

Visão Geral das Aplicações e Tecnologias do Feixe de Elétrons

Daniel Víctor Carvalho Lima, Maksym Ziberov

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília-DF, Brasil (daniel.victorc777@gmail.com; mziberov@unb.br)

Resumo: O processo de feixe de elétrons teve origem no início do século XX e desde então têm sido aprimorados, estudado e aplicado em diversos âmbitos da ciência. O uso deste processo se estende desde a fabricação de peças de difícil confecção por outros métodos, até usos em âmbitos biológicos na esterilização de componentes. Sendo assim este trabalho tem como objetivo investigar e apresentar os conceitos, através de uma revisão da literatura, apresentando as aplicações e tendências do processo.

Palavras-chave: Feixe de elétrons, soldagem, corte, manufatura aditiva

INTRODUÇÃO

Na atualidade os processos por feixe de elétrons são amplamente utilizados na fabricação, seja na união de materiais (soldagem), corte ou manufatura aditiva. A utilização deste processo remete aos anos de 1905, quando o físico alemão Marcello von Pirani utilizou um tubo de raios catódicos para a fusão de pó de tântalo. Ao longo das décadas seguintes o processo foi sendo utilizado na construção de microscópio, osciloscópio e processos de furação. Em 1958 o processo foi utilizado para soldagem de uma chapa de 5 mm Zircaloy com penetração total o que aumentou o interesse no processo (Schultz, 1993).

De acordo com Oslon et al. (1993), o processo por feixe de elétrons ocorre com a emissão de elétrons em alta velocidades (de 0,3 a 0,7 vezes a velocidade da luz) que são emitidos através de um filamento (tungstênio ou tântalo) e conduzidos e direcionados através de bobinas numa câmara de vácuo. A alta velocidade de emissão dos elétrons proporciona uma alta energia cinética que proporciona uma grande densidade de energia, fazendo com que esse processo seja apropriado para para fusão ou vaporização de um material, resultando em grandes penetrações para o processo de soldagem. Apesar da grande capacidade do processo, sua operação requer cuidados especiais, sendo necessário que o processo ocorra numa câmara de vácuo a fim de garantir a passagem do feixe de elétrons sem desvio e colisões com partículas, além de proteger o filamento de oxidação e formação de arcos elétrico dentro do equipamento. A figura 1 apresenta uma comparação da passagem do feixe em diferentes condições de vácuo, nela é possível observar a dispersão do feixe à medida em que se aumenta a pressão do sistema (Oslon et al., 1993).

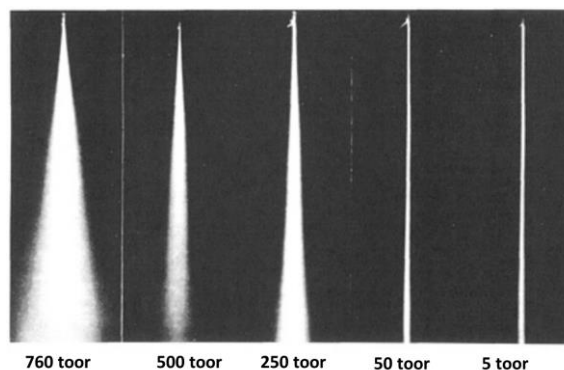


Figura 1. Dispersão do feixe de elétrons em diferentes níveis de vácuo, adaptado de (Oslon et al., 1993).

Sendo assim, o presente trabalho tem como principal objetivo expor os princípios de funcionamento, tendências e aplicações dos processos de soldagem, corte e manufatura aditiva por feixe de elétrons.

MATERIAL E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos, foi realizada uma revisão bibliográfica tratando dos processos que utilizam feixe de elétrons. Sendo assim, foram utilizados livros, artigos científicos e demais publicações que compreendem o tema abordado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

SOLDAGEM

O processo de soldagem via feixe de elétrons por meio da colisão dos elétrons, portanto uma grande energia cinética (alta velocidade), sendo parte da energia dos elétrons absorvida pelo material em forma de calor e outra parte é liberada em forma de colisão elástica de

elétrons e outros fenômenos secundários de emissão (Schultz, 1993).

Sendo assim, Oslon et al. (1993) listam algumas vantagens do processo, como a alta densidade de potência, que proporciona grande penetração, pequena zona termicamente afetada e baixa distorção além da possibilidade de uniões de materiais refratários e/ou dissimilares em condições de alta produtividade Schultz (1993) também relata a boa repetibilidade e padronização devido à capacidade de monitoração e ajustes dos parâmetros de soldagem. Entretanto, as peças não devem possuir grandes dimensões, visto que há a necessidade de manter uma câmara de vácuo durante o processo.

Tendo em vista a ampla quantidade de vantagens do processo, este tem sido cada vez mais estudado e possui diversas aplicações. Uma das grandes aplicações do processo de soldagem via feixe de elétrons foi estudado por Liu et al. (2021), que realizaram uma revisão sobre a aplicação da soldagem no espaço. A primeira aplicação de soldagem e corte via feixe data da década de 1960, na qual a URSS realizou experimentos de soldagem no espaço utilizando o processo de feixe de elétrons. O equipamento utilizado foi intitulado de “Vulkan” e é apresentado pela Figura 2 sendo desenvolvido pelo Paton Welding Institute (PWI).



Figura 2. Unidade de Soldagem “Vulkan” (Strelko, 2021).

Ainda no contexto aeroespacial, a empresa PTR, relata diversas aplicações em componentes da área, como em engrenagens, rotor de compressor e turbina. A Figura 3 apresenta a solda utilizada na união de rotores para compressores multi estágio. O autor relata também que essa união foi feita na peça já finalizada, não necessitando de processos futuros de acabamento. Nesta figura é possível ver com clareza a região de

união na região central com boa penetração e qualidade.

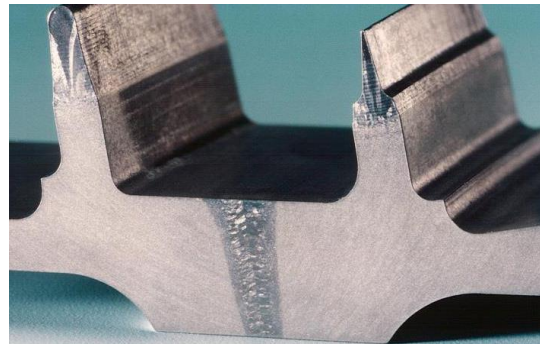


Figura 3. Soldagem via feixe de elétrons em componentes aeroespaciais (PTR, 2023).

Outra aplicação do processo de feixe de elétrons e no âmbito da fabricação de equipamentos voltados à energia nuclear. Neste sentido, Baufeld e Dutielleul apresentaram a aplicabilidade do processo de soldagem de feixe de elétrons na construção de pequenos reatores modulares. Para cumprir os requisitos, o processo deve ser capaz de realizar a união de paredes de até 108 mm com penetração total para a liga SA508 Grade 3. Os autores foram capazes de realizar a união com penetração total de uma peça da liga S355 com 78 mm de espessura para uma potência de 30kW, e afirmaram que para a potência de 40 kW a espessura de 108 mm também poderia ser atingida.

Dilthey e Dorf Müller (2006) foram capazes de realizar o processo de microsoldagem utilizando o processo de feixe de elétrons. Tendo em vista a alta potência dos equipamentos convencionais de soldagem via feixe de elétrons, os autores optaram por adaptar o equipamento de feixe de elétrons de um microscópio eletrônico de varredura (MEV), que possui uma potência mais compatível para a realização do processo. A Figura 4 apresenta alguns exemplos de cordões realizados em uma superfície quadrada de 500 μm utilizando o feixe de elétrons com diferentes frequências de passes.

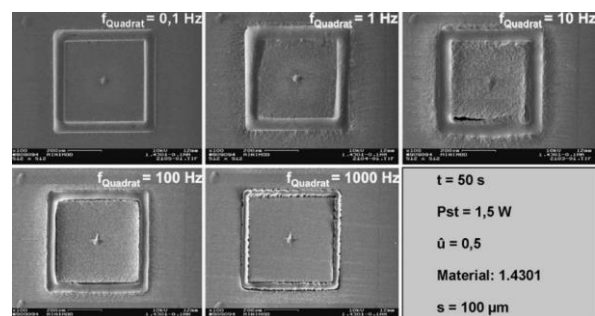


Figura 4. Microsoldagem por feixe de elétrons (Dilthey e Dorf Müller, 2006)

De maneira similar, Reisgen e Dorf Müller (2008) também adaptaram um MEV para a realização da

soldagem de micropeças por meio do processo de feixe de elétrons com objetivo de investigar a repetibilidade do processo em escala micro. Foram observadas diversas adversidades na realização deste processo em escala micro, tal como o posicionamento da peça e a distorção observada pela condutividade térmica das pequenas amostras. Apesar disto, os autores foram capazes de realizar a união de arames de 175 μm de diâmetro, tal como visto na Figura 5 e folhas metálicas, garantindo boa repetibilidade do processo.

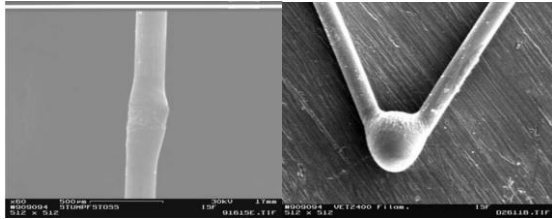


Figura 5. Soldagem em arames de 175 μm (Reisgen e Dorfmueller, 2008).

Atualmente o processo de feixe de elétrons tem sido observado do ponto de vista de otimização e controle, tal como visto por Sokolov e Pavlushin (2023). Em seu trabalho os autores estudaram modelos matemáticos e implantaram, através de sistemas de multiprocessadores e câmeras, uma forma de melhor controle do processo. A partir das imagens obtidas no monitoramento do processo, os parâmetros podem ser corrigidos para obtenção de um cordão de melhor qualidade.

CORTE

Devido à sua alta densidade de potência, o processo de feixe de elétrons também pode ser utilizado no corte de materiais. Hassel et al. (2013) estudaram o processo de corte de aço inoxidável e cobre via feixe de elétrons sem vácuo. Os autores foram capazes de cortar chapas de aço de inoxidável de 2,5 mm de espessura numa velocidade de 18,5 m/min com alta qualidade, alta como pode ser visto na figura 6. Para a chapa de cobre foi possível cortar placas de 6 mm e 10 mm de espessura com velocidades de 9 m/min e 3,5 m/min respectivamente.

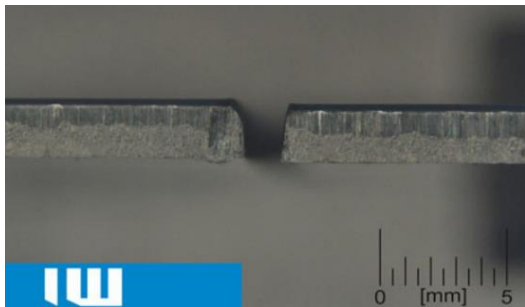


Figura 6. Corte de chapa de aço inoxidável sem vácuo (Hassel et al., 2013).

Yuzvinsky et al. (2005) desenvolveram um método utilizando o processo de feixe de elétrons de baixa energia para o corte de nanotubos de carbono e boro nitrito. Os autores relatam a existência de outros processos capazes de realizar tal corte, entretanto, nenhum apresenta a praticidade (possibilidade de cortar diferentes tipos de nanotubos) e qualidade do corte. Sendo assim, o método estudado pelos autores utilizaram o feixe de elétrons de baixa energia (ensaios com potência de 1 keV até 20 keV) presente no microscópio eletrônico e realizaram o corte possibilitando a obtenção de um corte mais preciso tal como pode ser observado pela Figura 7.

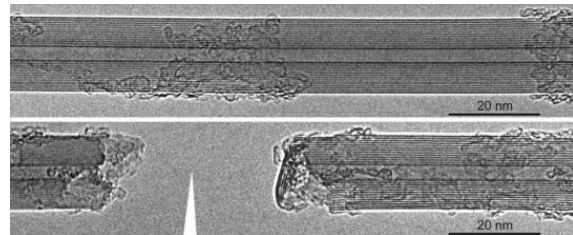


Figura 7. Corte de nanotubos de carbono (Yuzvinsky et al., 2005).

MANUFATURA ADITIVA

O processo de manufatura aditiva via feixe de elétrons apresenta tem sido estudado e apresenta diversas aplicações, dada as vantagens do processo. Sing et al. (2016) apresentou uma revisão sobre a utilização do processo de manufatura aditiva via laser e feixe de elétrons em aplicações médicas. A confecção de peças via manufatura por processos de feixe de elétrons envolve a modelagem computadorizada do modelo da peça em software 3D, que é encaminhado à máquina e a partir da fusão controlada do pó metálico camada por camada é obtida a peça. O processo de manufatura via feixe de elétrons apresenta excelentes benefícios, como a possibilidade de fabricação de peças de geometria complexas e com boas características mecânicas (poucos defeitos) além de redução dos custos com processos de usinagem. Ademais, para a produção de implantes médicos é aprovado por agências fiscalizadoras como o órgão americano FDA (*Food and Drug Administration*) desde 2010.

Li et al. (2009) realizaram a caracterização mecânica da estrutura de colmeia porosa, apresentada na Figura 8. A estrutura apresentada foi construída a partir do processo de manufatura aditiva via feixe de elétrons utilizando a liga de titânio Ti-6Al-4V e foi submetida a um ensaio compressivo para a identificação de parâmetros mecânicos do material. Desta forma, os autores constataram que o módulo de Young da peça é similar ao do osso humano e seu limite de resistência à compressão foi de 116 MPa, o que indica um potencial nas aplicações médicas.

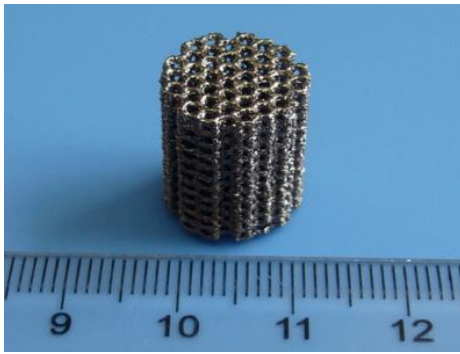


Figura 8. Estrutura porosa de colmeia. (Lil et al., 2009).

Um outro exemplo de aplicação médica da manufatura aditiva via feixe de elétrons é na confecção de implantes ortodônticos. Suska et al. (2016) utilizaram do processo de feixe de elétrons para a confecção de um implante mandibular feito em Ti-6Al-4V classe 23. A peça foi confeccionada tal como a apresentada pela Figura 9, sendo destinada a uma paciente de 84 anos de idade que portava um câncer na região. O modelo foi confeccionado sob medida para a paciente a partir dos parâmetros obtidos por meio de uma tomografia computadorizada da região afetada. Após o procedimento a paciente apresentou uma melhoria na sua qualidade de vida com melhoria nas interações sociais e redução de dores e complicações relacionadas.

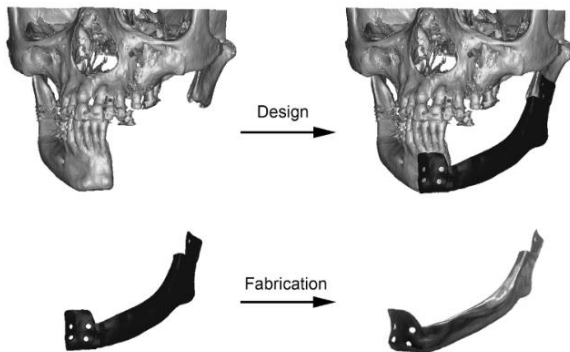


Figura 9. Modelo tridimensional de implante mandibular (Suska et al., 2016).

Apesar das possibilidades de fabricação de peças via processo de manufatura aditiva, ainda há uma necessidade dos estudos e comparações de propriedades das peças produzidas por manufatura aditiva e por métodos convencionais. Sendo assim, Edwards et al. (2013) realizaram estudos com intuito de compreender e comparar as propriedades mecânicas de uma peça fabricada pelo processo de manufatura aditiva via feixe de elétrons. As peças apresentadas pela Figura 10 foram feitas a partir da liga de Ti-6Al-4V em condições de “*as-deposited*” (sem processo de acabamento superficial), com excesso de material e usinadas. As peças possuem a geometria de suportes utilizados na indústria

aeroespacial e foram testadas quanto a fadiga. Além das peças produzidas, os autores também fabricaram corpos de prova para serem ensaiados para esforços estáticos, crescimento de trinca e fadiga. A partir dos ensaios realizados foi observado que a tenacidade a fratura do material se manteve similar a observada por processos convencionais (forjada), enquanto para fadiga a resistência foi menor. Não obstante, todos os suportes resistiram à 2x a vida prevista com a carga de projeto. Além disso, para o dobro da carga houve falha apenas no prendedor e não na estrutura do componente.

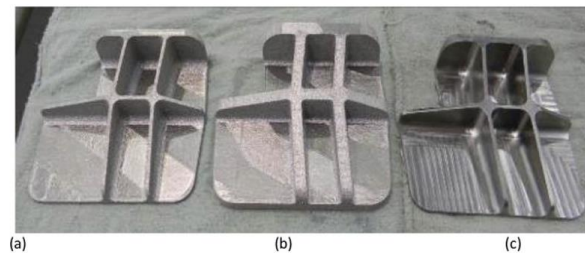


Figura 10. Suportes para aplicações aeroespaciais fabricadas pelo processo de manufatura aditiva via feixe de elétrons (Edwards et al., 2013).

OUTRAS APLICAÇÕES

O processo de feixe de elétrons também pode ser utilizado no contexto de desinfecção para a eliminação de bactérias e vírus. Kataoka et al. (2023) relatam a utilização de feixe de elétrons de baixa energia para a eliminação da bactéria da salmonella presente na casca e no conteúdo líquido do ovo. Para tal os autores montaram uma bancada com uma esteira transportadora com um equipamento emitindo feixe de elétrons. No conteúdo do ovo foram posicionados sensores termoluminescentes para captar a emissão dos feixes de elétrons. Foram então, realizados experimentos variando a distância entre o equipamento emissor de elétrons e o ovo e também a velocidade da esteira a fim de analisar a dose de energia irradiada. A figura 11 apresenta uma representação de como ocorre o processo de esterilização e passagem do ovo pela esteira transportadora. A partir dos estudos foi observado que a dose irradiada no centro do ovo foi menor que 100 mGy e que os parâmetros ideais para esterilização são de velocidade da esteira de 2 m/min e 17 rotações por segundo para rotação do ovo.

Huang et al. (2023) realizaram um estudo avaliando a viabilidade e eficiência da esterilização de máscaras N95 (amplamente utilizadas durante a pandemia de COVID 19) utilizando feixes de elétrons. Para isso os autores montaram um aparato similar ao utilizado por Kataoka, Kawahara e Sekiguchi (2023) em que os respiradores são posicionados numa esteira transportadora e passam pelo equipamento em que são emitidos os feixes de elétrons. Para avaliar a

efetividade do processo foram avaliadas a molhabilidade da máscara após o processo, filtragem e outros parâmetros de degradação do material. Apesar de não ter ocorrido nenhum tipo de degradação mecânica das máscaras N95 submetidas ao processo, a eficiência de filtração foi reduzida de 95% para 63,6%, tornando o processo de esterilização via feixe de elétrons impróprio para essa aplicação.

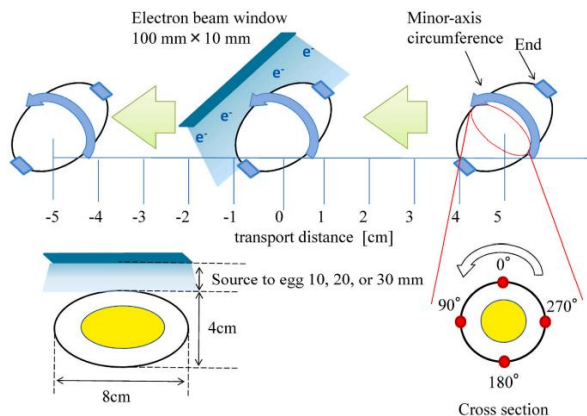


Figura 11. Emissão de feixe de elétrons em ovos (Kataoka et al., 2023).

CONCLUSÕES

A partir dos objetivos do trabalho e da revisão da literatura realizada sobre as aplicações e processos de feixes de elétrons é possível concluir que:

- A utilização de processos de feixe de elétrons data de meados dos anos 1900 e ao longo dos anos o processo foi aprimorado, ampliando as possibilidades de utilização;
- Apesar de ser possível utilizar o processo de feixe de elétrons com elevadas potências, em muitas aplicações é necessário utilizar uma menor energia a fim de garantir a efetividade da aplicação;
- A alta capacidade de controle do processo e diâmetro do feixe permite com que este processo seja utilizado em escala micro, para corte ou soldagem;
- As características e controlabilidade do processo permitem com que ele possa ser utilizado em aplicações sensíveis como por exemplo na área nuclear e médica.
- O processo de feixe de elétrons tem um papel importante na melhoria da qualidade de vida e progresso humano;
- Nos últimos anos o processo de feixe de elétrons vem sendo estudado em aplicações voltadas à esterilização e eliminação de vírus e bactérias.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento da Engenharia Mecânica (ENM), Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade de Brasília (UnB)

pelo apoio e suporte laboratorial. CNPq (processo 405499/2022-1).

REFERÊNCIAS

- Aerospace Electron Beam Welding (EBW). PTR, 2023. Disponível em: <https://www.ptreb.com/electron-beam-welding-applications/aerospace-welding>. Acesso em: 13 fev. 2023.
- Baufeld, Bernd; Dutilleul, Thomas. Electron Beam Welding of Large Components for The Nuclear Industry. In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2019.
- Callanan, J. G., Black, A. N., Lawrence, S. K., Jones, D. R., Martinez, D. T., Martinez, R. M., & Fensin, S. J. Dynamic properties of 316l stainless steel repaired using electron beam additive manufacturing. *Acta Materialia*, 246, 118636, 2023.
- Dilthey, U.; Dorfmueller, T. Micro electron beam welding. *Microsystem technologies*, 12, 626-631, 2006.
- Edwards, P.; O'conner, A.; Ramulu, M. Electron beam additive manufacturing of titanium components: properties and performance. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135, 2013.
- Hassel, T., Murray, N., Konya, R., Beniyash, A., & Bach, F. W. Nonvacuum electron beam cutting and welding—two partnering processes for fast and highly efficient metal working. *Welding in the World*, 57, 315-322, 2013.
- Huang, M., Hasan, M. K., Pillai, S. D., Pharr, M., & Staack, D. Electron beam technology for Re-processing of personal protective equipment. *Radiation Physics and Chemistry*, 202, 110557, 2023.
- Kataoka, Noriaki; Kawahara, Daigo; Sekiguchi, Masayuki. Uniform irradiation of table eggs in the shell with low-energy electron beams. *Radiation Physics and Chemistry*, 202, 110553, 2023.
- Liu, X., Dong, Q., Wang, P., & Chen, H. Review of electron beam welding technology in space environment. *Optik*, 225, 165720, 2021.
- Li, X., Wang, C., Zhang, W., & Li, Y. Fabrication and characterization of porous Ti6Al4V parts for biomedical applications using electron beam melting process. *Materials Letters*, 63, 403-405, 2009.
- Olson, David LeRoy and Siewert, Thomas A. and Liu, Stephen and Edwards, Glen R. *Welding, Brazing, and Soldering*. ASM International, 1993.
- Reisgen, U.; Dorfmueller, T. Developments in micro-electron beam welding. *Microsystem technologies*, 14, 1871-1877, 2008.

Schultz, Helmut. Electron beam welding. Woodhead Publishing, 1993.

Sing, S. L., An, J., Yeong, W. Y., & Wiria, F. E. Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs. *Journal of Orthopaedic Research*, 34, 369-385, 2016.

Sokolov, Yu A.; Pavlushin, N. V. Special Features of Control of the Process of Electron Beam Welding. *Metal Science and Heat Treatment*, 1-6, 2023.

Strelko, Oleh. Stages of development, improvement and application of equipment for welding in space, created with the participation of Ukrainian scientists. *Studia Historiae Scientiarum*, 20, p. 263-283, 2021.

Suska, F., Kjeller, G., Tarnow, P., Hryha, E., Nyborg, L., Snis, A., & Palmquist, A. Electron beam melting manufacturing technology for individually manufactured jaw prosthesis: a case report. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 74, 1706, 2016.

Yuzvinsky, T. D., Fennimore, A. M., Mickelson, W., Esquivias, C., & Zettl, A. Precision cutting of nanotubes with a low-energy electron beam. *Applied Physics Letters*, 86, 053109, 2005.