短路的機會[9]。

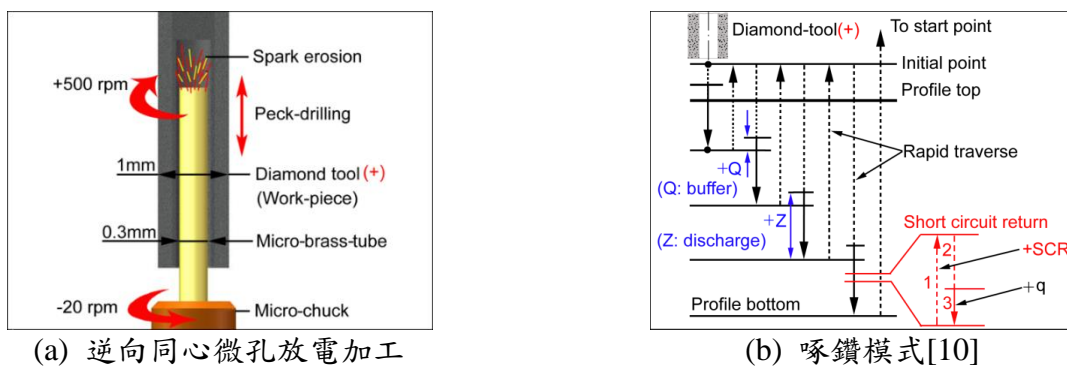


圖 1 鑽石刀具同心微孔放電加工之技術

2.2 適當的放電能量及進給率

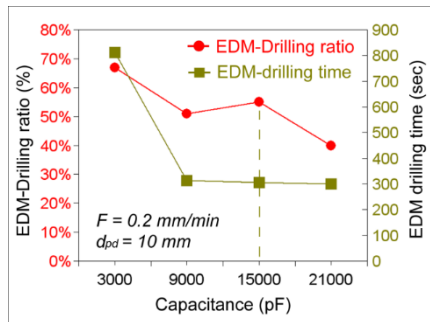
在微鑽孔機中，RC放電迴路提供微放電加工所需的能量，這個能量使放電電流有短脈衝及高峯值電壓[11]，為了找出同心微孔放電加工的最佳放電效率，鑽削率DR如式(1)所示。其中 d_{ad} 和 d_{pd} 分別表示放電鑽孔後的實際深度及預測深度。

$$DR = \frac{d_{ad}}{d_{pd}} \quad (1)$$

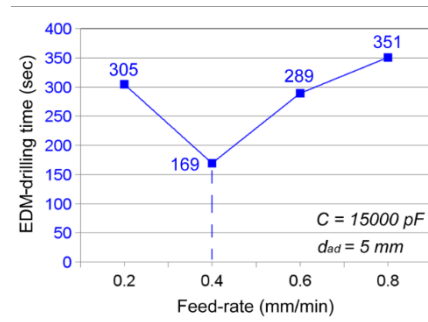
同心微孔放電條件如表1所示，固定進給速度0.2mm/min，放電能量分別以3000, 9000, 15000與21000 pF進行實驗，比較加工時間、加工深度與加工效率。由實驗結果圖2(a)觀察得知，當電容設定3000pF時，雖可獲取最大的實際深度，但因為放電能量過低，使致材料去除率降低，放電短路情況增加，延長加工時間。但當能量提高時，所得的加工時間相當接近，意味當提供過大能量時，消耗量大部分集中於銅管電極。適當的加工能量，可使材料去除率、銅管消耗率與進給速度達平衡，得到大的鑽孔深度與最理想的加工效率，故本研究選用15000 pF放電能量及0.4 mm/min進給速度，如圖2(b)所示，可得最低加工時間(169秒)。

表 1 同心微孔放電加工條件

Parameters	Conditions
Electrode	brass tube (ϕ 0.3 mm)
Work-piece	Diamond-tool(ϕ 1.0mm)
Working voltage	100 (V)
Tool speed	500 (rpm) (CW)
Tube speed	20 (rpm) (CCW)



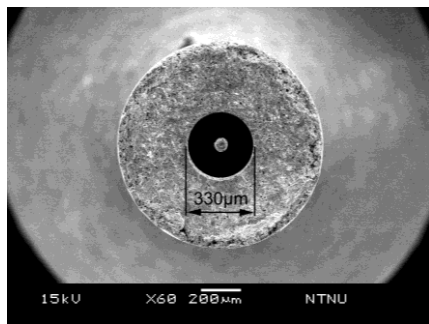
(a) 能量與鑽削效率關係曲線



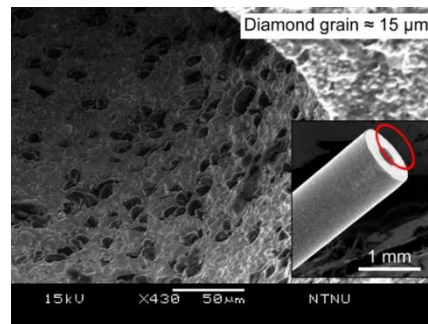
(b) 進給速度與加工時間關係曲線

圖 2 不同放電條件之關係曲線

圖 3(a)顯示其同心微孔直徑為 $330\mu\text{m}$ ，單邊放電間隙僅 $15\mu\text{m}$ 。因銅管電極關係，在鑽頭中心殘留一微桿，證實此加工孔具高真圓度與高同心度。在微孔內壁局部放大，如圖 3(b)所示，鑽石磨料粒均勻分佈在銅基材中，這些間隔 $20\text{-}50\mu\text{m}$ 的裸露鑽石提供了銳利的切刃及容納切屑的屑袋，以利後續磨削。



(a) 同心微孔加工結果

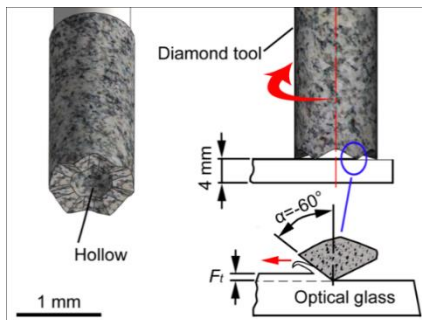


(a) 同心微孔內壁

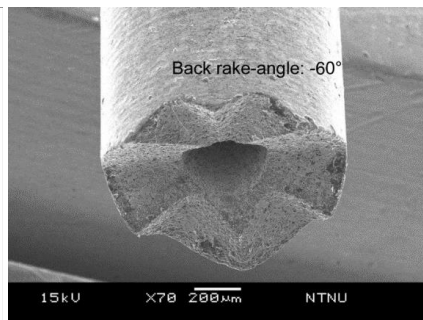
圖 3 同心微孔放電加工結果

2.3 鑽石刀具負後斜角加工

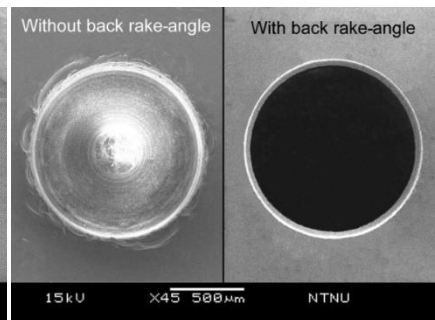
硬脆材料如光學玻璃適合承受壓應力，而負後斜角 ($\alpha = -60^\circ$) 的設計能對光學玻璃產生壓切效應的負角切削，如圖 4(a)所示。本實驗將鑽石磨棒端面圓形等分為三等份，將每一等份採用相同的 V 型路徑將其端面切出 V 溝，三等份加工完成後，便可形成六刀負後斜角，如圖 4(b)所示。切刃的幅射對稱能平衡磨削力作用。初步實驗結果顯示，若無負後斜角切刃，很難在光學玻璃上完成鑽削的動作，如圖 4(c)左所示，圖 4(c)右為成功的研鑽加工。切刃提供壓切力與容屑空間，不僅可維持刀具壽命，也可防止切屑堵塞刀具，從而得到高圓度的微孔。



(a) 負角切削之壓切效應



(b) 完成之六刀式負後斜角



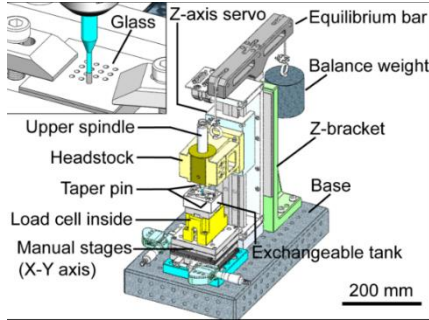
(c) 初步實驗結果

圖 4 鑽石刀具負後斜角加工技術

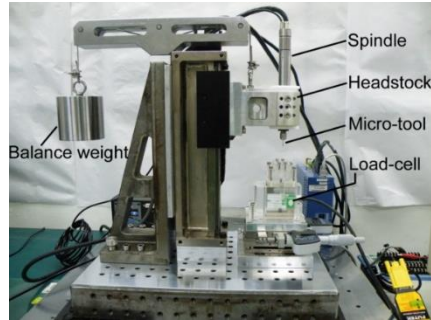
3. 桌上型微研鑽機開發

圖 5(a)所示為本研究設計之桌上型微研鑽機，垂直式的 C 型結構；Z 軸伺服線性馬達可

進行自動研鑽加工；主機頭裝置一高速主軸；另有一平衡機制，用來平衡主機頭重量；X 和 Y 軸係手動精密移動平台。複合式工作槽則利用兩個在對角錐銷及螺栓精密定位於工作台上，此複合工作槽可進行逆向同心微孔加工及研鑽技術，圖 5(b)為本研究開發之桌上型微研鑽機。



(a) 桌上型微研鑽機設計



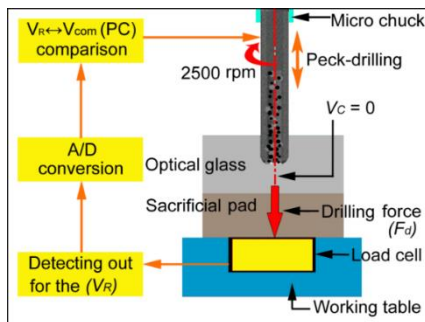
(b) 完成之桌上型微研鑽機

圖 5 桌上型微研鑽機開發

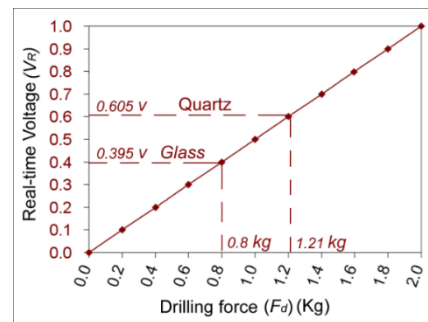
4. 實驗結果與討論

4.1 即時電壓偵測與回饋

研鑽過程中，為避免過大研鑽力而對光學玻璃造成破壞，或過小研鑽力造成刀具與工件間過度摩擦，本研究透由荷重元(load-cell)以偵測加工時光學玻璃所產生的阻力。圖 6(a)為本研究之荷重元感測機制，透過荷重元不斷感測研鑽壓力並轉換成電壓(V_R)輸出，圖 6(b)為研鑽力(F_d)與即時電壓(V_R)的線性關係圖，在比較電壓範圍內，荷重元感測的電壓訊號透過程式即時回饋，以便控制加工軸並自動調整至適當進給率，以達最適切削。



(a) 荷重元感測機制



(b) 研鑽力與即時電壓關係圖

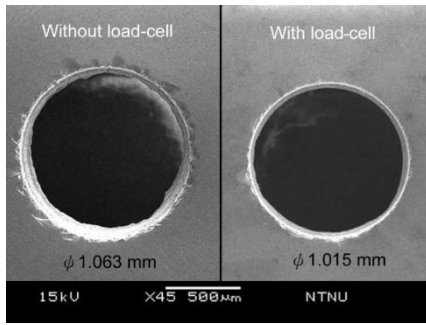
圖 6 即時壓力偵測與回饋機制

4.2 光學玻璃及石英之微孔鑽削

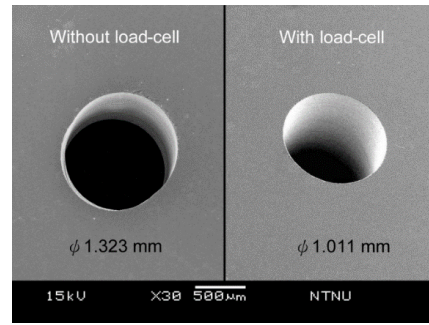
理想條件下，光學玻璃微孔係逐層研鑽去除，研鑽刀具 6 刃切刃在每次進給中，會有 6 個接觸切刃，若令每轉進給量為 F_r ，則單獨一個切刃的進給量 F_i 將為每轉進給量的六分之一，如式(2)所示， F_m 為研鑽工具每分鐘進給量， N 為研鑽工具轉數。脆性材料研鑽過程中，脆性轉延性是重要的去除機制[12, 13]，為確保脆性材料能以延性方式磨削，須找出進給量之臨界深度(Critical cutting depth)，以防止微細裂紋產生。實驗結果得知，光學玻璃及石英所對應之進給率分別為 $0.16 \mu\text{m}/\text{rev}$ 及 $0.12 \mu\text{m}/\text{rev}$ ，得每刃切削量約 20-27 nm，能形成延性研鑽。

$$F_m = F_r N = 6 F_i N \quad (2)$$

圖 7(a)係比較有無荷重元感測機制對微孔入口邊緣的影響，當無荷重元感測機制時，光學玻璃入孔孔緣有明顯的擴孔現象及嚴重碎裂(圖 7(a)左側)，嚴重擴孔現象也發生在石英入口孔緣(圖 7(b)左側)，原因是進給率太快，而石英因為具更高的硬度、更大的切削阻力造成刀具偏擺，而形成嚴重擴孔。相較之下，圖 7(a)與(b)右側，因荷重元感測機制而能調整研鑽工具的進給率，故改善了擴孔問題。



(a) 光學玻璃微孔研鑽

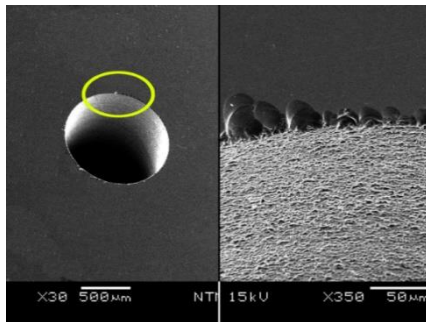


(b) 石英玻璃微孔研鑽

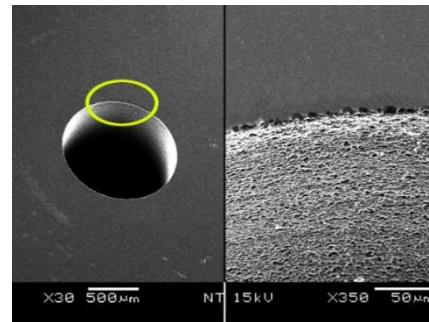
圖 7 光學玻璃及石英玻璃之微孔研鑽加工

4.3 犧牲層影響

硬脆材料抗拉強度較抗壓強度差，邊緣常有微細裂紋發生，為避免微細裂紋，本研究提出降低研鑽刀具入口及出口進給率的策略，減少鑽削所造成的壓力；以及在工件底部多加一層犧牲層，以提高研鑽區的研鑽剛性(Grinding-drilling stiffness)，圖 8(a)為無犧牲層時的出孔邊緣，因研鑽剛性不足，具嚴重裂紋，圖 8(b)因犧牲層作用，所發生的崩裂較不明顯。



(a) 無犧牲層加工的石英玻璃(出口處)



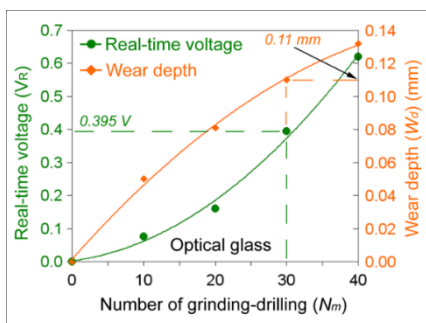
(b) 有犧牲層加工的石英玻璃(出口處)

圖 8 犧牲層影響

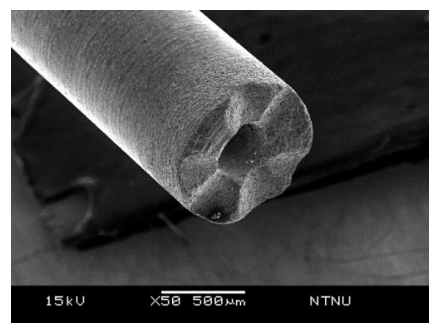
4.4 刀具壽命討論

泰勒刀具壽命方程式經常用於單點刀具壽命評估[14]，如式(3)所示，式中， V 為切削速度 (m/min)， T 為刀具壽命(min)， n 為相依於切削參數之指數， C 為經驗係數，然而本實驗的研鑽刀具係多刃結構，難以估計指數 n 及經驗係數 C 。因此提出一種利用刀具端面平均磨耗深度 (W_d) 及加工次數 (N_m)，以估計刀具壽命的方法。當加工次數為 30 次時，偵測電壓 (V_R) 明顯上升，研鑽阻抗也發生攀升(圖 9(a))，相應的 V_R ， W_d 及研鑽力 (F_d) 分別為 0.395V，0.11mm 及 0.8 Kg。此時的刀具因為其切刃已磨平，容屑空間大幅減少(圖 9(b))，已無法再有效的加工，因此，本實驗獲得的合理刀具加工次數為 30 次。

$$VT^n = C \quad (3)$$



(a) 加工次數與磨耗深度關係



(b) 加工 30 次後的研鑽刀具形貌

圖 9 研鑽刀具壽命曲線及磨耗樣貌

5. 結論

本研究成功開發具壓切效應的鑽石研鑽刀具，並成功與具研削力判斷的桌上型微研鑽機上，以研鑽技術成型光學玻璃微孔。所設計的6刃式負後斜角，可在研鑽過程中提供壓切力；奈米等級的切削深度能將脆性材料以延性模式加工；而荷重元感測機制提供了即時的研鑽力偵測與精確的研削力回饋機制，能確保具最適研鑽進給率與研鑽力，以防止微細裂紋與擴孔現象的發生。此外，犧牲層也能支撐光學玻璃，抑制崩裂的發生。刀具壽命評估約為30次。本研究所開發之研鑽技術提供了一簡易、低成本、環保且易於控制的方法，預計此研鑽技術能對精密微製造領域產生重大貢獻。

參考文獻

1. Chen, M., An, Q.L., Lin, W.M., Ohmori, H., 2009. Fundamentals of BK7 glass removal in micro/nano-machining. *Advanced Materials Research*, 76-78, 485-490.
2. Saleh, T., Rahman, M.S., Lim, H.S., Rahman, M., 2007. Development and performance evaluation of an ultra precision ELID grinding machine. *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193, 287-291.
3. Lim, C.S., Hong, M.H., Kumar, A.S., Rahman, M., Liuc, X.D., 2006. Fabrication of concave micro lens array using laser patterning and isotropic etching. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 552-558.
4. Cao, X.D., Kim, B.H., Chu, C.N., 2009. Micro-structuring of glass with features less than 100 μ m by electrochemical discharge machining. *Precision Engineering*, 33, 459-46.
5. Antonyuk, B. P., Obidin, A. Z., Vartapetov, S.K., Lapshin, K.E., 2008. Light driven self-drilling in glasses. *Optics Communications*, 281, 2139-2144.
6. Nikumb, S., Chen, Q., Li, C., Reshef, H., Zheng, H.Y., Qiu, H., Low, D., 2005. Precision glass machining, drilling and profile cutting by short pulse lasers. *Thin Solid Films*, 477, 216-22.
7. Weber, H., Herberger, J. Pilz, R., 1984. Turning of machinable glass ceramics with an ultrasonically vibrated tool. *Annals of CIRP*, 33, 85-87.
8. Moriwaki, T., Shamoto, E., Inoue, K., 1992. Ultraprecision ductile cutting of glass by applying ultrasonic vibration. *Annals of CIRP*, 41, 141-144.
9. Chen, S.T. 2008. Fabrication of a high-density micro holes by upward batch micro EDM. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18, (9pp).
10. Chen, S.T., Lai, Y.C., Liu, C.C. 2008, Fabrication of a miniature diamond grinding tool using a hybrid process of micro-EDM and co-deposition. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18, (8pp).
11. Saito, C., 1979. The Construction and 100% Operational Skills of EDM. (in Japanese) Mitsubishi Electric Ltd. 40-69.
12. Sinhoff, V., König, W. 1998. Generative precision grinding of optical glass. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 47, 253-258.
13. Zhou, M., Wang, X.J., Ngoi, B.K.A., Gan, J.G.K., 2002. Brittle-ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration. *Journal of Materials Processing Technology*, 121, 243-251.
14. Taylor, F.W., 1907. On the art of cutting metals. *Transactions of ASME*, 28, 31-58.