



Endurecimiento superficial de la aleación Ti6Al4V mediante láser

J.M. Vazquez-Martinez¹, J. Salguero¹, I. Del Sol¹, M. Ramirez-Peña¹, M. Batista¹

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Universidad de Cádiz, juanmanuel.vazquez@uca.es

La aleación Ti6Al4V es ampliamente utilizada en las industrias aeroespacial, biomédica y de automoción debido a su excelente relación resistencia-peso y resistencia a la corrosión; sin embargo, su resistencia al desgaste y la fricción pueden limitar su rendimiento en aplicaciones específicas. Estas propiedades se encuentran gobernadas principalmente por la microestructura del material, la cual puede ser modificada para adquirir nuevas características. La aleación Ti6Al4V se caracteriza por una microestructura dúplex o bimodal, en la que ambas fases están presentes en proporciones y distribuciones que pueden variarse mediante tratamientos térmicos y mecánicos.

Una de las limitaciones de los tratamientos térmicos convencionales, se presenta en la incapacidad de discretizar la aplicación del mismo en secciones y áreas específicas del material, requiriendo además elevados consumos de energía y un exhaustivo control de las variables de control y tiempos de calentamiento y enfriamiento. En este sentido, la modificación de superficie mediante tecnología láser de pulso largo (ns) logra suministrar un volumen significativo de energía en áreas muy reducidas, permitiendo además controlar con precisión la profundidad de la capa irradiada. Estos tratamientos pueden actuar como procesos de calentamiento y enfriamiento rápidos, pudiendo realizarse en atmósferas especiales, lo que permite realizar variaciones en la microestructura y composición de capas externas del material sin afectar al resto del mismo.

En la presente investigación se ha llevado a cabo un estudio de la influencia de los parámetros de texturizado láser en la profundidad de incidencia y endurecimiento superficial de la aleación de titanio Ti6Al4V. Los resultados obtenidos, confirman que los tratamientos realizados empleando mayores valores de energía suministrada producen un incremento significativo de la dureza del material, debido principalmente a variaciones de la micro estructura del mismo, y a la aparición de óxidos en la composición inicial del material. En este sentido, se han registrado incrementos superiores al 250% respecto de la dureza inicial del material mediante procesos de irradiación láser de superficie.

1. Introducción

La aleación Ti6Al4V, ampliamente utilizada en industrias como la aeroespacial, biomédica y automotriz, es conocida por su combinación única de baja densidad, alta resistencia mecánica y excelente resistencia a la corrosión [1,2]. Sin embargo, su aplicación en entornos que demandan alta resistencia al desgaste o cargas cíclicas prolongadas puede verse limitada debido a su baja dureza superficial inherente. Para superar esta limitación, se han desarrollado diversas técnicas de modificación superficial, entre las cuales el texturizado mediante láser ha surgido como una herramienta versátil y eficiente. El endurecimiento superficial asistido por láser ofrece ventajas significativas al proporcionar un control preciso de los parámetros del proceso, permitiendo modificar selectivamente las propiedades mecánicas y tribológicas de la superficie sin afectar el núcleo del material [3,4].

El endurecimiento superficial mediante láser se basa en la interacción controlada entre un haz láser de alta densidad de energía y la superficie del material. Este proceso induce ciclos térmicos rápidos que generan transformaciones microestructurales críticas para el endurecimiento. En la aleación Ti6Al4V, estas transformaciones incluyen la formación de fases metastables, como la martensita α' , resultado de la rápida solidificación de la fase β a altas temperaturas. La martensita α' , caracterizada por su estructura acicular y alta densidad de defectos cristalinos, contribuye directamente al aumento de la dureza de la superficie. Además, dependiendo de las condiciones del tratamiento, pueden generarse capas de óxido superficial, predominantemente TiO_2 , que no solo incrementan la dureza superficial, sino que también mejoran la resistencia a la corrosión y al desgaste [5-7].

Entre las técnicas de tratamiento láser, el uso de láser pulsado de nanosegundos ha demostrado ser especialmente efectivo debido a su capacidad de aplicar pulsos de alta energía en intervalos cortos. Este enfoque permite un calentamiento localizado extremadamente rápido seguido de un enfriamiento igualmente abrupto, lo que resulta en microestructuras refinadas y una alta densidad de tensiones residuales de compresión en la superficie. Además, la flexibilidad de los parámetros de proceso, como la densidad de energía, la duración del pulso y la velocidad de barrido, permite optimizar las condiciones de endurecimiento para aplicaciones específicas [8-12].

El endurecimiento superficial no solo mejora las propiedades mecánicas del Ti6Al4V, sino que también extiende su vida útil en aplicaciones críticas. Por ejemplo, la mayor dureza y resistencia al desgaste lograda mediante este proceso son particularmente beneficiosas en componentes sujetos a contacto repetitivo, como implantes médicos, álabes de turbina y engranajes de transmisión. Sin embargo, el éxito del tratamiento depende en gran medida del control preciso de los parámetros del proceso, ya que condiciones subóptimas pueden resultar en efectos adversos, como la formación excesiva de óxidos o la generación de grietas térmicas. Asimismo, el proceso de texturizado láser, consiste en la generación de patrones generados mediante la eliminación selectiva de material, el cual, en el caso de sistemas láser de pulso corto (ns), se produce por fusión o vaporización del área irradiada [13-17].

En este artículo se presenta un análisis detallado del endurecimiento superficial de la aleación Ti6Al4V mediante láser, enfatizando los mecanismos microestructurales involucrados, el impacto de los parámetros de proceso y los efectos en las propiedades finales del material. Asimismo, se ha llevado a cabo la identificación de los efectos asociados a la oxidación térmica de la superficie de titanio combinados al aumento de dureza, como los cambios de tonalidad de la capa irradiada.

2. Metodología experimental

La metodología experimental desarrollada en este estudio tiene como objetivo analizar los efectos del tratamiento láser sobre la microestructura y las propiedades mecánicas de dureza superficial de la aleación Ti6Al4V. Para ello, se llevó a cabo un proceso de texturizado láser empleando un sistema láser pulsado de nanosegundos, seleccionado por su capacidad de generar procesos de texturizado preciso en la superficie del material. Posteriormente, las muestras tratadas fueron caracterizadas mediante técnicas de microscopía óptica y análisis de cortes transversales, con el fin de evaluar tanto la morfología superficial como los cambios inducidos en la microestructura de las zonas afectadas térmicamente. Este enfoque permitió correlacionar los parámetros del proceso con las modificaciones en la dureza y las variaciones en las características iniciales del material tratado.

2.1. Material empleado

Las muestras empleadas en este estudio consistieron en una probeta de la aleación Ti6Al4V con la composición descrita en la tabla 1 (analizado mediante Espectrometría de Emisión Óptica – OES), con dimensiones de 100 mm x 50 mm x 5 mm. Antes del proceso de texturizado láser, las superficies fueron preparadas mediante un proceso de esmerilado y pulido mecánico para garantizar una rugosidad inicial uniforme. Las muestras fueron posteriormente limpiadas con ultrasonido en una solución de alcohol isopropílico y agua destilada para eliminar impurezas y asegurar una interacción óptima entre el haz láser y la superficie del material.

Tabla 1: Composición de la aleación Ti6Al4V empleada

Elemento	Al	V	Fe	C	O	N	H	Ti
%wt	6,26	3,91	0,18	0,011	< 0,10	< 0,10	< 0,10	Resto

2.2. Texturizado láser

El texturizado de las superficies se llevó a cabo utilizando un sistema láser pulsado de nanosegundos (ns), con una longitud de onda de 1062 nm, y tecnología de láser de fibra Yb con un diámetro de spot de 60 μm . Los parámetros clave del proceso incluyeron una densidad de energía variable E_d (entre 4,42 y 35,37 J/cm^2), velocidades de barrido V_s (10 a 250 mm/s) descritas en la tabla 2. Las condiciones de trabajo fueron seleccionadas para generar texturas superficiales consistentes y promover cambios microestructurales en la capa superior del material. El texturizado se llevó a cabo en atmósfera no protectora de laboratorio favoreciendo la interacción de oxígeno con la superficie donde se buscó la formación de óxidos para evaluar su influencia en la dureza y la microestructura.

Tabla 2: Parámetros de texturizado láser

Potencia [W]	Frecuencia [kHz]	Densidad de energía E_d [J/cm^2]	Velocidad de barrido [mm/s]
10	20 - 50 - 80	4,42 - 7,07 - 17,68 - 35,37	10-20-40-80-100-150-200-250

2.3. Caracterización microestructural

Una vez realizado el proceso de texturizado, las muestras fueron cortadas transversalmente para analizar las características microestructurales de las texturas generadas y las zonas afectadas térmicamente (ZAT). Los cortes transversales se prepararon mediante embutido en resina epóxica, seguido de un pulido progresivo utilizando discos abrasivos de carburo de silicio y suspensiones diamantadas hasta obtener un acabado especular.

La caracterización microestructural se llevó a cabo empleando un microscopio óptico estereoscópico Nikon Epiphot 200 con magnificación variable. Se realizó un análisis detallado de las texturas superficiales y de las transformaciones inducidas en la microestructura de la aleación, con énfasis en la formación de fases martensíticas, posibles defectos térmicos, y la presencia de óxidos superficiales. Para ello, se aplicaron grabados químicos selectivos utilizando una solución de Kroll (2% HF, 4% HNO_3 , 94% H_2O) para resaltar los cambios en la morfología y estructura de los granos. Asimismo, se emplearon técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM) para la identificación de las transformaciones microestructurales.

2.4. Análisis de dureza

La dureza superficial de las muestras fue evaluada mediante ensayos de microdureza Vickers (HV) utilizando una carga de $245,2 \cdot 10^{-3}$ N (HV0,025) y un tiempo de aplicación de 10 s. Las mediciones se realizaron en la superficie texturizada y en las zonas subsuperficiales del corte transversal de las texturas, para determinar gradientes de dureza generados por el tratamiento. Se efectuaron al menos cinco mediciones por muestra en diferentes puntos de interés para obtener un valor promedio representativo. El equipo empleado en la evaluación de dureza consistió en un durómetro Duramin-20 de Struers con indentador Vickers. Esta metodología permitió correlacionar los parámetros del texturizado láser con los cambios en la microestructura y la dureza de la aleación Ti6Al4V.

3. Resultados y discusión

El presente apartado presenta los resultados obtenidos en el estudio sobre el endurecimiento mediante láser de una aleación de titanio Ti6Al4V. Para ello, se han analizado los efectos de los parámetros del láser, como la potencia, la velocidad de escaneo y la densidad de energía, sobre las características de dureza Vickers de la aleación tratada, y en relación a la profundidad de incidencia del haz. Los resultados se comparan con las propiedades del material base para evaluar la efectividad del proceso de tratamiento térmico láser en la mejora de las propiedades del titanio.

Inicialmente, se ha evaluado la influencia de parámetros de tratamiento láser de densidad de energía y velocidad de barrido del haz, sobre la profundidad a la que el material de sustrato se encuentra afectado, en términos de variación de la microestructura, y eliminación de material. A continuación, se ha analizado la influencia de dichos parámetros sobre la variación de los valores de microdureza Vickers de la aleación, y posteriormente, se han

llevado a cabo estudios sobre la relación entre la profundidad de incidencia del haz, y la variación de dureza experimentada.

3.1. Influencia de los parámetros de tratamiento láser en la profundidad de incidencia del haz

Los parámetros de procesado láser de densidad de energía (E_d) y velocidad de barrido del haz (V_s) muestran una influencia significativa en la profundidad alcanzada de material afectado, cuantificado a través de la dimensión de material eliminado. En este sentido, se ha confirmado que la velocidad de barrido genera un comportamiento que se ajusta a relaciones exponenciales. De esta forma, valores elevados de V_s producen tratamientos en los cuales el haz de energía permanece periodos muy reducidos de tiempo sobre una sección de material, dando lugar a la generación de texturas con dimensiones microgeométricas muy bajas, similares a una superficie sin tratar. A su vez, tratamientos generados empleando velocidades de barrido bajas, hacen que el haz permanezca más tiempo en una misma sección del material de sustrato, lo que induce que pueda afectarse mayores profundidades.

En relación a la influencia de la densidad de energía en la profundidad de material afectado, se comprueba que el incremento de E_d resulta en un escalamiento del comportamiento de los valores de profundidad, confirmando que incrementos de E_d incrementan el valor máximo de profundidad alcanzado. Asimismo, a partir de las observaciones del gráfico mostrado en la figura 1 se puede estimar que para valores muy reducidos de E_d los tratamientos inducirán muy poca energía en el material de sustrato, produciendo texturas muy suaves y de dimensiones muy reducidas, en algunos casos, similares a la topografía del material de partida.

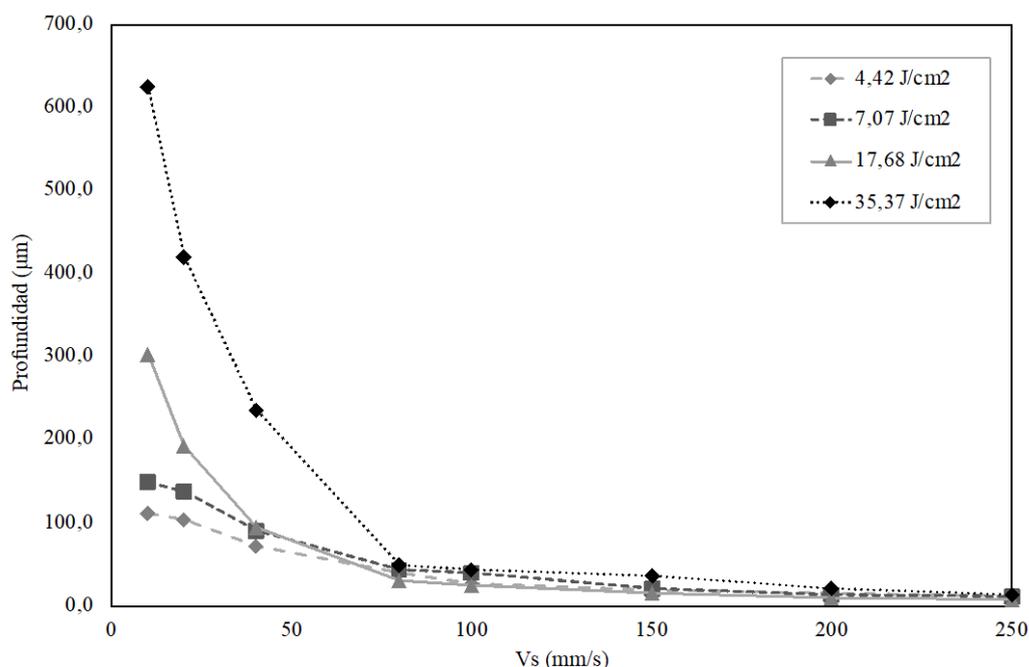


Figura 1: Profundidad de incidencia del haz en función del tratamiento láser realizado

Tabla 3: Tendencias de comportamiento para la profundidad en función de V_s .

E_d (J/cm ²)	Tendencia de comportamiento	Coefficiente de ajuste R^2
4,42	$P = 14458 V_s^{-1,236}$	0,968
7,07	$P = 6239,7 V_s^{-1,208}$	0,987
17,68	$P = 1585,1 V_s^{-0,856}$	0,934
35,37	$P = 859,9 V_s^{-0,752}$	0,948

Como se ha descrito, existe un comportamiento similar en la distribución de los valores de profundidad en función de las diferentes densidades de energía aplicadas en cada tratamiento. Estos comportamientos se encuentran asociados a relaciones potenciales, habituales en los procesos de eliminación de material, en las cuales pueden observarse que los exponentes de dichas ecuaciones se mantienen en rangos próximos entre sí, lo que determina la similitud de los comportamientos en la profundidad de incidencia para las diferentes E_d empleadas en los tratamientos de texturizado de la aleación, como se muestra en la siguiente tabla. Asimismo, puede comprobarse que en todas las relaciones obtenidas se han determinado valores elevados de bondad de ajuste del modelo de regresión, superando el 93% en todos los casos estudiados para los diferentes valores de densidad de energía empleados.

La profundidad de eliminación de material a través de la incidencia del haz láser muestra pues un comportamiento descrito mediante modelos potenciales. Este hecho puede confirmarse además aislando los perfiles de huella obtenidos tras el proceso de texturizado, en el que se demuestra que la permanencia del haz en una misma sección del material durante periodos más elevados de tiempo, es decir a velocidades de barrido del haz más bajas, implican el desarrollo de surcos de mayor profundidad, como se muestra en la figura 2.

La incidencia del haz sobre valores significativos de profundidad, se produce mediante condiciones de irradiación que aportan cantidades de energía elevadas en secciones de área muy reducidas. La aplicación de estos tratamientos unida a la propia naturaleza de la interacción del haz láser de pulso corto (ns) con la aleación Ti6Al4V, provocan la vaporización del material mediante procesos térmicos. No obstante, estos procesos causan además modificaciones de la microestructura y composición del sustrato, dando lugar a variaciones de las propiedades mecánicas como la dureza.

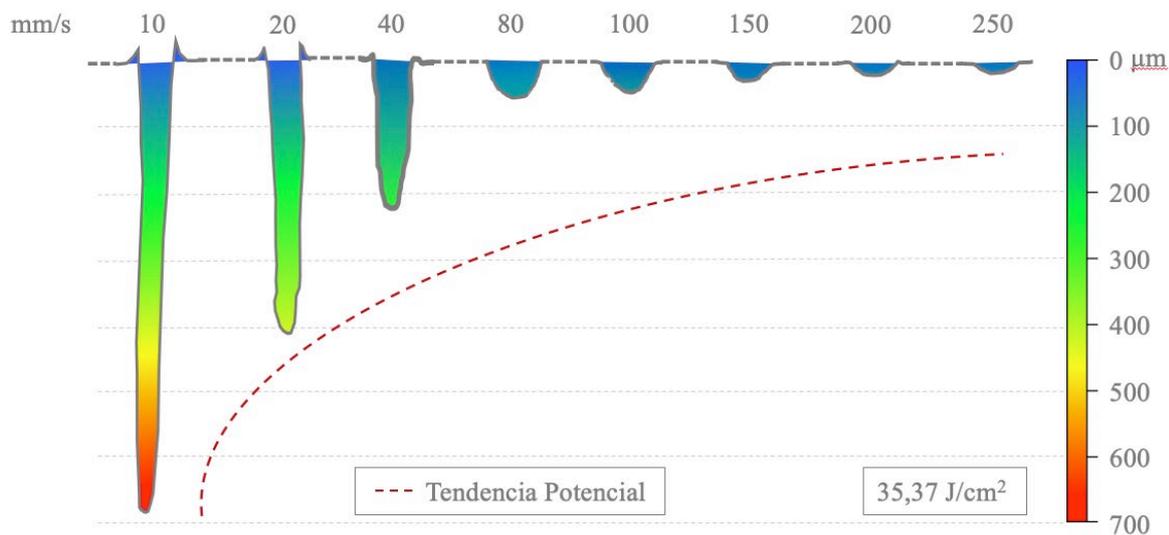


Figura 2: Profundidad de huella de textura láser en función de V_s para $E_d = 35,37 \text{ J/cm}^2$.

3.2. Influencia de los parámetros de tratamiento láser en el incremento de dureza de Ti6Al4V

El proceso de endurecimiento de la aleación Ti6Al4V mediante irradiación láser pulsada es un método avanzado que ha ganado atención significativa en la industria debido a sus efectos precisos y controlables sobre la microestructura del material. La interacción del láser con la superficie de la aleación provoca varios efectos fundamentales. Primero, la rápida absorción de energía lleva a una fusión superficial controlada del material, seguida de un enfriamiento rápido. Este ciclo térmico intenso induce cambios microestructurales significativos, como la formación de estructuras homogéneas de grano fino. Estos cambios suelen traducirse en mejoras en la resistencia mecánica y la dureza superficial del Ti6Al4V.

Además del efecto de endurecimiento, la irradiación láser también puede influir en la formación de óxidos en la superficie del material. Durante el proceso de fusión y solidificación rápida, pueden formarse óxidos superficiales debido a la interacción con el ambiente circundante. Estos óxidos pueden tener un impacto tanto positivo como negativo, por ejemplo, mejorando la resistencia a la corrosión, pero potencialmente afectando las propiedades mecánicas si no se controlan adecuadamente.

El endurecimiento de la superficie de Ti6Al4V durante el proceso de texturizado láser se produce debido a la combinación de ciclos térmicos extremos y cambios de fase del material, generados por la interacción del haz láser con la superficie del material. La energía altamente concentrada del láser provoca una fusión localizada y un posterior enfriamiento rápido, lo que da lugar a la modificación de la microestructura, incluyendo la formación de martensita acicular en la fase β y la redistribución de elementos de aleación en la matriz. Este proceso también genera tensiones residuales de compresión en la superficie debido a la contracción térmica, lo que contribuye adicionalmente al endurecimiento.

En los tratamientos de mayor aportación de energía y menor velocidad de barrido del haz, que propician surcos de textura de mayores dimensiones, se favorece la modificación desde la microestructura inicial del material en la que pueden identificarse las fases α y β (Figura 3.a) hasta una transición a estructuras de grano acicular, o finamente laminar, característica de transformaciones martensíticas de la aleación (Figura 3.b). La martensita se encuentra altamente distorsionada debido a la rápida solidificación, lo que introduce defectos cristalinos, como dislocaciones y límites de grano finos. Estos elementos actúan como barreras efectivas al movimiento de dislocaciones, aumentando significativamente la dureza. Además, la microestructura acicular de la martensita proporciona una distribución uniforme de tensiones, lo que refuerza la resistencia al desgaste y mejora la estabilidad mecánica bajo carga.

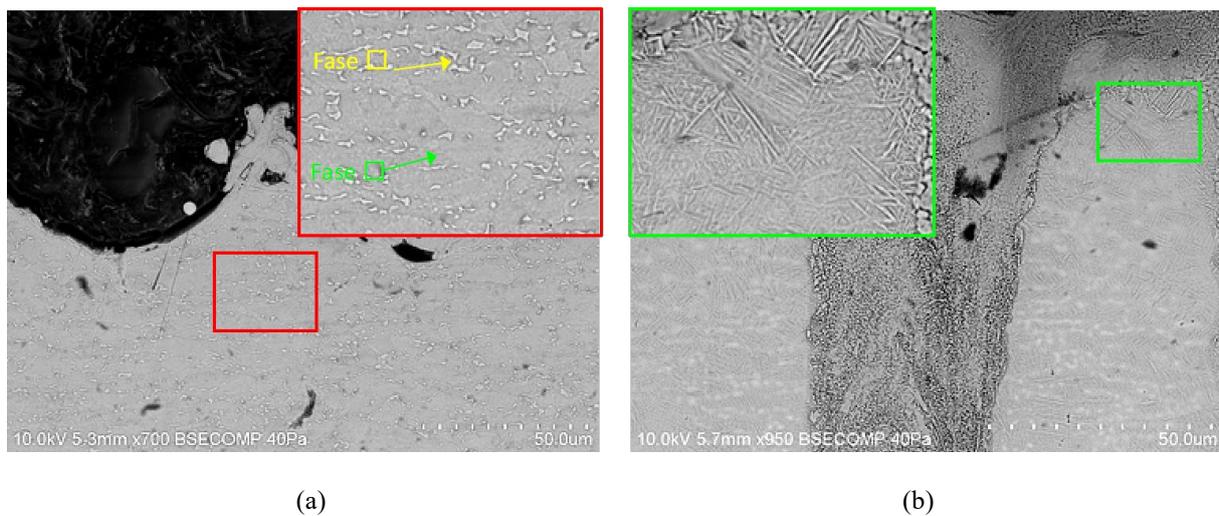


Figura 3: Microestructura de la aleación Ti6Al4V a) en secciones no afectadas por el tratamiento de texturizado; b) en secciones próximas a surcos laser bajo condiciones de texturizado severas

De esta forma, a partir de valores iniciales de dureza propios de la aleación en el entorno de 350HV, la aplicación de tratamientos de texturizado láser promueve el incremento de la dureza en secciones próximas a la región irradiada con valores que superan 900 HV, como muestra la figura 4. Este incremento de dureza se encuentra especialmente localizado para procesos de baja velocidad de barrido del haz, y condiciones de elevada densidad de energía, reduciéndose hasta valores nativos en función del aumento de Vs. Asimismo, el incremento de dureza en la aleación Ti6Al4V mediante tratamientos láser, también puede atribuirse a componentes de oxidación térmica debida a la formación de una capa superficial de óxidos, predominantemente dióxido de titanio (TiO₂), durante el tratamiento a altas temperaturas en presencia de oxígeno. Este proceso implica la difusión de oxígeno hacia la superficie del material y su reacción con el titanio, lo que da lugar a una capa de óxido adherente y resistente.

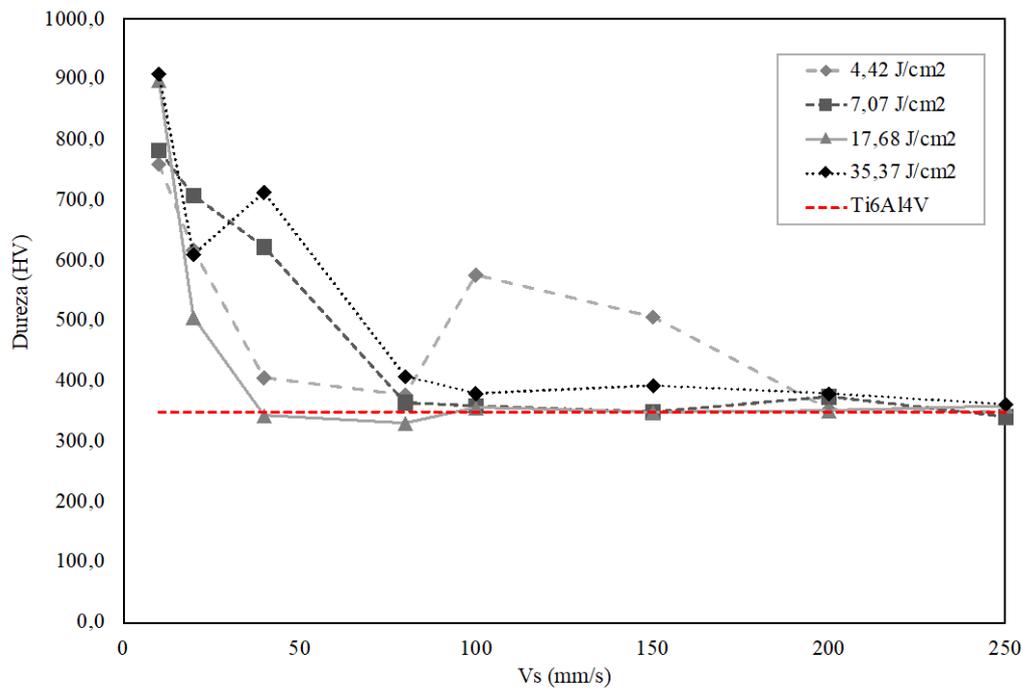


Figura 4: Comportamiento de la dureza del material en función de parámetros de procesado

Se observa que, para todas las densidades de energía, la dureza alcanza valores máximos en velocidades de barrido bajas, disminuyendo conforme aumenta la velocidad. Esto se debe a que las velocidades de barrido más lentas permiten un mayor tiempo de interacción entre el láser y el material, favoreciendo un ciclo térmico más intenso, la formación de microestructuras más finas, y posibles transformaciones como la generación de martensita o endurecimiento por óxidos. En particular, la densidad de energía más alta ($35,37 \text{ J/cm}^2$) presenta el incremento de dureza más significativo, superando los 900 HV en bajas velocidades de barrido, lo que sugiere un mayor efecto de endurecimiento superficial debido a la intensidad del tratamiento térmico. Sin embargo, a medida que aumenta la velocidad de barrido, los valores de dureza convergen hacia los de la aleación base, indicando un efecto térmico menos pronunciado.

Los procesos de oxidación térmica que tienen lugar en este tipo de técnicas dan lugar a cambios de tonalidad en la superficie de la aleación. La figura 5 muestra los cambios de tonalidad en la superficie de la aleación Ti6Al4V tras ser sometida a tratamientos con láser a distintas velocidades de barrido (V_s) y densidades de energía. Estos cambios de color se deben a la formación de películas de óxido de titanio (TiO_2) de diferentes espesores durante la interacción láser. La variación de tonalidades, que incluye colores como azul, púrpura, marrón y gris, está relacionada con la interferencia óptica de la luz en las películas delgadas de óxido, cuyo espesor depende del tratamiento térmico inducido por el láser. A bajas velocidades de barrido y altas densidades de energía, el tiempo de interacción prolongado genera mayor absorción de energía térmica, promoviendo una oxidación más intensa y la formación de películas más gruesas, lo que resulta en colores oscuros o marrones. Por el contrario, a altas velocidades de barrido o bajas densidades de energía, el menor aporte térmico produce capas más delgadas, reflejadas en tonalidades claras como azul o púrpura. Estos cambios de tonalidad no solo indican variaciones en la composición superficial, sino que también influyen en las propiedades funcionales de la superficie, como la resistencia al desgaste y la corrosión.

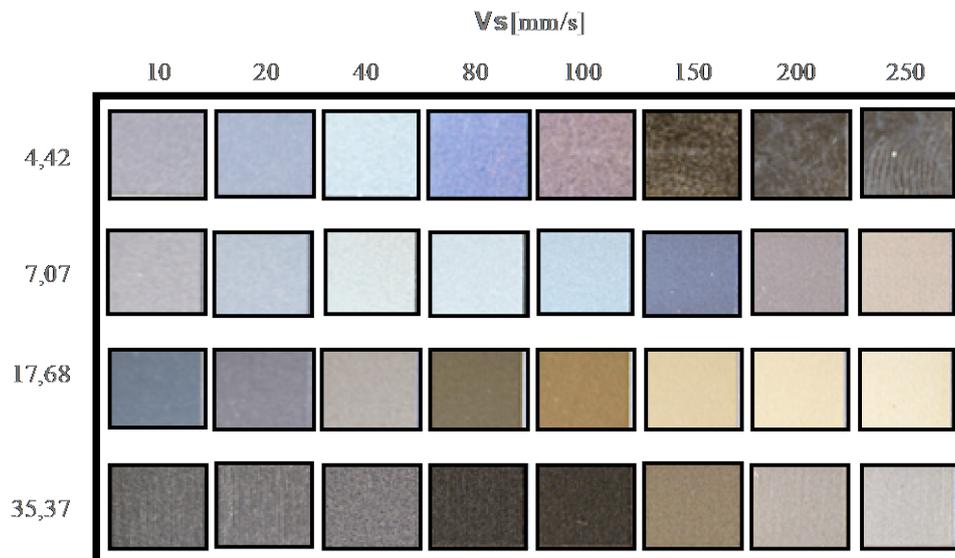


Figura 5: Variaciones de tonalidad debidas a oxidación térmica de la aleación Ti6Al4V

4. Conclusiones

El presente estudio demuestra la efectividad del tratamiento de endurecimiento superficial mediante láser pulsado de nanosegundos en la aleación Ti6Al4V cuando se emplean velocidades de barrido bajas, destacando su capacidad para modificar la microestructura e incrementar la dureza superficial del material. Los resultados obtenidos muestran que parámetros como la densidad de energía (Ed) y la velocidad de barrido del haz (Vs) tienen una influencia significativa en la profundidad de incidencia del haz y en la magnitud del endurecimiento logrado.

Se observó que velocidades de barrido bajas y densidades de energía elevadas favorecen la formación de microestructuras de grano fino y la transformación martensítica, alcanzando valores máximos de dureza superiores a 900 HV, en comparación con los 350 HV del material base. Este incremento se atribuye tanto a los cambios microestructurales inducidos por el tratamiento térmico del láser como a la formación de óxidos superficiales, especialmente dióxido de titanio (TiO₂), los cuales contribuyen a la resistencia mecánica y a la protección frente a la corrosión.

El análisis de las profundidades alcanzadas por el tratamiento láser indica que la relación entre la velocidad de barrido y la densidad de energía sigue modelos potenciales. Velocidades de barrido más lentas permiten una interacción más prolongada entre el láser y el material, generando surcos más profundos y promoviendo un mayor grado de transformación microestructural. Por otro lado, velocidades de barrido altas reducen el aporte térmico, limitando las modificaciones en la microestructura y los valores de dureza a niveles cercanos a los de la aleación base.

Además, los cambios de tonalidad observados en la superficie de las muestras, debidos a la formación de películas de óxido con espesores variables, confirman la interacción térmica del láser con el material. Estas variaciones de color reflejan no solo diferencias en la oxidación superficial, sino también posibles efectos funcionales, como una mejora en la resistencia al desgaste y a la corrosión.

En conclusión, el tratamiento láser pulsado de nanosegundos se presenta como una técnica precisa y eficiente para el endurecimiento superficial de la aleación Ti6Al4V, con la capacidad de ajustar las propiedades del material mediante el control de los parámetros de procesado. Los resultados obtenidos no solo validan el potencial de esta técnica en aplicaciones donde se requiera una mejora localizada de las propiedades mecánicas, sino que también aportan bases para optimizar los procesos industriales en función de los requerimientos específicos de diseño y funcionalidad.

5. Referencias

- [1] Boyer R.R., An overview on the use of titanium in the aerospace industry, *Materials science and engineering A213* 103-114 (1996).
- [2] Veiga C., Davim J.P., Loureiro A.J.R., Properties and applications of titanium alloys: A brief review, *Reviews on advanced materials science* **32** 133-148 (2012).

- [3] Davim J.P., Materials and surface engineering. Research and development, Woodhead publishing reviews. Mechanical engineering (2012).
- [4] Lawrence J., Waugh D.G., Laser Surface Engineering. Processes and applications, Woodhead publishing series in electronic and optical materials 65 (2015).
- [5] Joshi V.A., Titanium alloys; an atlas of structures and fracture features, CRC Taylor & Francis group (2006).
- [6] Ni C., Zhu J., Zhang B., An K., Wang Y., Liu D., Liu W., Zhu L., Liu C. Recent advance in laser powder bed fusion on Ti-6Al-4V alloys: microstructure, mechanical properties and machinability. *Virtual and Physical Prototyping* **20-1** (2025).
- [7] Joshi V.A., Titanium alloys; an atlas of structures and fracture features, CRC Taylor & Francis group (2006).
- [8] Srivastava M, Jayakumar V, Udayan Y, et al. Additive manufacturing of titanium alloy for aerospace applications: insights into the process, microstructure, and mechanical properties. *Appl Mater Today*. **41**:102481 (2024).
- [9] Balla VK, Soderlind J, Bose S, Bandyopadhyay A. Microstructure, mechanical and wear properties of laser surface melted Ti6Al4V alloy. *J Mech Behav Biomed Mater* **32**:335–44 (2014).
- [10] Vazquez Martinez, J. M., Del Sol Illana, I., Iglesias Victoria, P., & Salguero, J. Assessment the Sliding Wear Behavior of Laser Microtexturing Ti6Al4V under Wet Conditions. *Coatings*, **9(2)**, 67 (2019).
- [11] Ouyang W, Zhang L, Wu H, Wu D, Zhang S, Qin X, et al. Optimized mechanical properties of the hot forged Ti–6Al–4V alloy by regulating multiscale microstructure via laser shock peening. *Int J Mach Tool Manufact* **201**:104192 (2024).
- [12] J.M. Vázquez-Martínez, J. Salguero, F.J. Botana, J.P. Contreras, S. R. Fernández-Vidal, and M. Marcos. Metrological evaluation of the tribological behavior of laser surface treated Ti6Al4V alloy. *Procedia Engineering*, vol. **63**, pp. 752-760 (2013).
- [13] H. Lu, D. Wang, S. Wu, Z. Pan, G. Wang, G. Guo, Y. Tian, and D. Xiang. A review of laser polishing on Ti6Al4V based on energy density. *J. Mater. Process. Technol.* **331**, 118520 (2024).
- [14] Fazel M, Shamanian M, Salimijazi HR. Enhanced corrosion and tribocorrosion behavior of Ti6Al4V alloy by auto-sealed micro-arc oxidation layers. *Biotribology* **23**:100131 (2020).
- [15] Madapana D, Bathe R, Manna I, Majumdar JD. Laser surface structuring of titanium alloy (Ti-6Al-4V) for improved tribocorrosion resistance for bio-implant applications. *Tribol Int.* **197**:109711 (2024).
- [16] Y. Zhang, G.R. Ma, X.C. Zhang. Thermal oxidation of Ti-6Al-4V alloy and pure titanium under external bending strain: experiment and modelling. *Corros. Sci.*, **122** pp. 61-73 (2017).
- [17] A.A. Siddiqui, A.K. Dubey. Recent trends in laser cladding and surface alloying. *Opt. Laser Technol.*, **134** Article 106619 (2021).