

Evaluación del pulido mecánico en acero mediante interferometría óptica

Evaluation of mechanic polishing on steel using optic interferometry

E. Rueda-Soriano ^a, M.P. Gallardo-Castro ^{b,*}, M.A. Veloz-Rodríguez ^b, J.M. Saucedo-Solorio ^c

^a Área Académica de Computación y Electrónica, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México

^b Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México

^c Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México

Resumen

Uno de los principales métodos de preparación de la superficie para procesos electroquímicos, es el pulido mecánico, debido a que no representa riesgo y es de bajo costo. Este método implica el uso de herramientas físicas y abrasivos para eliminar las imperfecciones en la superficie metálica, como líneas de esmerilado, rayones, defectos de la fabricación y picaduras. Sin embargo, no todos los pulidos mecánicos son uniformes y homogéneos, lo que implica es que aún se contengan imperfecciones a escalas nanométricas. Es por ello que se propone utilizar el interferómetro de Michelson como una herramienta de medición y análisis de superficie tanto cualitativo como cuantitativo; esto debido, a que es un método no invasivo, lo cual no modifica las características del metal. De acuerdo a los resultados en el patrón de interferencia adquirido, se observa la discontinuidad y el trazo no lineal de las franjas, indicando las irregularidades presentes en la superficie, y mediante el método del paralelogramo se obtienen los tamaños de dichas irregularidades.

Palabras Clave: Electroquímica, Interferencia, Metales, Pulido, Superficie

Abstract

One of the main methods of surface preparation for electrochemical processes is mechanical polishing, because it is safe and inexpensive. This method involves the use of physical tools and abrasives to remove metal surface imperfections such as grinding lines, scratches, manufacturing defects and pitting. However, not all mechanical polishing is uniform and homogeneous, which implies that imperfections are still contained at nanometer scales. This is why the Michelson interferometer its proposed as a tool for both qualitative and quantitative surface measurement and analysis; this is due to the fact that it is a non-invasive method, which does not modify the metal's characteristics. According to the results in the interference pattern acquired, the discontinuity and the non-linear trace of the stripes are observed, indicating the irregularities present on the surface, and by means of the parallelogram method, the sizes of such irregularities are obtained.

Keywords: Electrochemistry, Interference, Metal, Polishing, Surface

1. Introducción

La electroquímica, ciencia encargada de describir los cambios químicos en materiales debido al paso de una corriente eléctrica o, proceso contrario en el cual una corriente eléctrica es generada por una reacción química; ha tenido grandes desarrollos de dispositivos entre los cuales destacan las baterías y celdas de combustibles (Kurzweil, 2009); aplicaciones como electrodepósitos, generación de recubrimientos contra la corrosión y la síntesis de materiales semiconductores; por mencionar algunos (Plieth, 2008b, 2008a). Y muchos de estos desarrollos hacen uso de metales, materiales ampliamente utilizados en nuestra vida cotidiana y en la investigación científica. Sin embargo, antes de utilizar técnicas electroquímicas en los metales, es esencial realizar una preparación superficial adecuada para eliminar cualquier contaminante o sustancia no deseada. La presencia de estas sustancias puede tener un impacto

negativo en las propiedades de los metales, lo que puede afectar la reactividad o la adherencia de recubrimientos en la superficie (Almeida, 2001; Mandich, 2003). Por lo tanto, la preparación superficial es un paso crucial para el uso de procesos electroquímicos en estos materiales.

Existen varios métodos para la preparación superficial (Ebnesajjad, 2010), incluyendo el pulido mecánico, químico y electroquímico. El pulido mecánico es una alternativa rentable y segura que utiliza herramientas físicas y abrasivos para eliminar las imperfecciones en la superficie metálica, como líneas de esmerilado, rayones y picaduras, por mencionar algunos (Dickman, 2007). Este método es preferido en situaciones donde productos químicos a utilizar, podrían ser dañinos para la salud del usuario, o no contar con el equipo o instalaciones adecuadas para su manejo.

En general, la preparación adecuada de la superficie metálica es esencial para obtener resultados precisos y confiables en los

*Autor para la correspondencia: ga477764@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: estebanrs@uaeh.edu.mx (Esteban Rueda-Soriano), ga477764@uaeh.edu.mx (María Patricia Gallardo-Castro), mveloz@uaeh.edu.mx (María Aurora Veloz-Rodríguez), saucedo@uaeh.edu.mx (José Manuel Saucedo-Solorio)

procesos electroquímicos, y por ello, es importante utilizar la técnica de preparación superficial de acuerdo a la aplicación deseada.

Por otra parte, existen varias técnicas para la determinación de la topografía y morfología de una superficie metálica, de las cuales destacan la microscopía óptica, de fuerza atómica y electrónica; sin embargo, existen otras técnicas como es la interferometría óptica, una técnica de medición de no contacto y precisa que se utiliza en diversas aplicaciones de metrología (de Groot, 2015).

En la interferometría óptica, se pueden llegar a tener varios tipos de configuraciones; el interferómetro de Michelson es una de las configuraciones clásicas, un instrumento óptico utilizado para medir diferencias de longitud (Hariharan, 2007); entre sus aplicaciones se encuentran la medición de topografía en metales para evaluar la calidad de la superficie. Este método no destructivo es capaz de detectar y medir con precisión rayas y fisuras, lo que permite una evaluación rápida y confiable de la calidad de una superficie. Además, la técnica es fácilmente adaptable a la inspección en línea y puede ser utilizada en aplicaciones industriales para el control de calidad de los materiales metálicos; convirtiéndolo en una herramienta valiosa para la investigación y la industria (Schwenke et al., 2002; Walczak et al., 2023).

Por ello, en éste trabajo se utiliza el interferómetro de Michelson, para poder analizar los patrones de franjas y medir su discontinuidad debido a las rayas existentes en las superficies metálicas evaluadas.

2. Desarrollo experimental

2.1. Materiales

Se hicieron cortes de muestras de 5x5 cm de una lámina de acero AISI 304, calibre 18; así como fue adquirida y sin tratamiento previo. Para el pulido mecánico de las muestras se utilizaron lijas de carburo de silicio (SiC) de 240 a 1200 *partículas/in²*.

2.2. Pulido de muestras

Para el pulido manual (Figura 1), se comenzó frotando la muestra sobre la lija más basta (240 *partículas/in²*), con un movimiento lineal y uniforme. Una vez que se ha conseguido un rayado homogéneo, la muestra se gira 90° y comienza a frotarse sobre una lija más fina; esto se repitió hasta llegar a la lija final. Durante este proceso, es importante recalcar que, con el giro de la muestra se consigue eliminar el rayado procedente de la lija más basta, a la vez que es fácil controlar cuándo se elimina completamente. Al final, las muestras tienen una superficie plana con un rayado uniforme y fino procedente del último papel de abrasivo empleado. El lijado se realiza en presencia de agua, para evitar el calentamiento de la muestra e ir retirando el material que se desprende de la muestra y lija.

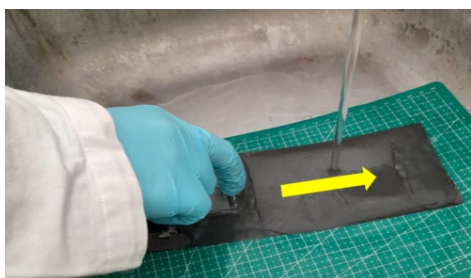


Figura 1: Arreglo de pulido manual

2.3. Interferómetro de Michelson

El interferómetro de Michelson usado para este trabajo, mostrado en las Figura 2a y 2b, emplea como fuente puntual de luz (*FL*), un láser de He-Ne con una longitud de onda de 633 nm, la cual pasa a través de un objetivo de microscopio (*Exp*) de 10X de aumento para obtener una fuente de luz extendida, llegando a un cubo divisor (*CD*), dividiendo el frente de onda en dos, el primero dirigido al Espejo 1 (*E₁*) y el segundo al espejo 2 (*E₂*), reflejándose cada uno y combinándose dentro del cubo divisor, para ser proyectado en una pantalla y observar el patrón de interferencia generado. La interferencia se graba substituyendo la pantalla por una cámara reflex, modelo Canon EOS Rebel T6s.

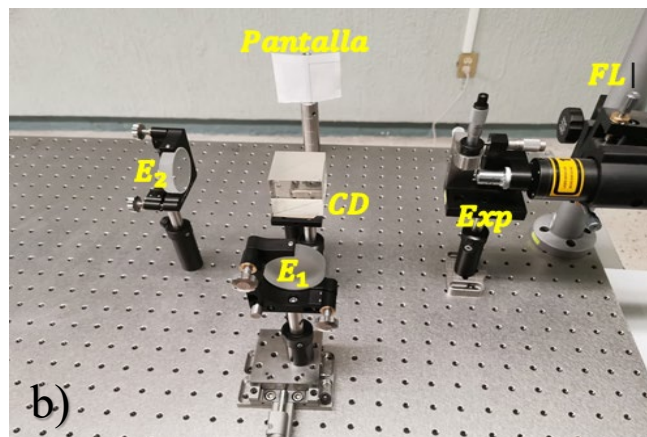
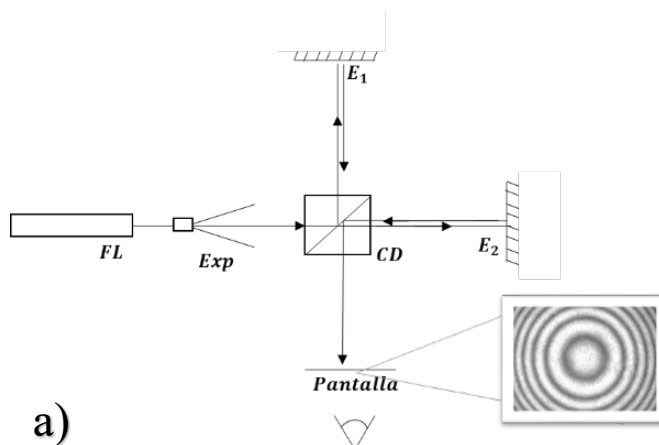


Figura 2: Diagrama (a) y Arreglo (b) de interferómetro con espejos

Una vez alineado el interferómetro con los espejos, se sustituye *E₂*, como se muestra en las Figuras 3a y 3b, por cada una de las muestras (*M_x*), acabadas con las lijas que se presentan en la Tabla 1; para entonces generar los patrones de interferencia a evaluar de cada una de ellas.

Tabla 1: Muestras y lija final usada

<i>M_x</i>	Lija final
<i>M₁</i>	800
<i>M₂</i>	1000
<i>M₃</i>	1200

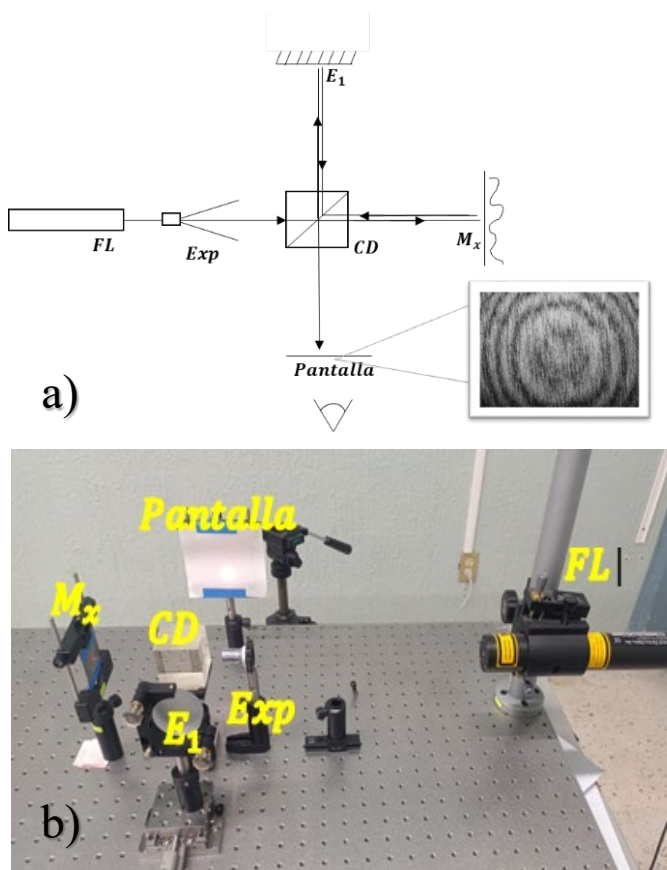


Figura 3: Diagrama (a) y Arreglo (b) de interferómetro con muestras

Cuantitativamente, $\Delta s/s$ nos indica la distorsión debido a las rayaduras, y ésta es expresada en unidades de longitud de onda según la siguiente expresión:

$$\text{Distorsión} = \Delta s/s * FEI \tag{1}$$

Donde se entiende por *FEI* como el factor escala interferométrico, este valor es determinado como la distancia entre franjas originada por la diferencia de camino óptico, entre los frentes de onda de la referencia (E_1) y la muestra (M_x), y sabiendo el tipo de arreglo interferométrico. Para el caso de este trabajo, FEI corresponde a $\lambda/2$, teniendo que $\lambda = 633 \text{ nm}$. Tomando en cuenta lo anterior, el análisis fue asistido de un programa diseñado en Matlab para tratar las imágenes y determinar las distancias y desviaciones entre franjas (Zygo corporation, 1993).

3. Resultados

En las Figuras 5, 7 y 9 se muestran los patrones de interferencia obtenidos por el interferómetro de Michelson de cada una de las muestras (M_1, M_2 y M_x); observando franjas discontinuas, que evidencian la existencia de irregularidades en cada pico o valle localizado en cada franja oscura. Para aplicar el método del paralelogramo es necesario realizar la diferencia de distancia existente entre cada una de las franjas oscuras, se hace uso de Matlab para obtener dichas distancias en unidades de pixel, lo cual se toma un perfil (línea blanca), obteniendo así las Figuras 6, 8 y 10 para cada muestra respectivamente. El programa realizado en Matlab nos permite conocer en donde se localiza cada franja oscura por la que pasa el perfil, y así determinar la distancia en pixeles, muy parecido a un perfilómetro de contacto. Posteriormente se aplica la ecuación (1) para obtener los valores de las irregularidades mostradas en las tablas de abajo. Las franjas se enumeran con su orden correspondiente, es decir, cada franja oscura es un orden respecto a su centro del interferograma y cada una de éstas representan un mínimo en el perfil.

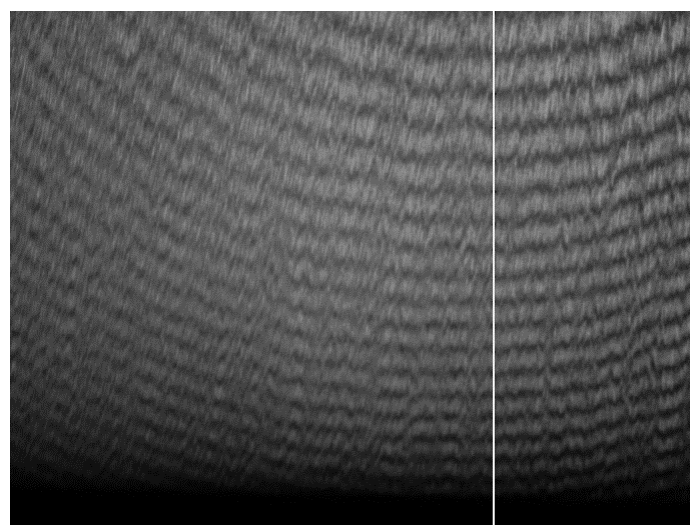


Figura 5: Patrón de interferometría de M_1 , la línea blanca indica donde se obtiene el perfil de Figura 6

2.4. Evaluación de patrones de interferencia

Una vez obtenidos los patrones de interferencia de cada una de las muestras (M_x), se procede a evaluar cada uno de estos con el método del paralelogramo. Para poder evaluar un patrón de interferencia, el método indica que es necesario cuantificar la distancia (s) y la desviación (Δs) entre franjas experimental y su ideal (Ver Figura 4).

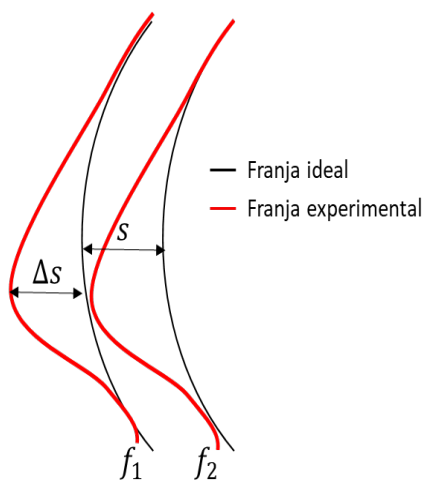


Figura 4: Parámetros del método del paralelogramo, donde f_1 y f_2 son franjas procedentes de un patrón de interferencia experimental

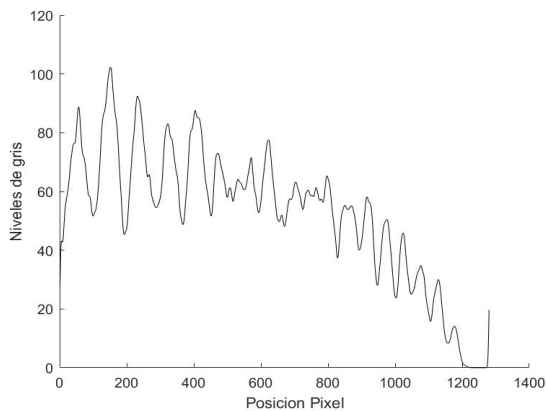


Figura 6: Perfil de línea blanca en patrón interferométrico de M_1

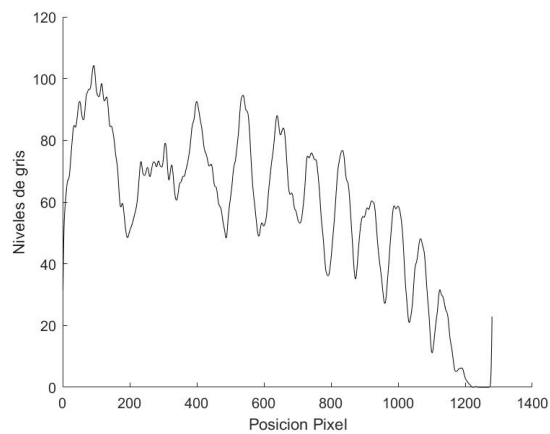


Figura 8: Perfil de línea blanca en patrón interferométrico de M_2

En las Tablas 2, 3 y 4, se muestra la distorsión calculada en cada una de las muestras, de acuerdo con el método del paralelogramo.

Tabla 2: Resultados de M_1

Orden de franja	Δs (pixels)	s (pixels)	Distorsión (nm)
5	20	98	64
7	22	81	85
9	15	81	58

Tabla 3: Resultados de M_2

Orden de franja	Δs (pixel)	s (pixel)	Distorsión (nm)
5	28	163	54
7	35	152	73
9	40	110	115

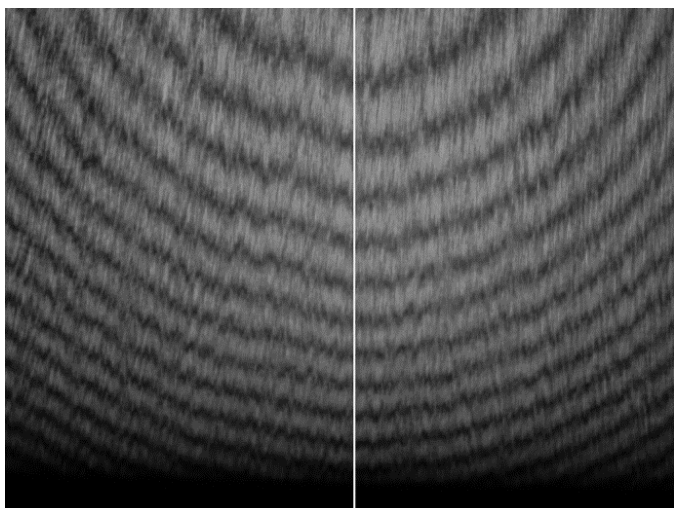


Figura 7: Patrón de interferometría de M_2 , la línea blanca indica donde se obtiene el perfil de Figura 8

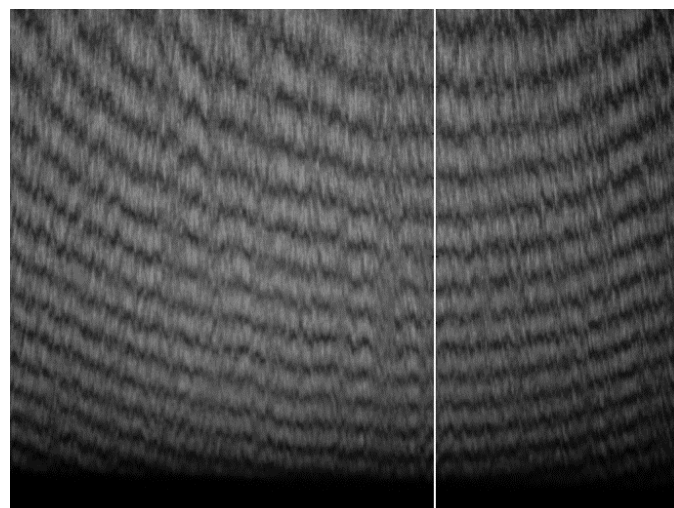


Figura 9: Patrón de interferometría de M_3 , la línea blanca indica donde se obtiene el perfil de Figura 10

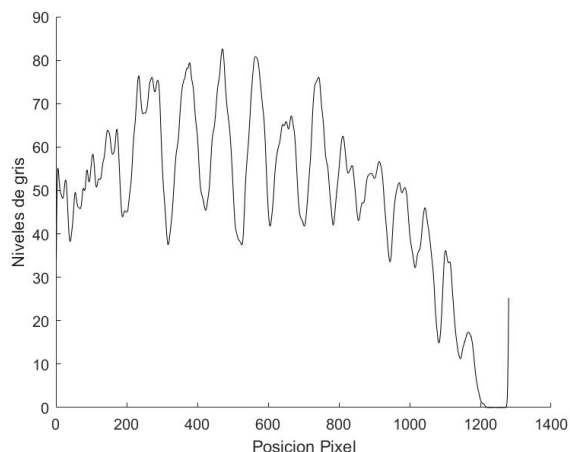


Figura 10: Perfil de línea blanca en patrón interferométrico de M_3

Tabla 4: Resultados de M_3

Orden de franja	Δs (pixel)	s (pixel)	Distorsión (nm)
5	40	136	93
7	35	118	94
9	37	112	104

4. Conclusiones

En este trabajo, se muestra que la interferometría óptica, y en específico el arreglo del interferómetro de Michelson, es una técnica de caracterización de superficie capaz de detectar irregularidades, en el rango de los nanómetros, de una superficie reflectora como son los metales.

Haciendo uso del método del paralelogramo, se logró cuantificar las distorsiones de las franjas debido a las rayaduras originadas en el pulido mecánico manual.

Una de las limitaciones observadas, es el tener que realizar varios perfiles, dependiendo de la zona donde se desea saber la forma y el tamaño de la irregularidad producida por la partícula de la lija abrasiva dejada en el pulido.

Adicionalmente se observa que el tamaño de abrasivo influye en poder obtener un patrón de interferencia capaz de resolver la distorsión de la franja debido a la irregularidad, a mayor densidad de abrasivo mayor calidad en el interferograma. A menor densidad del abrasivo, menor calidad en el interferograma, debido a que las rayaduras son más gruesas y se traslapan entre ellas, generando un problema de resolución para el análisis de las franjas dentro del patrón de interferencia. Como trabajo a futuro se planea mejorar el programa de Matlab para obtener perfiles simultáneos en diferentes zonas de la superficie y obtener una mayor información de ésta.

Referencias

- Almeida, E. (2001). Surface treatments and coatings for metals. A general overview. 1. Surface treatments, surface preparation, and the nature of coatings. In *Industrial and Engineering Chemistry Research* (Vol. 40, Issue 1, pp. 3–14). ACS. <https://doi.org/10.1021/ie0002091>
- Hariharan, P. (2007). *Basics of Interferometry*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373589-8.X5000-7>
- de Groot, P. (2015). Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography. *Advances in Optics and Photonics*, 7(1), 1. <https://doi.org/10.1364/AOP.7.000001>
- Dickman, A. (2007). The science of scratches—Polishing and buffing mechanical surface preparation. *Metal Finishing*, 105(10), 13–29. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(07\)00048-7](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(07)00048-7)
- Ebnesajjad, S. (2010). Surface Preparation of Metals. In *Handbook of Adhesives and Surface Preparation: Technology, Applications and Manufacturing* (pp. 83–106). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-4461-3.10006-9>
- Kurzweil, P. (2009). HISTORY | Electrochemistry. In *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources* (pp. 533–554). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-44452745-5.00007-1>
- Mandich, N. V. (2003). Surface preparation of metals prior to plating: Part 1. *Metal Finishing*, 101(9), 8–22. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(03\)90245-5](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(03)90245-5)
- Plieth, W. (2008a). Deposition of Alloys. In *Electrochemistry for Materials Science* (pp. 231–262). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-44452792-9.50010-5>
- Plieth, W. (2008b). Nucleation and Growth of Metals. In *Electrochemistry for Materials Science* (pp. 195–229). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-44452792-9.50009-9>
- Schwenke, H., Neuschaefer-Rube, U., Pfeifer, T., & Kunzmann, H. (2002). Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering. *CIRP Annals*, 51(2), 685–699. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61707-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61707-7)
- Walczak, D., Krolczyk, J. B., Chudy, R., Gupta, M. K., Pruncu, C., & Krolczyk, G. M. (2023). Role of optical measurement systems in analysing the surface topography of an industry standard component. *Optik*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.170919>
- Zygo corporation. (1993). *Interferogram interpretation and evaluation handbook* (Fourth edition).