




Revisión de nitruración en aleación INCONEL 718

Royner Alexander Medina Salas ^{1,*}, Oriana Palma Calabokis ², and Richard Giovanni Avella Sarmiento ³

¹Ingeniero Aeronáutico, Fundación Universitaria Los Libertadores

²Estudiante de Doctorado en Ingeniería de Materiales y Mecánica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil

³Profesor investigador en Ingeniería Aeronáutica, Fundación Universitaria Los Libertadores

*Autor de correspondencia: ramedinas01@libertadores.edu.co.



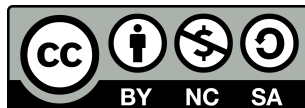
Facultad de Ingeniería y
Ciencias Básicas



Recibido: 4 de julio de 2023

Aceptado: 4 de agosto de 2023

Publicado: 24 de noviembre de 2023



Copyright: ©2023 por los autores. Este artículo es de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de Creative Commons Licencia de atribución (CC BY NC SA)
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

Resumen

(i) **Introducción:** El material Inconel 718 es una aleación de níquel de alta resistencia mecánica y a la corrosión, ampliamente utilizado en aplicaciones industriales exigentes, como la industria aeroespacial y la generación de energía. Sin embargo, mejorar aún más las propiedades superficiales de este material es crucial para maximizar su rendimiento en entornos agresivos. La nitruración se presenta como una técnica prometedora para lograr este objetivo.

(ii) **Materiales y metodología:** En este artículo de revisión bibliográfica, se analiza en detalle el proceso de nitruración del material Inconel 718, entre otros. Se examinan los diferentes métodos de nitruración utilizados, como la nitruración gaseosa, la nitruración por plasma, la nitruración líquida y la nitruración iónica, junto con los parámetros clave que influyen en el resultado del proceso. Se discuten los beneficios y las limitaciones de la nitruración en las propiedades de la superficie del material, como la dureza, la resistencia al desgaste y la resistencia a la corrosión. El levantamiento bibliográfico se realizó consultando en las bases de datos Google Scholar, Scopus y Web of Science.

(iii) **Resultados:** En resumen, este artículo de revisión ofrece una visión completa de los diferentes tratamientos de nitruración de la aleación Inconel 718, destacando su importancia para mejorar las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión de la superficie y su relevancia en aplicaciones industriales. Los hallazgos y las recomendaciones presentadas en este artículo servirán como una guía útil para investigadores, ingenieros y profesionales involucrados en el desarrollo y la aplicación de la nitruración en el material Inconel 718.

Palabras clave: Aleaciones de níquel, Inconel 718, nitruración, dureza, corrosión

Como citar este artículo

Royner Medina, Oriana Palma and Richard Avella. "Revisión de nitruración en aleación INCONEL 718", *Revista Apuntes de Ciencia e Ingeniería*, 2, 1, nov, pag 5-10. 2023. doi: [10.37511/apuntesci.v2n1a2](https://doi.org/10.37511/apuntesci.v2n1a2)

1. Introducción

El INCONEL 718 (UNS NO7718: IN 718) es una superaleación austenítica de níquel-cromo endurecida por precipitación [1]. Se utiliza comúnmente en las industrias aeroespacial, aeronáutica, petrolera y del gas [2–4]. Estas aleaciones suelen operar en condiciones severas que implican altas presiones, rangos de temperatura entre -250 y 750 °C, y ambientes corrosivos [1,2,5]. La aleación IN 718 tiene una buena resistencia a la corrosión [2], sin embargo, presenta un bajo rendimiento frente al desgaste, lo que limita su aplicación en diferentes áreas de la industria [3].

La nitruración por plasma se ha establecido desde hace varios años como un método exitoso de ingeniería de superficies [4]. Su objetivo es la modificación de las superficies de las aleaciones metálicas mediante la introducción de nitrógeno, principalmente para mejorar su rendimiento tribológico. Cuando se trata a bajas temperaturas, puede formarse una capa dura de solución sólida intersticial sobresaturada (conocida como austenita expandida con nitrógeno γN o fase S) en la superficie de aceros inoxidable [8–12] y aleaciones de Ni-Cr [1,3,6,7,13–15]. Esta fase mejora significativamente el comportamiento frente al desgaste sin deteriorar (y a veces incluso mejorar) la resistencia frente a la corrosión [1,3–8,13–16]. En comparación con la abundancia de estudios sobre la nitruración en aceros inoxidables, la investigación sobre la nitruración en aleaciones de Inconel es escasa y reciente. La nitruración por plasma es un método aplicado recientemente en aleaciones de Inconel.

Interpretación y discusión de los resultados: Los hallazgos y conclusiones de los estudios revisados se interpretaron y discutieron en el contexto de los objetivos de investigación. Se identificaron posibles explicaciones, mecanismos y factores influyentes relacionados con la nitruración del material Inconel 718. Se generaron ideas y perspectivas adicionales basadas en la información recopilada.

Documentación y redacción del artículo: Se redactó un artículo de revisión que resume de manera clara y concisa la información investigada sobre la nitruración del material Inconel 718. Se incluyeron secciones como introducción, metodología, resultados, discusión y conclusiones, que presentan de manera organizada y coherente los hallazgos y conclusiones obtenidos de la revisión de la literatura.

2. Metodología

La metodología de investigación no experimental utilizada en este estudio se basó en una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre la nitruración del material Inconel 718. A continuación, se describe el enfoque metodológico:

Identificación y recopilación de fuentes de información: Se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos académicas y científicas (Google Scholar, Scopus y Web of Science) relevantes para identificar estudios, investigaciones y revisiones relacionadas con la nitruración de la aleación Inconel 718. Se utilizaron las palabras claves (“INCONEL”, “718”, “NITRIDING”, “WEAR”, “CORROSION”, “HARDNESS”) y criterios de inclusión/exclusión específicos para seleccionar las fuentes más relevantes.

Evaluación de la calidad de la información: Se aplicaron criterios de calidad para evaluar la relevancia y confiabilidad de las fuentes recopiladas. Se consideraron aspectos como la reputación de las publicaciones y la rigurosidad de los estudios revisados. Se excluyeron aquellas fuentes que no cumplieran con los estándares de calidad establecidos.

Análisis y síntesis de la información: Se realizó una revisión exhaustiva de los estudios seleccionados, extrayendo y organizando los hallazgos, conclusiones y recomendaciones más relevantes sobre la nitruración del material Inconel 718. Se identificaron patrones, tendencias y brechas en la literatura, las cuales fueron resumidas en formato de tabla.

Interpretación y discusión de los resultados: Los hallazgos y conclusiones de los estudios revisados se interpretaron y discutieron en el contexto de los objetivos de investigación. Se identificaron posibles explicaciones, mecanismos y factores influyentes relacionados con la nitruración del material Inconel 718. Se generaron ideas y perspectivas adicionales basadas en la información recopilada.

Documentación y redacción del artículo: Se redactó un artículo de revisión que resume de manera clara y concisa la información investigada sobre la nitruración del material Inconel 718. Se incluyeron secciones como introducción, metodología, resultados, discusión y conclusiones, que presentan de manera organizada y coherente los hallazgos y conclusiones obtenidos de la revisión de la literatura.



3. Resultados

En la Tabla 1 se resumen los estudios existentes sobre diversos métodos de nitruración en la aleación IN 718. Los estudios [5] y [6] se realizaron en IN 740H e IN 625, respectivamente, y se agregaron a la Tabla 1 con fines comparativos. Esta tabla proporciona una visión general de los principales métodos de nitruración, parámetros de proceso, propiedades superficiales mejoradas y aplicaciones industriales relevantes. Al presentar la información de manera estructurada y accesible, se facilita la identificación de las características clave de la nitruración en el Inconel 718 y su potencial impacto en diversas industrias. La tabla constituye una herramienta valiosa para aquellos interesados en obtener una visión rápida y comparativa de los aspectos fundamentales relacionados con la nitruración de este material.

Tabla 1: Resumen de la nitruración del material Inconel 718: Métodos, parámetros de proceso, propiedades superficiales y aplicaciones industriales.

Ref.	Proceso de nitruración		Resultados
[17]	PN: Nitruración a Plasma T: 550 to 750°C P: 8 mbar/ 6 Torr t: 1 a 16 h %: N ₂ :H ₂ ; 1:1, 1:3, 3:1, and 9:1 M: IN 718	L,X	La capa de nitruro (compuesta por CrN) sigue un crecimiento parabólico controlado por difusión ($8 - 9,5\mu$).
		H	La dureza aumentó aproximadamente tres veces después de todos los tratamientos de nitruración.
		R	Se observó un aumento en la rugosidad con la temperatura ($Ra = 0,35 - 0,85$) después de la nitruración.
		W	(Ensayo de desgaste en seco tipo pin-on-disk) - La capa de nitruro redujo el coeficiente de fricción (CoF) en 3.7 veces. Se observó un aumento del volumen de desgaste de hasta un 60% en las muestras nitretadas, atribuido a la fractura y separación del sustrato.
[13]	PN: Procesamiento asistido por plasma intensificado (IPAP). T: 450 y 490°C P: 50 mTorr t: 3 h %: N ₂ :Ar; 4:1 V: -1000 V M: IN 718	L,X	La capa superficial consiste en una capa nitrurada única ($\sim 4\mu$) seguida de una zona de difusión ($\sim 25\mu$).
		H	Composición de la capa nitrurada: $\gamma N + CrN + \gamma$. La dureza aumentó aproximadamente 4 veces después de la nitruración.
		R	La rugosidad aumentó aproximadamente 6.5 veces (Ra) después de la nitruración.
		W	(Ensayo de desgaste en seco tipo pin-on-disk). El coeficiente de fricción promedio para la aleación sin tratamiento y la aleación nitrurada es comparable, pero esta última mostró una mejora tremenda en la resistencia al desgaste.
		C	Potencial de circuito abierto (OCP): 0.1 N NaCl. El mayor potencial del IN 718 nitrurado (+200 mV vs -25 mV para el no tratado) sugiere que la nitruración IPAP a 450°C tiene un efecto beneficioso en la resistencia a la corrosión.
[16]	PN: Nitruración en Plasma de corriente continua (DC) T: 400, 500 y 600°C P: 500 Pa\ / 3.75 Torr t: 1 y 4 h %: N ₂ :H ₂ ; 1:1 V: 500 V M: IN 718	L,X	El aumento del grosor de la capa de nitruro (compuesta únicamente por CrN) varía desde 3.5 hasta 7 μ m con el aumento de la temperatura y el tiempo de tratamiento. El tiempo resultó ser más efectivo para el aumento del espesor.
		H	La dureza aumentó de 2.3 a 5.5 veces con el incremento del tiempo y la temperatura de tratamiento.
		R	Hubo un aumento de Ra desde 1.7 hasta 5.8 veces. (Ensayo de desgaste en seco tipo pin-on-disk)
		W	- El coeficiente de fricción (CoF) también disminuyó con el aumento de la dureza. Las muestras no tratadas mostraron la mayor tasa de desgaste, la cual disminuye con el aumento del tiempo y la temperatura de nitruración.



Ref.	Proceso de nitruración		Resultados
[6]	PN: Nitruración en baño de sales: sales fundidas (M ₂ CO ₃ : M: K, Na, etc.), (CO(NH ₂) ₂) y otros componentes traza. T: 425 hasta 500°C T: 4 a 16 h M: IN 718	L,X H W,C	Los espesores de las capas variaron con el aumento del tiempo y la temperatura de tratamiento, desde 1 hasta 25 μ m. En los tratamientos a 425 y 450°C, la capa estaba compuesta por γ N. A temperaturas más altas, en los tratamientos a 475 y 500°C, la capa estaba compuesta por γ N + CrN. Se observó un aumento en la dureza en función del tiempo y la temperatura, con valores que variaron de 1.5 a 5.25 veces. (Erosión-corrosión: 3.5 % NaCl + 5 v % H ₂ SO ₄ + Al ₂ O ₃) - Se observó una disminución en la pérdida de masa (hasta un 77 %) en las muestras nitruradas hasta 475°C. El tratamiento a 500°C aumentó la pérdida de masa de 1.5 a 3.25 veces.

4. Conclusiones

La aplicación de mejoras propuestas en el proceso de confección de camisetas de ciclismo puede reducir el tiempo productivo, minimizar la acumulación de trabajo, tiempos muertos, control de accidentes laborales, entre otros; adicional la redistribución de puestos de trabajo garantizará una disminución en los tiempos de ocio que se evidenciaron en el análisis del problema de la causa de cuello de botella, por ello es oportuno que desde la gerencia de la empresa se divulguen a los empleados los resultados del presente estudio, lo anterior permitirá que el equipo de trabajo conozca los objetivos de la organización.

Además, la utilización de diagramas de flujo en la estandarización de los tiempos y la definición del proceso de producción de camisetas de ciclismo puede proporcionar una rápida interpretación de cada actividad y cómo están relacionadas con las demás, lo que puede ofrecer beneficios en la optimización del proceso. De igual forma el diagrama de recorrido identifica de forma lógica la interacción de los procedimientos de la organización, permitiendo a la alta gerencia de la empresa identificar las opciones de mejora, e implementar planes de mejora continua respecto a estos diagramas, a través de ello y apoyado en el estudio y análisis del proceso de producción de camisetas de ciclismo se pueden identificar oportunidades de mejora, como la disminución de tiempos de ocio, la reducción de carga física en los trabajadores, la eliminación de tareas repetitivas y la disminución de cuellos de botella.

Finalmente, la determinación del número de operadores necesarios y el cálculo del tiempo de producción para cada producto dentro del límite de tiempo permite recopilar las acciones correctivas que intervienen para cada tarea de manera lógica y consistente, de igual manera la distribución de líneas de ensamble puede ser una herramienta valiosa para mejorar la eficiencia y la calidad del proceso de producción de camisetas de ciclismo, lo que puede resultar en un producto final de mayor calidad y una mayor rentabilidad para el negocio.

Agradecimientos

Los autores de este artículo agradecen a la empresa Hyf SPORT y sus colaboradores que permitieron el desarrollo de la investigación.

Referencias

- [1] H. Zhang, H. Qin, Z. Ren et al., «Low-temperature nitriding of nanocrystalline Inconel 718 alloy,» *Surface and Coatings Technology*, vol. 330, págs. 10-16, dic. de 2017, issn: 0257-8972. doi: [10.1016/j.surfcoat.2017.09.040](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.09.040). dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.09.040>.
- [2] Y. Jing, W. Jun, G. Tan, X. Ji y F. Hongyuan, «Phase Transformations during Low Temperature Nitrided Inconel 718 Superalloy,» *ISIJ International*, vol. 56, n.º 6, págs. 1076-1082, 2016, issn: 1347-5460. doi: [10.2355/isijinternational.isijint-2015-697](https://doi.org/10.2355/isijinternational.isijint-2015-697). dirección: <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-697>.



- [3] A. Maniee, F. Mahboubi y R. Soleimani, «Improved Hardness, Wear and Corrosion Resistance of Inconel 718 Treated by Hot Wall Plasma Nitriding,» *Metals and Materials International*, vol. 26, n.º 11, págs. 1664-1670, oct. de 2019, ISSN: 2005-4149. DOI: [10.1007/s12540-019-00476-z](https://doi.org/10.1007/s12540-019-00476-z). dirección: <http://dx.doi.org/10.1007/s12540-019-00476-z>.
- [4] F. Borgioli, «The “Expanded” Phases in the Low-Temperature Treated Stainless Steels: A Review,» *Metals*, vol. 12, n.º 2, pág. 331, feb. de 2022, ISSN: 2075-4701. DOI: [10.3390/met12020331](https://doi.org/10.3390/met12020331). dirección: <http://dx.doi.org/10.3390/met12020331>.
- [5] M. Kopec, D. Gorniewicz, D. Kukla et al., «Effect of plasma nitriding process on the fatigue and high temperature corrosion resistance of Inconel 740H nickel alloy,» *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 22, n.º 1, ene. de 2022, ISSN: 2083-3318. DOI: [10.1007/s43452-022-00381-0](https://doi.org/10.1007/s43452-022-00381-0). dirección: <http://dx.doi.org/10.1007/s43452-022-00381-0>.
- [6] D. A. Skobir Balantic, C. Donik, B. Podgornik, A. Kocijan y M. Godec, «Improving the surface properties of additive-manufactured Inconel 625 by plasma nitriding,» *Surface and Coatings Technology*, vol. 452, pág. 129130, ene. de 2023, ISSN: 0257-8972. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2022.129130](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129130). dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129130>.
- [7] A. Kruk, A. M. Wusatowska-Sarnek, M. Zietara, K. Jemielniak, Z. Siemiatkowski y A. Czyska-Filemonowicz, «Characterization on White Etching Layer Formed During Ceramic Milling of Inconel 718,» *Metals and Materials International*, vol. 24, n.º 5, págs. 1036-1045, mar. de 2018, ISSN: 2005-4149. DOI: [10.1007/s12540-018-0056-0](https://doi.org/10.1007/s12540-018-0056-0). dirección: <http://dx.doi.org/10.1007/s12540-018-0056-0>.
- [8] G. Mondragón-Rodríguez, N. Torres-Padilla, N. Camacho et al., «Surface modification and tribological behavior of plasma nitrided Inconel 718 manufactured via direct melting laser sintering method,» *Surface and Coatings Technology*, vol. 387, pág. 125526, abr. de 2020, ISSN: 0257-8972. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2020.125526](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125526). dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125526>.
- [9] L. Xue, J. Wang, L. Li, G. Chen, L. Sun y S. Yu, «Enhancement of wear and erosion-corrosion resistance of Inconel 718 alloy by liquid nitriding,» *Materials Research Express*, vol. 7, n.º 9, pág. 096510, sep. de 2020, ISSN: 2053-1591. DOI: [10.1088/2053-1591/abb426](https://doi.org/10.1088/2053-1591/abb426). dirección: <http://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/abb426>.
- [10] Y. E. Núñez de la Rosa, O. Palma Calabokis, P. C. Borges y V. Ballesteros Ballesteros, «Effect of Low-Temperature Plasma Nitriding on Corrosion and Surface Properties of Duplex Stainless Steel UNS S32205,» *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 29, n.º 4, págs. 2612-2622, abr. de 2020, ISSN: 1544-1024. DOI: [10.1007/s11665-020-04753-6](https://doi.org/10.1007/s11665-020-04753-6). dirección: <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-020-04753-6>.
- [11] O. Palma Calabokis, Y. Núñez de la Rosa, C. M. Lepienski, R. Perito Cardoso y P. C. Borges, «Crevice and pitting corrosion of low temperature plasma nitrided UNS S32750 super duplex stainless steel,» *Surface and Coatings Technology*, vol. 413, pág. 127095, mayo de 2021, ISSN: 0257-8972. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2021.127095](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127095). dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127095>.
- [12] A. Fossati, F. Borgioli, E. Galvanetto y T. Bacci, «Corrosion resistance properties of glow-discharge nitrided AISI 316L austenitic stainless steel in NaCl solutions,» *Corrosion Science*, vol. 48, n.º 6, págs. 1513-1527, jun. de 2006, ISSN: 0010-938X. DOI: [10.1016/j.corsci.2005.06.006](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.06.006). dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2005.06.006>.
- [13] Y. Núñez, M. Mafra, R. E. Morales, P. C. Borges y G. Pintaude, «The effect of plasma nitriding on the synergism between wear and corrosion of SAF 2205 duplex stainless steel,» *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 72, n.º 9, págs. 1117-1122, feb. de 2020, ISSN: 0036-8792. DOI: [10.1108/ILT-08-2019-0302](https://doi.org/10.1108/ILT-08-2019-0302). dirección: <http://dx.doi.org/10.1108/ILT-08-2019-0302>.
- [14] V. Singh y E. I. Meletis, «Synthesis, characterization and properties of intensified plasma-assisted nitrided superalloy Inconel 718,» *Surface and Coatings Technology*, vol. 201, n.º 3-4, págs. 1093-1101, oct. de 2006, ISSN: 0257-8972. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2006.01.034](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.01.034). dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.01.034>.
- [15] X. Tao, J. Kavanagh, X. Li, H. Dong, A. Matthews y A. Leyland, «An investigation of precipitation strengthened Inconel 718 superalloy after triode plasma nitriding,» *Surface and Coatings Technology*, vol. 442, pág. 128401, jul. de 2022, ISSN: 0257-8972. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2022.128401](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128401). dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128401>.



- [16] H. Kovací, H. Ghahramanzadeh ASL, u. Albayrak, A. Alsaran y A. undefinedelik, «Effect of Plasma Nitriding Parameters on the Wear Resistance of Alloy Inconel 718,» *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 58, n.º 7-8, págs. 470-474, nov. de 2016, ISSN: 1573-8973. DOI: [10.1007/s11041-016-0037-1](https://doi.org/10.1007/s11041-016-0037-1). dirección: <http://dx.doi.org/10.1007/s11041-016-0037-1>.
- [17] P. Aw, A. Batchelor y N. Loh, «Structure and tribological properties of plasma nitrided surface films on Inconel 718,» *Surface and Coatings Technology*, vol. 89, n.º 1-2, págs. 70-76, feb. de 1997, ISSN: 0257-8972. DOI: [10.1016/S0257-8972\(96\)02937-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(96)02937-4). dirección: [http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972\(96\)02937-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972(96)02937-4).
- [18] F. Bottoli, M. S. Jellesen, T. L. Christiansen, G. Winther y M. A. Somers, «High temperature solution-nitriding and low-temperature nitriding of AISI 316: Effect on pitting potential and crevice corrosion performance,» *Applied Surface Science*, vol. 431, págs. 24-31, feb. de 2018, ISSN: 0169-4332. DOI: [10.1016/j.apsusc.2017.06.094](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.094). dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.094>.

