

## ¿Qué es la nitruración? Breve panorama sobre el proceso termoquímico

### What is nitriding? A brief overview of this thermochemical treatment

Roberto C. Verga Morón <sup>a</sup>, Fortino F. Estrada Martínez <sup>b</sup>, Lizbeth Melo Máximo <sup>c</sup>

#### Abstract:

The aim of this paper is to explain what is the nitriding thermochemical treatment. This process is applied to metallic materials, especially steels, which are used in various industries and an increased durability is sought. Likewise, different procedures of nitriding that are currently developed in the industry are briefly presented, as well as the properties that this process provides and some particular applications.

#### Keywords:

Surface engineering, coatings, nitriding, thermochemical treatments.

#### Resumen:

El presente trabajo tiene el propósito de explicar qué es el tratamiento termoquímico de nitrurado. Este proceso se aplica en materiales metálicos, especialmente aceros, que son empleados en diversas industrias y se busca impartirles un mayor tiempo de vida. Asimismo, se exponen de manera breve las diferentes variantes del nitrurado que actualmente se desarrollan en la industria, así como las propiedades que este proceso aporta y algunas aplicaciones particulares.

#### Palabras Clave:

Ingeniería de superficies, recubrimientos, nitruración, tratamientos termoquímicos.

### Introducción

En la ingeniería de superficies existen diversos métodos que permiten modificar la superficie de distintos materiales con el fin de mejorar sus propiedades físicas y químicas. Una vez realizada una modificación superficial, los materiales presentan una mayor resistencia al desgaste o a la corrosión, por mencionar algunas ventajas. Entre los diversos procesos que se pueden llevar a cabo para modificar la superficie de un material, están los procesos termoquímicos; y dentro de éstos, se encuentra la nitruración (o nitrurado) en sus diversas variantes. Este tratamiento produce capas internas en los materiales que son procesados mediante esta técnica.

El origen del proceso de nitrurado es interesante, pues a

pesar de que una persona es comúnmente acreditada como su creadora, hay algo menos conocido, pero fundamental. A comienzos del siglo XX, Adolph Machlet, ingeniero metalúrgico estadounidense, y que trabajaba en American Gas Company, descubrió que el nitrógeno, proveniente de la descomposición del amoníaco junto con hidrógeno usado como diluyente, endurecía la superficie de algunos aceros sin llegar a altas temperaturas ni enfriamientos precipitados. Por eso, en 1908 solicitó la primera patente del proceso de nitrurado, la cual fue concedida hasta 1913. Sin embargo, el trabajo de Machlet pasó desapercibido y su contribución fue poco reconocida históricamente.

Por otro lado, de manera paralela, el alemán Adolph Fry

<sup>a</sup> Autor de Correspondencia, Tecnológico Nacional de México | IT de Tlalnepantla | Estado de México | México, <https://orcid.org/0000-0003-4772-7904>, Email: roberto.vm@tlalnepantla.tecnm.mx

<sup>b</sup> Tecnológico Nacional de México | IT de Tlalnepantla | Estado de México | México, <https://orcid.org/0000-0003-2909-9473>, Email: d21254102@tlalnepantla.tecnm.mx

<sup>c</sup> Tecnológico Nacional de México | IT de Tlalnepantla | Estado de México | México, <https://orcid.org/0000-0002-7081-0661>, Email: lizbeth.mm@tlalnepantla.tecnm.mx

lideró desde 1906 un programa de investigación en Krupp Steel Works (en Essen, Alemania), desarrollando una variante de la nitruración basada en la descomposición del amoníaco sin empelar hidrógeno como diluyente. En 1924 obtuvo la patente de su proceso, conocido como nitruración gaseosa en una sola etapa. Es así que, aunque Fry es comúnmente reconocido como el pionero de la nitruración, fue Machlet quien realmente sentó las bases del proceso (Pye, D., 2003)

Ahora bien, una vez expuesto el origen histórico del proceso, es pertinente explicar que el nitrurado es un tratamiento termoquímico, el cual corresponde a un proceso que requiere incrementar la temperatura a la que se expone un material, típicamente un acero en este caso, que está inmerso o rodeado de un ambiente rico en algún elemento químico, como carbono, boro, o nitrógeno en este caso. La energía térmica proporcionada permite que los átomos del elemento en cuestión puedan introducirse, o *difundirse* si se usa el término técnico, en la superficie del material, alterando su composición química. Como tal, la nitruración se comenzó a implementar en el primer cuarto del siglo XX (Somers y Christiansen, 2022), pues se observó que el nitrógeno fragilizaba a los aceros.

Entonces, la nitruración es un proceso termoquímico generado mediante la difusión de átomos de nitrógeno al interior de un material metálico (Figura 1), es decir, por los bordes o límites de grano. Ahí se forman compuestos llamados nitruros de hierro, que pueden presentar distintas estructuras, como la fase gamma prima  $\gamma'$  ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ) y la épsilon  $\epsilon$  ( $\text{Fe}_2\text{N}$  o  $\text{Fe}_3\text{N}$ ). Durante el proceso se generan dos zonas modificadas las cuales se identifican como: zona exterior también conocida como capa de compuestos o capa blanca (formada por nitruros de hierro) y una zona interior llamada zona de difusión, formada por compuestos de nitrógeno con otros elementos que forman parte del acero. Los espesores de estas zonas dependen del método por el cual se realice la nitruración, así como de la temperatura y tiempo del proceso. Dentro de la zona de difusión se pueden observar “agujas” de nitruros de hierro ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ), como se observa en la Figura 2. La nitruración se lleva a cabo a temperaturas no mayores a  $590\text{ }^\circ\text{C}$  dependiendo del método usado, y comúnmente se obtienen capas de nitruros de entre  $5$  y  $30\text{ }\mu\text{m}$  (Murali et al., 2023).



Figura 1. Esquema de la difusión del nitrógeno al interior del material.

### Clasificación de los procesos de nitruración

La nitruración se puede llevar a cabo en cualquiera de los cuatro estados de la materia, es decir, sólida, líquida, gaseosa y por plasma (iónica) (Dong, 2003), como lo muestra la Figura 3. Algunos de estos métodos son amigables con el medio ambiente ya que no generan gases o residuos peligrosos que sean nocivos para la salud y el medio ambiente.

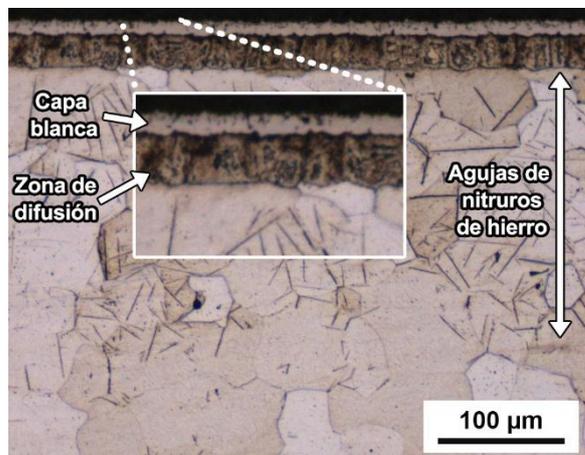


Figura 2. Hierro puro nitrurado a) capa blanca, b) Zona de difusión y c) Agujas de nitruros de hierro ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ).

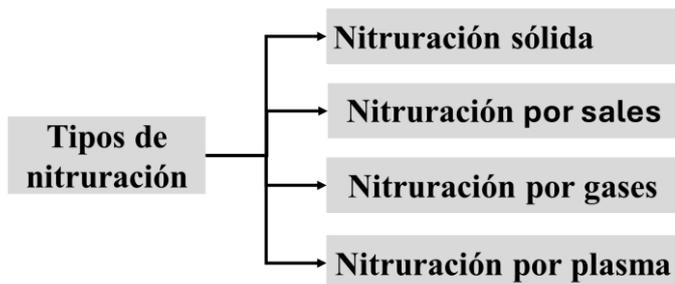


Figura 3. Clasificación de los procesos de nitruración.

### Nitruración sólida

La nitruración sólida consiste en la difusión de nitrógeno al interior de los materiales empleando compuestos en forma de polvos típicamente. Dichos polvos están conformados por hierro y cianuros (ferrocianuros), los cuales se colocan en un recipiente completamente sellado, cubriendo por completo la muestra a nitrurar; luego la temperatura es elevada a 560 °C aproximadamente (dos Santos de Almeida et al., 2015a). Al aumentar la temperatura se produce una reacción química, la cual comienza a difundir el nitrógeno al interior del metal, generando una capa blanca y una zona de difusión (Figura 4), estas zonas son las que proporcionan una mayor dureza a la superficie de la muestra tratada.

La nitruración sólida no es una técnica muy común, debido a que no es muy eficiente, pues se requieren tiempos extendidos de proceso, y tampoco es muy amigable con el ambiente, por los residuos que genera. Por eso se emplean otras técnicas de nitruración más comunes y comerciales.

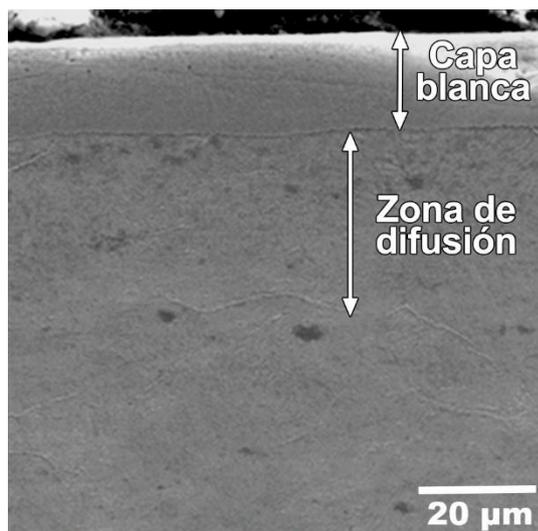


Figura 4. Micrografía de un acero H13 por nitruración sólida (dos Santos de Almeida et al., 2015b).

### Nitruración por sales

En esta variante, el mecanismo de difusión del nitrógeno hacia el interior del material se genera debido a la disolución de sales a temperaturas elevadas (550 a 570 °C), que se encuentran en contenedores en los que se sumerge la pieza por cierto tiempo de exposición; las sales que se emplean, con mayor frecuencia, son cianuros y nitruros de potasio, siendo este último el menos contaminante. En la Figura 5 se muestra una micrografía característica de esta variante.

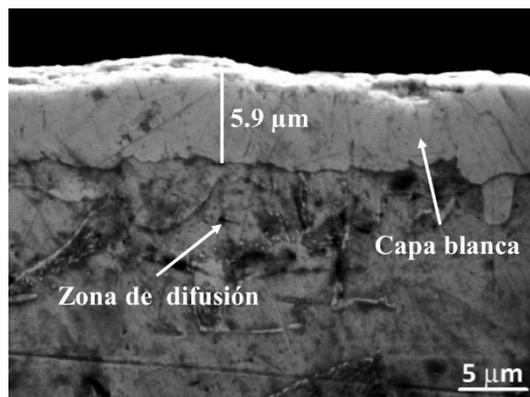


Figura 5. Capa nitrurada por sales (Bonow et al., 2021).

Debido a que las sales empleadas en este proceso son tóxicas, y de acuerdo con las actuales leyes ambientales que rigen en la industria, el uso de esta técnica ha disminuido. Aunque también, algunas investigaciones se han dado a la tarea de reemplazar este tipo de sales por algunas que no sean tan tóxicas al medio ambiente, como el nitrato de potasio.

### Nitruración gaseosa

Esta variante se lleva a cabo a temperaturas elevadas y presiones controladas, llevándose a cabo en un reactor de atmósfera controlada, como el mostrado en la Figura 6. El proceso generalmente emplea amoníaco o una mezcla de amoníaco y nitrógeno o hidrógeno. La temperatura del proceso se encuentra entre los 495 y 565 °C, a la cual el amoníaco reacciona separando el nitrógeno, el cual se difunde hacia el interior del material, formando  $\gamma'$ , y conforme la concentración de nitrógeno incrementa, se produce la fase  $\epsilon$  (Nguyen et al., 2019). En la Figura 7 se muestra una micrografía típica del proceso, en la cual se observan las dos zonas características, la combinación de estas capas proporciona al sustrato mejores propiedades (Zhou, 2023).



Figura 6. Reactor de nitruración por gaseosa (Cambridge Heat Treating Inc, s.f.).

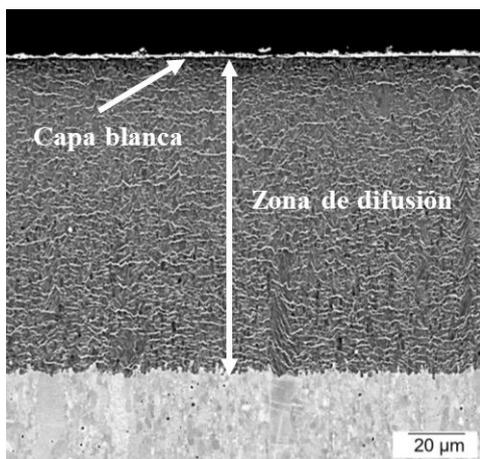


Figura 7. Capa nitrurada por gases a diferentes tiempos (Ngoc et al., 2020).

### Nitruración iónica o por plasma

La nitruración por plasma es un proceso que se realiza a presiones de 0.1 a 1 kPa (Aghajani, 2017) y temperaturas de 340 a 590 °C; este método permite la nitruración de piezas complejas, aunque se presentan algunas limitantes en cuanto a la forma de las piezas (por ejemplo, en orificios). Además, mediante esta variante se evita la alteración en las dimensiones de las piezas, debido a las bajas temperaturas a las cuales se puede llevar a cabo. Este procedimiento es amigable con el ambiente ya que no emite contaminantes.

En esta variante se emplea gas nitrógeno que es ionizado al aplicar una carga eléctrica, esto permite la difusión hacia el interior del sustrato; con la adición de hidrógeno a la mezcla de gases, es posible reducir la oxidación de las capas en la superficie (Bourhis, 2023). La ionización de los gases provoca la iluminación de la pieza, lo que indica que el proceso está en marcha (Mitsuhiro Hirano, 2025). En la Figura 8 se observa una micrografía característica, como en otras variantes, la capa está compuesta de una capa de nitruros y una zona de difusión.

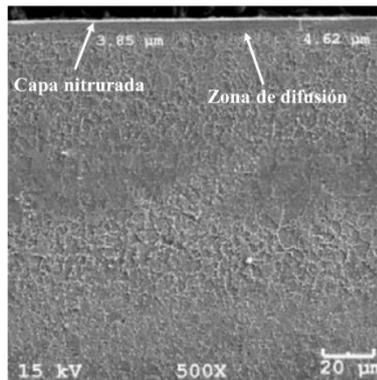


Figura 8. Sustrato nitrurado por plasma (Elisangela Aparecida dos Santos de Almeida, 2015).

### Propiedades que aporta la nitruración

La nitruración en sus diversas variantes proporciona una mejora en sus propiedades mecánicas a los materiales procesados por estos métodos. Principalmente aporta un incremento en la dureza superficial, mejora en su resistencia al desgaste, optimiza el comportamiento del coeficiente de fricción, aumenta la resistencia a la fatiga, e incrementa la resistencia a la corrosión en algunos casos (Dearnley, 2017).

### Aceros que pueden ser nitrurados

La nitruración se puede aplicar a una gran variedad de aceros y algunas otras aleaciones, la Tabla 1 muestra solo algunos de los materiales que pueden ser sometidos a este tratamiento termoquímico.

Tabla 1. Aceros que pueden ser sometidos a nitruración.

Materiales	Ejemplo
Aceros grado herramienta	H13, D2, O1, P20
Aceros inoxidables	316, 304, 430
Aceros al carbono	1010, 1018, 1020, A36
Aceros aleados	4140, 8620
Aleaciones de titanio	Ti6Al4V

### Ventajas y aplicaciones

Debido a las características favorables que se mencionaron antes, el proceso de nitrurado puede aplicarse en diferentes áreas de la ingeniería, como la automotriz, aeroespacial, petroquímica, entre otras; en todas estas áreas se requieren componentes con un mayor tiempo de vida, para reducir el impacto de su reparación, reemplazo, y el impacto ambiental al ser finalmente desechados.

Como se ha descrito hasta aquí, la nitruración es un proceso que se aplica en diversas piezas que son

sometidas a trabajos que requieren una elevada resistencia al desgaste. Un ejemplo común de la aplicación de este proceso es en la fabricación de cigüeñales (Figura 9), los cuales están sometidos a una fricción constante y a temperaturas elevadas, y al ser nitrurados se busca un mayor tiempo de vida útil. Además, otros casos particulares de aplicación son en dados de extrusión, dados para forja, moldes de inyección, engranes; todos estos son componentes que actúan bajo condiciones tribológicas demandantes, y por tanto se requiere de una mayor resistencia al desgaste.

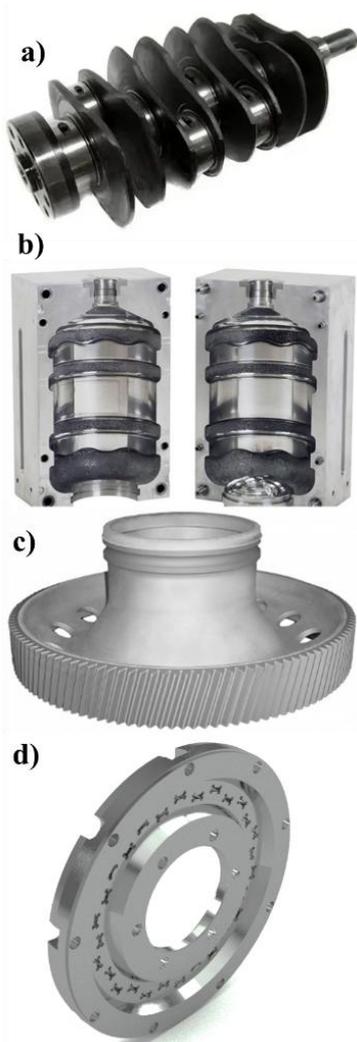


Figura 9. a) Cigüeñal (Adracing, s.f.); b) molde de inyección de plástico (Servicios Cohego, s.f.); c) engranaje (Nitrex, s.f.); d) dado para extrusión (Industrias HD S.A.S., s.f.).

## Retos y perspectivas hacia el futuro

En la actualidad, los procesos industriales deben satisfacer demandas sobre sustentabilidad y reducción del impacto ambiental. Por eso, se han tenido que buscar soluciones para actualizar ciertos procesos, como el de nitrurado en sales, donde se han empleado sales no tóxicas con buenos resultados de crecimiento de la capa de nitruros.

Por otro lado, el nitrurado por plasma se ha posicionado como la alternativa más amigable con el ambiente, debido a su menor impacto ambiental porque no genera residuos contaminantes, a comparación de otras variantes. Asimismo, se tiene un menor consumo de gases y tiempos más cortos de proceso, lo que significa menor consumo energético. Sin embargo, la necesidad de contar con equipos más especializados y costosos para poder realizarlo, así como la dificultad para recubrir geometrías complejas, permanecen como retos pendientes.

Finalmente, el tratamiento de nitrurado puede combinarse con otros procesos de modificación superficial para obtener sistemas dúplex o multicomponentes, los cuales permitirán responder las cada vez mayores exigencias para eficientar el desempeño de componentes en diversas industrias, además de contribuir a generar menos desechos por reemplazo de componentes al extender su vida útil; estas prácticas se relacionan con los principios de manufactura y tribología verde, que pueden ser explorados en otro trabajo. Así pues, lo anterior permite intuir que la versatilidad del tratamiento de nitrurado, en sintonía con las actuales exigencias ambientales, permitirán mantener la importancia de este tratamiento dentro de los procesos de ingeniería de superficies.

## Conclusiones

El nitrurado es un tratamiento termoquímico en el que átomos de nitrógeno se introducen en la superficie de un material, alterando la composición química de la superficie, y otorgando beneficios como aumento en la dureza y resistencia al desgaste, entre otros. Es posible controlar el crecimiento de las capas nitruradas formadas en la superficie del material, mediante la regulación del tiempo de proceso y la temperatura a la que se lleve a cabo. Independientemente de la variante de nitruración, con ese proceso se generan las fases  $\epsilon$  ( $Fe_{2-3}N$ ) y  $\gamma'$  ( $Fe_4N$ ), y la estructura de la capa está compuesta por una zona de compuestos o capa blanca, y por debajo de ésta, la zona de difusión. Este tratamiento tiene aplicaciones en diversas industrias, y se vislumbra que continuará

siendo utilizado debido a su versatilidad y confianza en su desempeño.

services/processes/modern-surface-treatments-processes/gas-nitriding-nitreg-2/

## Referencias

- Adracing (s.f.). Motor crankshaft. <https://www.adracingtech.com/product/Adracing-Performance-Billet-4340-Steel-Subaru-20L-BRZ-Scion-FRS-FA20-Engine-Crankshaft.html>
- Aghajani, H. y Behrangi, S. (2017). Radiofrequency (RF) Plasma Nitriding. En *Plasma Nitriding of Steels* (pp. 161-181). Springer.
- Bonow, V. T., Maciel, D. S., Fenner, N. L., Reguly, A., Zimmer, A., y Zimmer, C. G. (2021). Nitriding in non-toxic salts bath: An approach to implement cleaner production in the metallurgic industry. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100169. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100169>
- Cambridge Heat Treating Inc (s.f.). ZeroFlow Gas Nitriding. <https://cambridgeheattreating.com/zeroflow-gas-nitriding-cambridge/>
- Dearnley, P. A. (2017). Surface Engineering with Diffusion Technologies. En *Introduction to Surface Engineering* (pp. 35–115). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139031509.004>
- Dong, H. (2003). Surface engineering in sport. En M. Jenkins (Ed.), *Materials in Sports Equipment* (Vol. 1, pp. 160-195). Woodhead Publishing.
- dos Santos de Almeida, E. A., da Costa, C. E., Giubilei-Milan, J. C. (2015). Study of the nitrided layer obtained by different nitriding methods. *Materia*, 20, 460-465. doi:10.1590/S1517-707620150002.0046
- dos Santos de Almeida, E. A., Giubilei-Milan, J. C. y da Costa, C. E. (2015). Acquired Properties Comparison of Solid Nitriding, Gas Nitriding and Plasma Nitriding in Tool Steels. *Materials Research*, 18(1), 27–35. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.255513>
- Drouet, M., & Le Bourhis, E. (2023). Low Temperature Nitriding of Metal Alloys for Surface Mechanical Performance. *Materials*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/ma16134704>
- Hirano, M., Miura, K., y Ohtsu, N. (2025). Hydrogen-Free Plasma Nitriding Process for Fabrication of Expanded Austenite Layer on AISI 316 Stainless Steel Surface. *Materials*, 18(1), 140. <https://doi.org/10.3390/ma18010140>
- Industrias HD S.A.S. (s.f.). Dado extruder. <https://hdsas.com/dado-extruder/>
- Murali, A. P., Alphonse, M., Ganesan, D., Salunkhe, S., y Hussein, H. M. A. M. (2023). Sliding wear behaviour of salt bath nitrided 316LN austenitic stainless steel. *Applied Surface Science Advances*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100401>
- Ngoc, L., Schimpf, C., Biermann, H., y Dalke, A. (2020). Effect of Nitriding Potential KN on the Formation and Growth of a “White Layer” on Iron Aluminide Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 52. doi:10.1007/s11663-020-02029-x
- Nguyen, D. N., Nguyen, A. X., Nguyen, V. B., Le, T. N., & Le, T. C. (2019). Control gas nitriding process: a review. *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERRD)*, 17-25. <http://doi.org/10.26480/jmerrd.01.2019.17.25>
- Nitrex (s.f.). Gas Nitriding Nitreg. <https://www.nitrex.com/en/solutions/heat-treating->
- Pye, D. (2003). Practical nitriding and ferritic nitrocarburizing. ASM international
- Servicios Cohego, (s.f.). Moldes de inyección de plástico. <https://servicioscohego.com.mx/servicios-moldes-de-inyeccion-de-plastico/>
- Somers, M. A. J. y Christiansen, T. L. (2022). Nitriding of Steels. En F. G. Caballero (Ed.), *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys* (pp. 173-189). Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00036-3>
- Zhou, Y.-L., Xia, F., Xie, A.-J., Peng, H.-P., Wang, J.-H., & Li, Z.-W. (2023). A Review—Effect of Accelerating Methods on Gas Nitriding: Accelerating Mechanism, Nitriding Behavior, and Techno-Economic Analysis. *Coatings*, 13(11), 1846. <https://doi.org/10.3390/coatings13111846>