

Análisis bibliométrico: Nitruración

Bibliometric analysis: Nitriding

Ángel J. Morales Robles ^a, Martín Ortiz Domínguez ^b, Edgar Cardoso Legorreta ^c, Arturo Cruz Avilés ^d

Abstract:

This article presents a study of the scientific production related to the thermochemical treatment of nitriding from 1965 to 2024. The information was collected from the Scopus database and analyzed with the Bibliometrix software programmed in RStudio. For the analysis, the bibliographic data of 11,519 documents were evaluated, and aspects such as the frequency of keywords, the countries with the highest scientific production, collaborations between authors and the impact of the main journals were assessed. Among the results, an annual growth of 7.8% in publications on nitriding stands out, with China, Japan and Germany leading in the number of papers. Research on plasma nitriding and aluminium nitride nitriding has shown great relevance in recent decades, and rankings of the most influential authors and institutions are presented. In addition, journals such as Surface and Coatings Technology and Applied Surface Science concentrate on many publications, positioning themselves as references in the area.

Keywords:

Bibliometric, nitriding, plasma nitriding, aluminum nitride

Resumen:

En el presente artículo se presenta un análisis bibliométrico de la producción científica relacionada al tratamiento termoquímico de nitruración en el periodo de 1965 a 2024. La información fue recabada de la base de datos Scopus y fue analizada con el software Bibliometrix programado en RStudio. Para el análisis se evaluaron los datos bibliográficos de 11,519 documentos, y se evaluaron aspectos como la frecuencia de palabras clave, los países con mayor producción científica, las colaboraciones entre autores y el impacto de las principales revistas. Entre los resultados, se destaca un crecimiento anual del 7.8% en publicaciones sobre nitruración, con China, Japón y Alemania liderando en cantidad de trabajos. Las investigaciones sobre nitruración en plasma y nitruro de aluminio han mostrado gran relevancia en las últimas décadas, y se presentan rankings de los autores e instituciones más influyentes. Además, revistas como Surface and Coatings Technology y Applied Surface Science concentran una gran cantidad de publicaciones, posicionándose como referentes en el área.

Palabras Clave:

Bibliométrico, nitruración, nitruración en plasma, nitruro de aluminio

^a Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0003-6810-6565>, Email: mo298963@uaeh.edu.mx

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-4475-9804>, Email: martin_ortiz@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-2893-2064>, Email: edgarc@uaeh.edu.mx

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-0455-1646>, Email: arturo_cruz8085@uaeh.edu.mx

Introducción

El tratamiento termoquímico de nitruración es un proceso utilizado para endurecer la superficie de aleaciones como el acero para así mejorar su resistencia al desgaste, la corrosión y la fatiga. En este proceso se utilizan tanto el calor como una reacción química para difundir átomos de nitrógeno en la estructura del material y formar compuestos con alta dureza como los nitruros de hierro. Este tratamiento se lleva a cabo a temperaturas de entre 500 y 600 C debido a que a diferencia de los tratamientos de borurización y cementado no requiere que el metal sea transformado a una fase austenítica en la mayoría de los casos. La investigación sobre el efecto del nitrógeno sobre las propiedades superficiales del acero data de principios del siglo XX con las investigaciones que realizó el estadounidense Adolph Machlet de forma independiente para la compañía American Gas Company, quien en 1913 registro una patente sobre el proceso de nitruración gaseosa. De forma paralela en Alemania el Dr. Adolph Fry desarrolló una investigación monumental para la compañía siderúrgica Krupp Works en la que estudio el efecto de los elementos de aleación en el proceso de nitruración (Elwar & Hunger, 2013). Su investigación contribuyo al desarrollo de los llamados aceros Nitralloy patentados en 1921 los cuales tienen la capacidad de formar capas nitruradas duras y resistentes (BĂNICĂ & Grigorescu, 2009).

El tratamiento de nitruración gaseosa a baja temperatura ha demostrado mejorar la resistencia a la corrosión en aceros inoxidables de manera significativa (Deepak et al., 2020). Esta técnica permite difundir átomos de nitrógeno en la matriz del acero sin superar los 450 C, de esta forma se produce una capa superficial denominada capa S o austenita expandida, esta fase es una solución solida super saturada de nitrógeno en la estructura de la austenita del acero inoxidable. Este proceso es efectivo contra la corrosión porque evita la formación de nitruros de cromo y de esta forma el acero nitrurado no compromete su capacidad para formar una capa de pasivación (Haruman et al., 2020). La técnica de nitruración líquida a baja temperatura ha permitido la formación de la fase S al difundir grandes cantidades de nitrógeno en la superficie sin formar precipitados expandiendo la red cristalina para generar tensiones residuales que refuerzan la resistencia mecánica del acero y mejora la resistencia a la corrosión de aceros inoxidables austeníticos (Zhang et al., 2018).

La austenita extendida ha demostrado mejorar el comportamiento tribológico en aceros inoxidables nitrurados, sin embargo, es una fase metaestable que puede descomponerse a temperaturas elevadas o a

temperaturas intermedias por tiempos prolongados. Para evitar la descomposición de la fase S; se recomienda evitar tiempos prolongados de tratamiento y realizar un enfriamiento rápido en la nitruración inicial o en tratamientos posteriores y maximizar la saturación de nitrógeno durante el tratamiento (Christiansen & Somers, 2022).

Durante el tratamiento el nitrógeno difunde en la superficie del acero para formar compuestos con el hierro. De esta forma se obtiene una capa superficial de nitruros de hierro y carbonitruros de hierro, denominada capa compuesta, debajo de esta capa se encuentra la zona de difusión que también contiene carbonitruros de elementos de aleación o una matriz metálica de austenita o martensita expandidas (o una mezcla de ambas), dependiendo de la composición del acero nitrurado.

Las aleaciones de titanio tienen propiedades mecánicas únicas, de las cuales destaca de su alta resistencia mecánica en comparación con su peso, sin embargo, también resulta interesante su resistencia a la corrosión, biocompatibilidad, alta resistencia a la temperatura. Este material es crucial en la industria aeroespacial en donde se requieren estructuras con una alta resistencia mecánica y un bajo peso, sin embargo, las aleaciones de titanio van más allá y son utilizadas en la industria médica, automotriz e ingeniería avanzada.

Las aleaciones de titanio son materiales increíbles, sin embargo, presentan algunas desventajas como su costo elevado, su dificultad para ser mecanizadas y sobre todo sus pobres propiedades tribológicas ya que en condiciones de fricción tienden a presentar un desgaste acelerado.

A diferencia de las aleaciones ferrosas las aleaciones de titanio no pueden endurecerse por tratamiento térmico debido a que no presentan transformaciones martensíticas, sin embargo, el endurecimiento de estas aleaciones se puede lograr por otros métodos como el tratamiento termoquímico de nitruración, el cual han mostrado excelentes resultados al mejorar la resistencia al desgaste de aleaciones de titanio.

El tratamiento termoquímico de nitruración se lleva a cabo en una atmosfera rica en nitrógeno que puede ser en fase gaseosa, mediante plasma, o en medios líquidos. El proceso se realiza a temperaturas de entre 500 y 1050 C, dependiendo del material y el tipo de nitruración. A estas temperaturas el nitrógeno difunde hacia el material, formando nitruros en la superficie y creando una zona de difusión debajo de la capa superficial.

Durante la nitruración los átomos de nitrógeno penetran la superficie mediante un proceso de difusión intersticial donde los átomos de nitrógeno se integran en los espacios intersticiales de la red cristalina del metal formando nitruros en la superficie como el Fe_3N en aceros y el TiN en aleaciones de titanio (Stekovic et al., 2022).

Durante la nitruración se forman dos regiones, la primera se localiza en la superficie y se denomina capa compuesta y se caracteriza por la presencia de nitruros, esta capa es extremadamente dura y resistente al desgaste. Debajo de la capa compuesta se localiza la zona de difusión en la cual los átomos de nitrógeno forman una solución sólida intersticial, esta zona también aumenta la dureza, pero no tan alta si se compara con la capa compuesta.

Durante el tratamiento de aleaciones de titanio es importante tomar en cuenta la reactividad del titanio con el oxígeno ya que este puede formar óxidos de titanio TiO_2 los cuales no son deseados debido a que disminuyen la dureza superficial, además de que pueden afectar la adherencia de la capa compuesta con el sustrato al formar una capa frágil. Por estas razones se recomienda que se evite por completo la presencia de oxígeno en los procesos de nitrurado de aleaciones de titanio. En los procesos de nitrurado gaseoso se recomienda utilizar nitrógeno de alta pureza, o gases inertes protectores, también ha dado buenos resultados el uso de hornos de vacío. El proceso de nitruración por plasma también ha tenido buenos resultados (Grün & Günther, 1991).

Los aceros inoxidables son materiales con excelentes propiedades mecánicas que tienen muchas aplicaciones en diferentes sectores, sin embargo, una de las limitaciones de estos y principalmente de los aceros inoxidables austeníticos es su resistencia al desgaste ya que es muy baja debido a que estos aceros no se pueden endurecer por tratamiento térmico, por esta razón solo suelen utilizarse en aplicaciones donde se requiere una alta resistencia a la corrosión. Sin embargo, los tratamientos termoquímicos pueden aumentar la dureza superficial y la resistencia al desgaste.

El tratamiento de nitruración mejora de manera significativa la resistencia al desgaste y a la fatiga de los aceros inoxidables y una de las principales ventajas del tratamiento de nitruración es que puede preservar la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables cuando el proceso se lleva a temperaturas por debajo de 450°C evitando la precipitación de nitruros de cromo (CrN); de esta forma el cromo permanece en solución sólida y mantiene la capa pasiva de óxido de cromo la cual otorga la resistencia a la corrosión (Bell, 1990).

El proceso de nitruración ha mostrado mejores resultados en aceros inoxidables austeníticos en los cuales la formación de la fase S contribuye al endurecimiento sin sacrificar la resistencia a la corrosión. En aceros martensíticos y ferríticos se pueden presentar algunas complicaciones y se requiere un buen control del proceso.

Cienciometría

El desarrollo de las tecnologías de la información ha llevado a la humanidad a una era digital en que tuvo inicios en los años 60 pero que con la popularización del internet se expandió de forma increíble a partir de la década de los 90 y a partir de entonces se produjo una explosión en la cantidad de datos generados en este contexto el manejo de grandes cantidades de datos o "big data", comenzó a ganar popularidad ya que estos datos pueden generar información valiosa que impulsa la toma de decisiones, mejora la eficiencia y permite innovaciones en una amplia variedad de campos.

El avance tecnológico ha tenido repercusiones en la investigación científica con la aparición de grandes bases de datos bibliográficas que son sistemas de información que recopilan, organizan y permiten el acceso a referencias de publicaciones académicas y científicas en diversas disciplinas. Estas bases de datos facilitan el acceso a literatura científica y académica y la presentan de forma estructurada permitiendo a los investigadores y profesionales, encontrar, recuperar y analizar información relevante.

Una de las primeras bases de datos se lanzó en 1964 fue el Science Citation Index (SCI) el cual es un índice de citación que recopila y organiza referencias de artículos científicos publicados en revistas de alto impacto. En ese mismo año se lanzó MEDLINE (Medical Literature Analysis and Retrieval System Online) una de las primeras bases de datos especializadas en medicina. En la década de los 90 con el auge del internet llegaron las bases de datos bibliográficas en línea con la aparición de Web of Science que evolucionó de Science Citation Index y que permitió un acceso global en tiempo real a la información científica y las redes de citación. En 2004 Elsevier una de las editoriales más grandes y reconocidas a nivel mundial en el ámbito académico y científico lanzó Scopus una de las mayores bases de datos bibliográficas multidisciplinarias, esta plataforma incluye millones de referencias científicas y permite un análisis detallado de la productividad e impacto de los investigadores. En 2004 Google lanzó Google Scholar un motor de búsqueda gratuito que indexa literatura académica como artículos de revistas, tesis y libros.

Las grandes bases de datos bibliográficos dieron pie a la aparición de un nuevo campo de la ciencia denominado *cienciometría* que se ocupa de medir y analizar el progreso científico mediante indicadores cuantitativos. Estos indicadores proporcionan una forma objetiva y medible de evaluar el impacto y la productividad de la investigación científica y son aplicables a diferentes niveles y unidades de análisis dentro del ámbito científico como autores, instituciones, revistas, artículos, países e incluso disciplinas enteras. A continuación de describen algunas métricas utilizadas en *cienciometría*.

- **Numero de publicaciones y numero de citas:** Estos indicadores son básicos y solo muestran la cantidad de artículos, libros, capítulos de libros, o actas de congresos publicados por un investigador, institución o revista. Mientras que el número de citas representa la cantidad de veces que un trabajo ha sido citado en otros estudios.
- **Factor de impacto:** El factor de impacto es un indicador que mide la influencia de una revista científica y se calcula como el número promedio de citas recibidas por artículos publicados en un periodo de dos años. Con este indicador se puede evaluar la reputación y calidad de una revista.
- **Indice h:** Este indicador mide la productividad y el impacto. Este indicador refleja el número de artículos “n” que han sido citados al menos “n” veces {Citation}.
- **Numero de descargas y visualizaciones:** Este indicador refleja la atención inmediata que ha recibido un trabajo publicado.
- **Tasa de citas por publicación:** Este indicador mide el número promedio de citas recibidas por cada publicación.
- **Tasa de autocitacion:** Este indicador mide el porcentaje de citas que un autor hace a sus propios trabajos.
- **SCImago Journal Rank:** Este indicador mide la influencia e impacto de una revista y fue desarrollado por el grupo de investigación SCImago y que utiliza la base de datos Scopus. Esta métrica toma en cuenta el número de citas y la calidad e importancia de las revistas que realizan estas citas. A diferencia de otros indicadores en este se agrega una ponderación a las citas en función del prestigio de la revista que hace la citación. Las auto citaciones están limitadas en la ponderación del SJR. El periodo de estudio de este indicador es de 3 años.
- **CiteScore:** Es un indicador que mide el impacto de las publicaciones científicas en una revista. Es calculado por la base de datos Scopus y ofrece una alternativa al factor de impacto que se calcula en el Journal Citation Report de Web of Science. Este indicador mide el total de citas entre el número total de artículos publicados en los últimos 4 años.

- **Cuartil:** El cuartil de una revista es una clasificación que refleja la posición relativa que tiene una revista en su campo de estudio. Esta clasificación se establece en base a su factor de impacto u otro indicador de rendimiento como el SCImago Journal rank (SJR)
Actualmente existen herramientas avanzadas como VOSviewer y Bibliometrix para realizar análisis bibliométricos enfocados en la *cienciometría*. VOSviewer es un software diseñado específicamente para la visualización y análisis de redes bibliométricas. Por otro lado, Bibliometrix es un paquete de análisis bibliométrico programado en el lenguaje R el cual es altamente utilizado para análisis de datos estadísticos. Este paquete ofrece una amplia gama de funciones para el análisis cualitativo de datos bibliográficos. La herramienta de visualización Biblioshiny permite a los usuarios interactuar fácilmente con las funciones de Bibliometrix sin tener conocimientos avanzados en el lenguaje de programación R.

Materiales y métodos

Se realizó un análisis bibliométrico utilizando Bibliometrix y la plataforma de RStudio Biblioshiny (V. 1.3.1073) el cual tiene una versión gratuita de código abierto.

Recolección de datos.

Los datos fueron recolectados el 24 de marzo de 2024 directamente de la base de datos Scopus tomando en cuenta las publicaciones relacionadas con el tratamiento de nitruración a partir de año 1965. Recientemente se lanzó Scopus IA una inteligencia artificial generativa diseñada para obtener resúmenes rápidos y precisos sobre temas de investigación además de ofrecer mapas visuales sobre relaciones complejas entre temas de investigación y adicionalmente permite realizar consultas en lenguaje natural. Esta herramienta se utilizó para determinar las palabras clave más utilizadas en este tema para posteriormente plantear una ecuación de búsqueda aprovechando otra de las herramientas de Scopus. La ecuación de búsqueda fue la siguiente: “nitriding” and “wear” or “surface”. En el primer criterio de búsqueda se filtraron títulos de artículos, resúmenes y palabras clave, mientras que en los otros dos criterios se aplicaron a todos los campos. Como resultado de esta consulta se encontraron 11,519 documentos.

En la Tabla 1 se presenta la base de datos global sobre el proceso de nitruración considerando 181 documentos publicados en el idioma inglés y los datos estadísticos de los datos utilizados según la metodología propuesta.

Tabla 1 Resultados de análisis bibliométrico. Fuente: Elaboración propia

Descripción	Resultados
Periodo de tiempo	1965-2024
Fuentes (Revistas, Libros, etc.)	1810
Documentos	11404
Tasa de crecimiento anual (%)	7.8
Edad promedio de los documentos	16.3
Citas promedio por documento	13.46
Referencias	0
Keywords Plus (ID)	27513
Palabras clave del autor (DE)	12325
Autores	19959
Autores de documentos con un solo autor	674
Documentos con un solo autor	985
Coautores por documento	4.06
Porcentaje de coautorías internacionales	14.04
Artículo	8874
Artículo	67
Artículo de conferencia	19
Artículo de revisión	1
Libro	12
Capítulo de libro	94
Capítulo de libro artículo	1
Artículo de conferencia	2142
Artículo de conferencia artículo	20
Capítulo de libro de artículo de conferencia	1
Artículo de conferencia artículo de conferencia	3
Revisión de artículo de conferencia	1
Editorial	4
Erratum (Fe de erratas)	5
Erratum de artículo de conferencia	1
Carta	12
Nota	4
Informe	8
Retractado	1
Revisión	130
Artículo de revisión	1
Encuesta corta	3

Se observa que el número de investigaciones sobre nitruración en plasma cobro relevancia a partir de 1995.

Por otro lado, las investigaciones sobre nitruro de aluminio han aumentado a partir de 2010.

Resultados y discusión

Se realizó un análisis de las palabras clave de acuerdo a la frecuencia con la que aparecen en los documentos. Las palabras clave son utilizadas por los investigadores para representar de forma general los temas que aborda su investigación. En la Figura 1 se presentan las palabras clave ordenadas de acuerdo a la frecuencia con la que aparecieron en los artículos publicados.

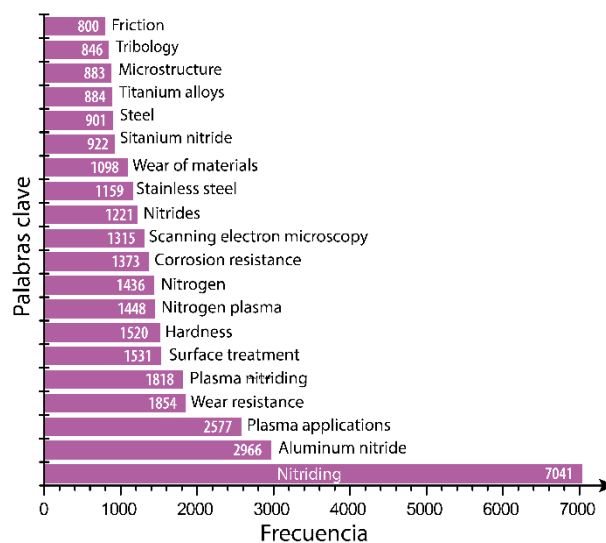


Figura 1. Palabras clave más frecuentes. Fuente: Elaboración propia.

Analizando los datos el lector puede identificar fácilmente los temas más estudiados dentro de esta línea de investigación. Muchos de los análisis realizados abordan temas sobre tribología al tratarse de un tratamiento que mejora la resistencia al desgaste, sin embargo, las investigaciones sobre nitrurado en plasma y nitruro de aluminio tienen una gran relevancia.

En el análisis se consideraron 1809 fuentes de información de entre las cuales destacan revistas científicas, publicaciones institucionales, revistas técnicas y fuentes relacionadas a conferencias, simposios, seminarios y talleres. Las fuentes con más publicaciones se presentan en la Figura 2 en la cual se anexa su índice h, calculado a partir de los resultados del análisis bibliométrico. Se puede observar que algunas de las revistas con mayor número de publicaciones forman parte de la editorial Elsevier, entre las cuales se encuentran Surface and Coatings Technology, Applied Surface Science, Wear, Vacuum, Journal of alloys and

compounds, Material Science and engineering: A, Thin Solid Films todas a excepción de la última están clasificadas como cuartil Q1 por el Scimago Journal Ranking. Otras revistas relevantes Q1 incluyen a las revistas Journal of Materials Science (Springer) y Surface Engineering (SAGE Publications Inc.). Entre las revistas con cuartil Q2 se encuentran Thin solid Films (Elsevier), Journal of materials engineering and performance (Springer), Materials (MDPI) y Coatings (MDPI). En total estas revistas publicaron 2479 artículos científicos sobre nitruración.

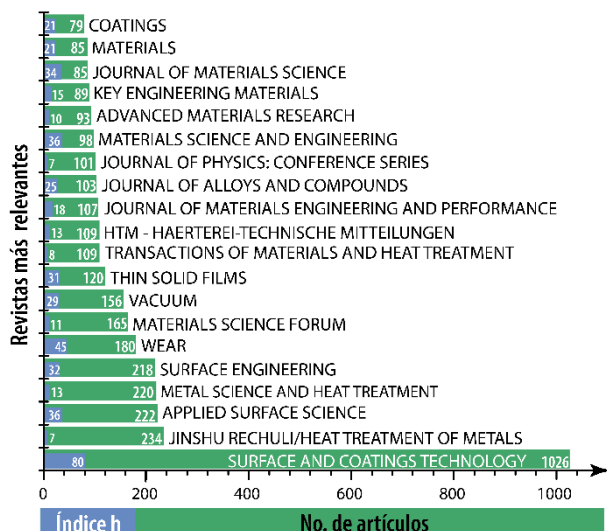


Figura 2. Revistas científicas con más publicaciones. Fuente: Elaboración propia.

El análisis reveló que en total 19959 autores han colaborado en publicaciones acerca del tema de nitración. En la Figura 3 se presentan los 20 autores clasificados por el número de publicaciones sobre el tema además de comparar el número de publicaciones se compara el impacto de las publicaciones mediante el índice h.

El Prof. Dr. Eric Jan Mittemeijer es el autor con mayor número de publicaciones y actualmente es el director del Instituto Max Plank para Sistemas Inteligentes en Stuttgart, se dedica al estudio de transformaciones de fase, termodinámica, cinética de interfases, materiales nano estructurados, así como de los procesos de nitruración y nitro carburación en aceros y aleaciones de hierro, ha publicado más de 700 artículos científicos y ha editado libros importantes en el campo como Thermodynamical Surface Engineering of Steels y Fundamentals of Nitriding and Nitrocarburizing. Dada la importancia e influencia de Mittemeijer ha realizado colaboraciones nacionales e internacionales uno de los autores más importantes es Marcel A. J. Sommers quien dirige el departamento de Ingeniería Civil y Mecánica en la Universidad Técnica de

Dinamarca, este autor a publicado 106 artículos sobre nitruración.

Alemania alberga al segundo autor con más publicaciones y se trata de Heinz Joachim Spies adscrito al Instituto de Tecnología de Materiales de la Universidad de Bergakademie Freiberg. Él ha publicado 106 artículos sobre nitruración.

En China particularmente en la Universidad Marítima de Dalian reside un grupo importante de investigación encabezado por los autores Yizuo Wang y Liang Wang. Este grupo ha tendido colaboraciones importantes con la Universidad de Birmingham en Inglaterra a través de Hashan Dong quien colabora con Thomas Bell otro de los autores más importantes en nitruración. En la Figura 5 se presenta una representación gráfica de las redes de colaboración más importantes a nivel mundial.

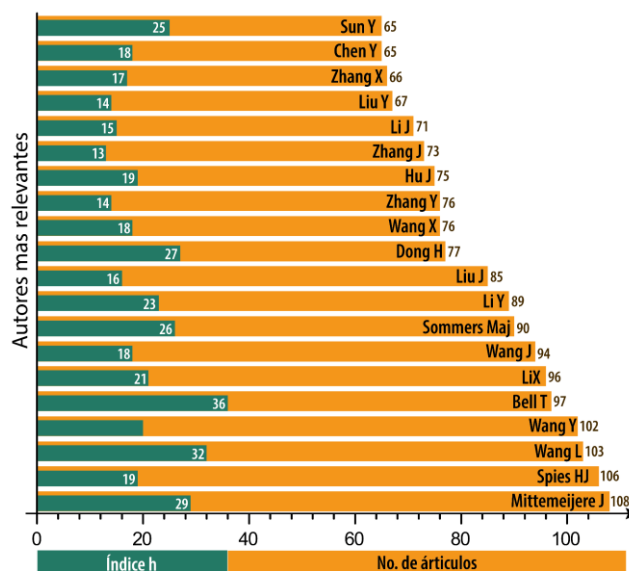


Figura 3 Autores más relevantes en nitruración. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4 se presenta el seguimiento a través del tiempo de la producción científica de los 5 autores más importantes en el tema. En esta línea temporal de burbujas, en la gráfica el número de artículos publicados por año se relaciona al tamaño de la burbuja y el color se relaciona al número de citas recibidas. Analizando la gráfica se observa que uno de los pioneros en la investigación fue Bell T en el año 1975. posteriormente Spies H.J. comenzó a publicar en 1981 y tuvo una alta producción en la década de los 90. Mittemeijer E.J. tuvo una producción alta a partir de 2001. Se puede observar que en las últimas dos décadas Wang L y Wang Y han liderado la línea de investigación con una gran cantidad de artículos de alto impacto.

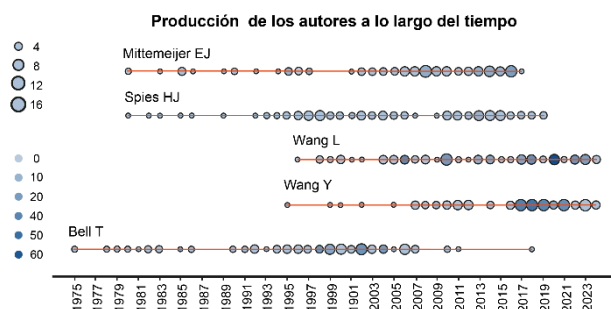


Figura 4 Producción de autores en el tiempo. Fuente: Elaboración propia

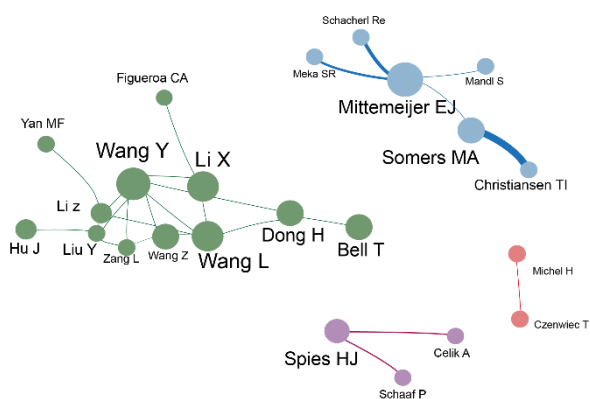


Figura 5 Red de colaboración entre autores. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6 se presentan las 20 instituciones con mayor producción científica sobre la línea de investigación del tratamiento de nitruración. Anteriormente se mencionaron algunos de los autores más relevantes en el tema de nitruración y su influencia se ve reflejada en las universidades que han publicado artículos en esta línea, en el ranking aparecen ya mencionadas Universidad de Stuttgart, Universidad de Birmingham, la Universidad Técnica de Dinamarca, la Universidad Marítima de Dalian, también puede observar como las universidades en China han participado activamente en el desarrollo de conocimiento sobre el tema con un alto número de publicaciones.

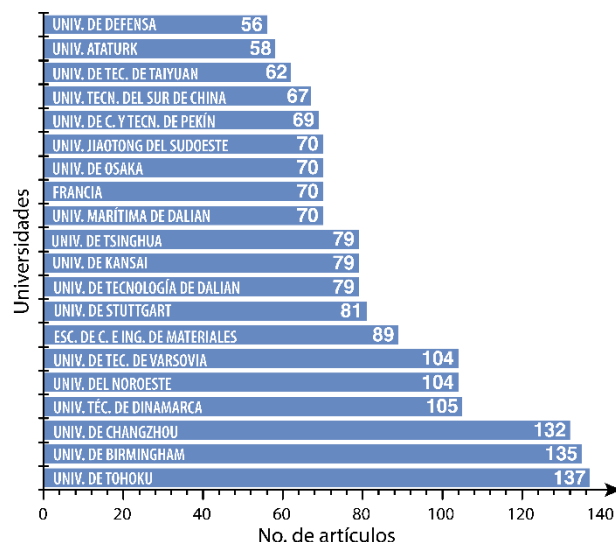


Figura 6 Universidades con mayor número de publicaciones sobre nitruración. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7 se puede observar un comparativo entre la producción científica por país y como era de esperarse China es el país con mayor número de publicaciones con 4335, le sigue Japón con 2359, luego Alemania con 1543 y posteriormente aparecen países del continente americano con Brasil con 1340 y EUA con 1059 publicaciones.

El análisis permitió comparar el número de publicaciones realizadas en el periodo de 1965 a 1973 por país. Los resultados se presentan en la gráfica en la que se observa que China es el país con más publicaciones sobre nitruración a nivel mundial con 4335, le siguen Japón con 2359 y Alemania con 1543 publicaciones.



Figura 7 Países con mayor número de publicaciones sobre nitruración. Fuente: Elaboración propia.

Se llevo a cabo un análisis de las palabras clave y la frecuencia con la que fueron utilizadas a lo largo de los

años, posteriormente los datos se filtraron para posteriormente construir un diagrama de Sankey en el cual se comparan las palabras clave más utilizadas en tres periodos de tiempo que corresponden a 1973 - 1996, 1997 -2010 y 2011 – 2024. En el diagrama se puede observar como desde dos inicios del tratamiento se tenía una inquietud por las tecnologías de ion-plating y plasma además del nitrurado de aleaciones ferrosas y no ferrosas como el titanio. En el último periodo de tiempo se observa un interés por las tecnologías de nitrurado con plasma y con gas y el nitruro de aluminio.

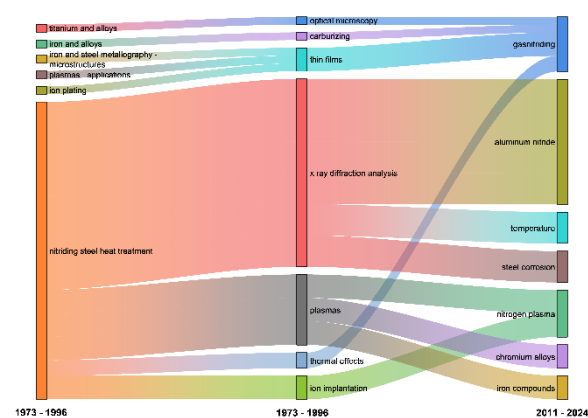


Figura 8. Diagrama de Sankey de la evolucion de las palabras clave en diferentes periodos de tiempo (1973-1996, 1997-2010, 2011-2024). Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 9 se presenta la evolución histórica en el número de publicaciones sobre el tratamiento termoquímico de nitruración, en la cual se reportó una tasa de crecimiento anual del 7.8%. En la gráfica se puede observar que a partir de 1993 se incrementó el número de publicaciones de manera considerable ya que para esa fecha se habían realizado 1381 publicaciones y para el año 1998 esta cifra se había duplicado con un total de 2662 publicaciones científicas.

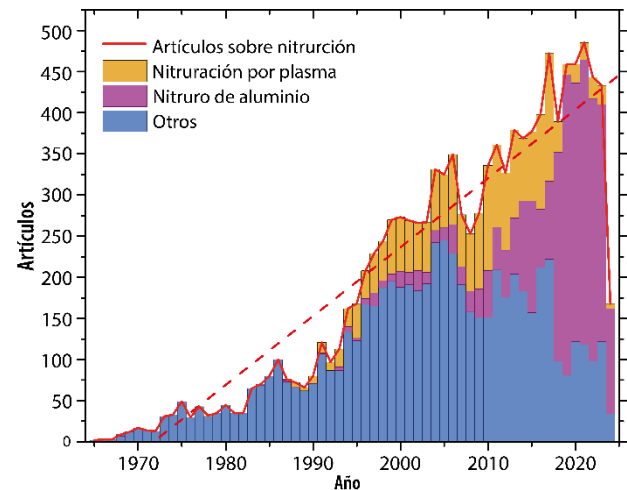


Figura 9 Numero de publicaciones sobre nitruración por año. Fuente: Elaboración propia.

A lo largo de los años no solo ha cambiado el número de publicaciones también han cambiado los temas de investigación. Se observa que entre 1995 y 2010 las publicaciones relacionadas al proceso de nitruración por plasma representaron cerca de 15% del total de publicaciones anual. Sin embargo, esto cambio a partir de 2010 ya que a partir de este año el número de publicaciones relacionas al nitruro de aluminio aumento llegando al punto de representar cerca del 75% de las publicaciones anuales.

En la Tabla 2 se presentan los artículos publicados sobre nitruración con más citas. El articulo más citado se titula “Plasma electrolysis for surface engineering” del autor A.L. Yerokhin en la revista Surface and Coatings Technology.

Tabla 2. Artículos más citados sobre nitruración. Fuente: Elaboración propia.

Artículo	Autor	Citas
Plasma electrolysis for surface engineering 10.1016/S0257-8972(99)00441-7 (1999)	Yerokhin A.	2807
Ion and electron irradiation-induced effects in nanostructured materials 10.1063/1.3318261 (2010)	Krashebinenko v A.	878

Highly Efficient Formation of Visible Light Tunable TiO₂-xNx Photocatalysts and Their Transformation at the Nanoscale 10.1021/jp030843n (2004)	Gole J.	820
Nitriding iron at lower temperatures 10.1126/science.1080216 (1985)	Tong W.	671
Structure and corrosion resistance of plasma nitrided stainless steel 10.1179/sur.1985.1.2.131 (2005)	Zhang Z.	582
Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods 10.1016/j.surfcoat.2004.07.115 (1991)	Zhecheva A.	503
Dry sliding wear mechanisms of the Ti6Al4V alloy 10.1016/S0043-1648(96)07454-6 (1995)	Molinari A.	443

Bell, T. (1990). Surface engineering: Past, present, and future. *Surface Engineering*, 6(1), 31–40.

Christiansen, T., & Somers, M. A. (2022). Decomposition kinetics of expanded austenite with high nitrogen contents. *International Journal of Materials Research*, 97(1), 79–88.

Deepak, T. L., Mithra, G. A., Lokesh, K., Chandra, B. S., & Subbiah, R. (2020). Stability of expanded austenite by gas nitriding process on austenitic stainless steel material under low temperature conditions. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1681–1684.

Elwar, J., & Hunger, R. (2013). *Plasma (Ion) Nitriding and Nitrocarburizing of Steels*.

Grün, R., & Günther, H.-J. (1991). Plasma nitriding in industry—Problems, new solutions and limits. *Second International Conference on Plasma Surface Engineering*, 140, 435–441. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(91\)90459-Z](https://doi.org/10.1016/0921-5093(91)90459-Z)

Haruman, E., Sun, Y., & Adenan, M. S. (2020). A comparative study of the tribocorrosion behaviour of low temperature nitrided austenitic and duplex stainless steels in NaCl solution. *Tribology International*, 151, 106412. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106412>

Stekovic, S., Romero-Ramirez, R., & Olsson, L. (2022). *Effect of Nitriding on Microstructure and Mechanical Properties on a Ti6Al4V Alloy for Aerospace Applications*. 33.

Zhang, X., Wang, J., Fan, H., & Pan, D. (2018). Erosion–corrosion resistance properties of 316L austenitic stainless steels after low-temperature liquid nitriding. *Applied Surface Science*, 440, 755–762.

Conclusiones

El artículo concluye que la investigación en nitruración ha mostrado un crecimiento sostenido, especialmente impulsado por técnicas como la nitruración en plasma y el estudio de nitruros en diversas aleaciones. China, Japón y Alemania destacan como los principales contribuyentes, con instituciones y autores líderes en el desarrollo de nuevas aplicaciones y conocimientos en este campo. Asimismo, se resalta la importancia de plataformas como *Surface and Coatings Technology* y *Applied Surface Science* en la difusión de investigaciones clave, lo que refleja la consolidación de esta área en la ingeniería de superficies. En general, el análisis bibliométrico proporciona una visión clara de las tendencias actuales, los avances en materiales y las colaboraciones internacionales que están moldeando el futuro de la nitruración.

Referencias

BĂNICĂ, M. E., & Grigorescu, G. G. (2009). Contributions to the Nitriding Chemical Treatment of a Nitralloy Steel. *UPB Sci. Bull., Series B*, 71(3), 105–114.