

Comportamiento tribológico del acero AISI W112 con endurecimiento lineal mediante laser de ND:YAG.L.

R.Sagaró, J.S. Ceballos, A. Blanco, J. Mascarell.

Grupo Tribológico, Universidad de Oriente. Facultad de Ingeniería Mecánica.

Ave "Las Américas" s/n 90900, Santiago de Cuba, Cuba.

e-mail: sagaro@rsz.uo.edu.cu

(Recibido el 11 de enero del 2001, aceptado el 4 de abril del 2001.)

Resumen

Para disminuir el desgaste en los sistemas tribológicos frecuentemente se acostumbra a endurecer localmente aquellas zonas sometidas a desgaste. En el presente trabajo, para incrementar la dureza y la resistencia al desgaste del acero AISI W112 se empleó un láser de Nd:YAG. Las características de fricción y desgaste del acero AISI W112 en condiciones de contacto deslizante en fricción seca con el acero 65MN4 fueron evaluadas para tratamientos convencionales luego de su irradiación con láser. En el trabajo se presentan además las transformaciones que ocurren durante el tratamiento con láser, así como la influencia de los parámetros operacionales del láser en la profundidad de la capa endurecida y las características tribológicas. El trabajo experimental corroboró que la resistencia al desgaste del acero AISI W112 es varias veces superior en comparación con los tratamientos convencionales.

Palabras claves: Comportamiento tribológico, endurecimiento lineal, tratamiento superficial con láser.

1. Introducción.

El tratamiento superficial con láser de materiales metálicos ha recibido en los últimos tiempos gran atención [1,2,3] pues presenta notables ventajas con relación a los tratamientos convencionales. Por este medio se obtienen una amplia variedad de microestructuras, que contribuyen a mejorar la resistencia al desgaste de la superficie tratada mientras mantiene en el sustrato una buena tenacidad y ductibilidad. El acero AISI W112 es ampliamente utilizado en la fabricación de herramientas de corte e implementos agrícolas. En Cuba se emplea anualmente un millón de limas agrícolas y tiene que importar alrededor de un 90 % de unidades como consecuencia de la baja resistencia al desgaste de la lima PM-200C/A fabricada de acero AISI W112, recocida, tallada y templada hasta 61 HRC (735 HV). El presente estudio recoge los efectos de los parámetros operacionales del láser en la microestructura y el comportamiento tribológico.

2. Materiales y Procedimiento experimental.

Todo el trabajo experimental fue realizado con el acero AISI W112 con una microestructura correspondiente a una matriz de perlita globular (fig. 1). La tabla 1 muestra la composición química y dureza de las muestras.

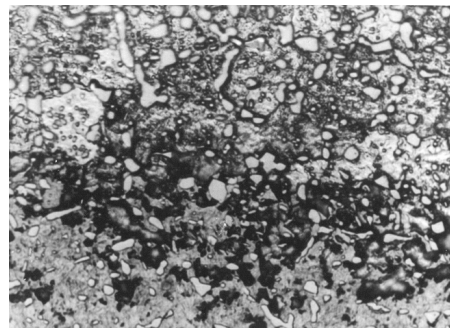
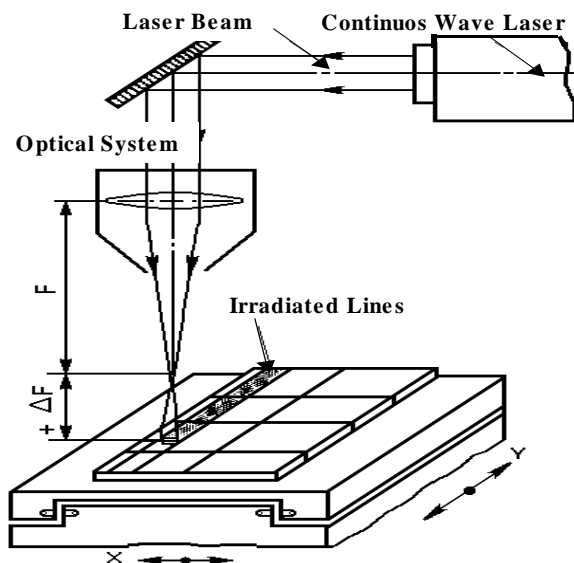


Figura 1. Microestructura antes del tratamiento con láser.

Tabla 1. Composición química del acero AISI W112.

Acero	Composición	Microestructura	Dureza (HV)
AISI.W112	1.25-1.35% C 0,15-0,35%Mn < 0,15 Cr	Perlita globular	224

El tratamiento fue llevado a cabo con un equipo láser de Nd:YAG. La figura 2 muestra la instalación experimental LTI 702. Las condiciones de operación se muestran en la tabla 2.

**Figura 2.** Instalación experimental.**Tabla 2.** Parámetros operacionales de la instalación láser LTI 702.

Longitud de onda: 1060 nm	Rango de potencia: 0÷120 W
Diámetro: 3 mm	Régimen de trabajo: Continuo
Divergencia: 2×10^{-3} rad.	Potencia garantizada: 120 W
Modo: TEM ₀₁	

El método de medición de cada una de las variables fue el siguiente:

- **Potencia láser:** La potencia de salida fue encontrada estable una vez medida durante reiteradas oportunidades. Las mediciones fueron realizadas por un potenciómetro ENLING con precisión de 0.1 W. Los valores de potencia seleccionados fueron: 100, 80 y 60 W.
- **Diámetro del haz:** Es el parámetro más difícil de medir. Muchas técnicas se emplean para su medición, en este trabajo se empleó la conocida

técnica del “quemado del papel” [4]. Los valores seleccionados fueron: 1.6, 1.1 y 0.6 mm.

- **Velocidad de barrido:** La medición de velocidad de la mesa x-y fue realizada electrónicamente. La precisión de las mediciones fue de ± 0.5 %. Los valores de velocidad seleccionados para las experiencias fueron: 1.5, 1.25 y 1 mm/seg.

Los estudios microestructurales y de microdureza fueron realizados en el microdurómetro SHIMADZU M. Para los estudios de microdureza y metalográficos se emplearon muestras de acero AISI W112 de 40 x 10 x 5 mm. El tratamiento de las probetas fue realizado con una pasada simple del rayo láser a lo largo del eje longitudinal de la sección de dimensión 5 x 10 mm, previamente cubierta con pintura spray negra.

Para determinar el efecto favorable en el comportamiento friccional y de desgaste del tratamiento láser se empleó un tribómetro del tipo bloque-cilindro. Para la obtención del coeficiente de fricción se aplicó a la zona de contacto entre el block y el cilindro cargas normales de 10.79, 43.44 y 76.04 N causando tensiones de contacto de Hertz efectivas de 40, 80 y 100 MPa respectivamente.

Los ensayos de desgaste fueron llevados a cabo a presiones de contacto (σ_c) de 100 MPa. Las mediciones del desgaste fueron realizadas por la pérdida en peso tanto para las muestras con tratamientos convencionales como para las tratadas con láser.

Las mediciones de rugosidad superficial se realizaron con el rugosímetro SURFTEST.

La tabla 3 recoge los materiales y dimensiones del block y del cilindro respectivamente.

3. Resultados.

Profundidad del endurecimiento y análisis microestructural.

El análisis matemático del trabajo experimental demostró que cada variable analizada no presentaba un efecto significativo por separado, sin embargo la interacción entre ellas sí, como ha sido reportado por Steen y Shang [5,6], y en opinión de los autores [7] el parámetro $P / (\sqrt{V.Dr})$ también. El promedio de las tres réplicas por experimento y realizado el análisis de regresión proporcionó el siguiente resultado:

$$PE = 0.0029.P / (\sqrt{V.Dr}) - 0.1136 \quad (1)$$

Donde:

PE : Profundidad del endurecimiento (mm)

P : Potencia del láser (w)

V : Velocidad de barrido (mm/ seg.)

Dr : Diámetro del haz (mm)

El error standard de PE fue ± 0.0514 y el coeficiente de correlación de 0.8539. Un buen ajuste considerando el

resultado de Steen (0.89).

La tabla 4 muestra los resultados de los experimentos.

Tabla 3. Materiales para los estudios de fricción y desgaste.

Probetas	Dimensión (mm)	Materiales	Rugosidad superficial Ra (μm)
Cilindro	$\varnothing 40 \times 12$	Acero 65MN4 , Templado (593-548 HV). Composición Química: C= 0.62-0.64 % , Si=0.307-0.318 % , Mn=1.02-1.03 % , P = 0.02-0.021 % , S = 0.005-0.006 %	6.5
Bloque	10 x 10 x 12	Acero U13A 1, templado bajo diferentes condiciones: <ul style="list-style-type: none"> • Muestras 1-9 tratamiento con láser HV=1379-842. • Muestra 10 temple en sales y revenido HV=868. • Muestra 11 temple en sales HV=1022-941. • Muestra 12 temple por alta frecuencia y revenido HV=941-868. • Muestra 13 temple por alta frecuencia HV=941. 	0.8-0.9

Tabla 4. Parámetros y resultados de los experimentos.

Nº	P	V	Dr	PE	HV	V. Dr	$\sqrt{V \cdot Dr}$	$P/\sqrt{P \cdot Dr}$
1	60	1.00	0.60	0.11	966.0	0.6	0.77	77.46
2	100	1.00	0.60	0.26	1379	0.6	0.77	129.10
3	60	1.50	0.60	0.07	1449.0	0.9	0.95	63.25
4	100	1.50	0.60	0.19	1300	0.9	0.95	105.41
5	60	1.00	1.60	0.02	959	0.9	1.26	47.43
6	100	1.00	1.60	0.07	851	1.6	1.26	79.06
7	60	1.50	1.60	0.02	1033	1.6	1.55	38.73
8	100	1.50	1.60	0.04	926	2.4	1.55	38.73
9	80	1.25	1.10	0.06	1072.0	1.4	1.17	68.22

Es bien conocido que existe una estrecha relación entre la microestructura y el desgaste de los aceros y los hierros fundidos [8,9]. Así por ejemplo, la martensita, con una alta microdureza presenta la mejor resistencia al desgaste, la ferrita, sin embargo presenta un comportamiento desfavorable. De esta manera se considera oportuno determinar el efecto del tratamiento superficial con láser en los cambios microestructurales y la penetración del endurecimiento, como una manera de establecer la dependencia de la resistencia al desgaste con los parámetros de operación del láser y su relación con la microestructura y la profundidad del endurecimiento.

La influencia de las condiciones de operación del láser puede analizarse como sigue. La velocidad de barrido presenta un efecto negativo en la profundidad del endurecimiento (PE), es decir un incremento de la velocidad de barrido (V), provoca un decrecimiento de PE como consecuencia de un disminución del tiempo de

interacción (t) y que el gradiente térmico (ΔT) no es lo suficiente para penetrar en el sustrato a grandes profundidades. El diámetro del haz provoca una influencia similar. Un incremento de Dr produce un decrecimiento de PE como consecuencia de la disminución de la densidad de potencia.

Sin embargo, un incremento de la potencia del láser, aumenta la densidad de potencia y de esta forma se alcanzan los mayores valores de penetración del endurecimiento para este tipo de tratamiento térmico. Un resultado importante, sin lugar a dudas, lo constituye el valor de microdureza obtenido en el ZAC, superior a los 1000 HV, a profundidades de endurecimiento de 260 μm . La figura 3 muestra la dependencia gráfica entre la microdureza obtenida y la profundidad del endurecimiento para la mejor condición de las experiencias (P= 100W, V=1 mm/seg. y Dr = 0.6 mm).

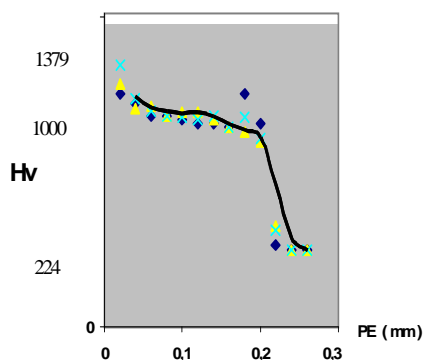


Figura 3. Relación entre microdureza y penetración del endurecimiento.

Los ensayos microestructurales fueron realizados en el Centro de Investigaciones para el Desarrollo Nuclear. Estos resultados muestran (Figura 4) un área afectada con cuatro zonas bien definidas. El análisis de la microestructura luego del tratamiento con láser mostró transformaciones martensíticas en una zona superficial de granos muy finos. Esta zona, que coincide con el diámetro del haz incidente, y que ocupa aproximadamente el 50 % del ZAC, presentaba una microdureza de 1283-927 HV. A continuación una zona igualmente bien definida con martensita no tan fina y perlita (Zona de influencia térmica). La microdureza de esta zona es de alrededor de 857-733 HV. Existía una tercera zona (zona de transición) con presencia de perlita, trostita y martensita con microdureza de 425 HV. Finalmente el sustrato presentaba una estructura a base de perlita con una microdureza de 224 HV.

Figura 4: Sección transversal del acero W112 luego del tratamiento con láser.



3.2. Ensayos de fricción y desgaste.

Para los ensayos tribológicos se empleó un tribómetro convencional MEFD del tipo block- cilindro, bajo condiciones de fricción seca. Las experiencias fueron realizadas para velocidades de deslizamiento de 0.8 m/seg. y 2400 ciclos de duración (1 hora). Los ensayos

de fricción fueron realizados con un incremento progresivo de la presión de contacto de 40, 80 y 100 MPa respectivamente. El sentido del tratamiento con láser fue considerado perpendicular a la línea de contacto block- cilindro. La presión de contacto empleada en los ensayos de desgaste σ_{max} , se determinó:

$$\sigma_{max} = 0.564 * \left[\frac{P^1}{R * \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}} \right]^2 \quad (2)$$

$$P^1 = \frac{F_n}{1_n} \quad (3)$$

Donde:

F_n : Carga normal.

E_1 y E_2 : Módulos de Elasticidad del block y cilindro.

μ_1 y μ_2 : Coeficientes de Poisson de cada material ensayado.

l : Longitud de la zona de contacto.

R : Radio exterior del cilindro.

A_n : Área nominal de contacto $A_n = 0.634 \text{ mm}^2$.

Con el marcado propósito de evaluar comparativamente los diferentes tratamientos se introduce el coeficiente $K = W_{gc}/W_{gp}$, donde:

W_{gc} - Desgaste en peso del cilindro.

W_{gp} - Desgaste en peso del block.

Las tablas 5a y 5b muestran los resultados de las pruebas de desgaste.

Tabla No 5a. Desgaste Gravimétrico. Tratamientos Convencionales $W_g * 10^{-4} \text{ (g)}$.

Cilindro		Block	K= W_{gc}/W_{gp}
$W_{gc} * 10^{-4} \text{ (gr.)}$		$W_{gp} * 10^{-4} \text{ (gr.)}$	
10	108	25	4.3
11	47	7	6.7
12	124	62	2
13	103	93	1.1

Tabla No 5b : Desgaste Gravimétrico $W_g \cdot 10^{-4}$ (g). TTSL.

Cilindro		Block	Block	K = W_{gc}/W_{gp}
$W_{gc} \cdot 10^{-4}$ (gr.)		$W_{gp} \cdot 10^{-4}$ (gr.)	Wh (mm)	
1	63	5	0.09	11.3
2	79	3	0.06	26
3	42	2	0.04	21
4	58	7	0.14	8.2
5	21.3	100	2	0.21
6	51	21.4	0.42	3.6
7	41	293	3.8	0.15
8	78	27	0.54	2.9
9	72	46.8	0.94	1.8

Donde:

Wh es el desgaste lineal (mm).

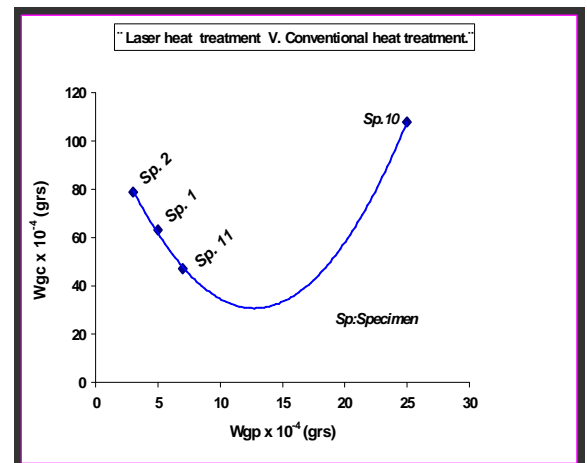
La dependencia matemática entre el desgaste y las condiciones de operación del láser para el acero W112 puede expresarse de acuerdo a un simple análisis de regresión:

$$W_{gp} = 0.0177(V.Dr) - 1.68 \cdot 10^{-4}(P.Dr) - 0.039 \quad (4)$$

De acuerdo a estos argumentos se puede concluir que aquellos parámetros de operación del láser que conllevan a un incremento de la profundidad de la capa endurecida y a una alta dureza, en igual medida contribuyen a un incremento de la resistencia al desgaste del acero W112 en fricción seca con el acero 65Mn4. Como en las limas agrícolas es necesario garantizar una alta resistencia al desgaste a la vez que producir la abrasión en la herramienta de corte, para los tratamientos térmicos convencionales el de mejor comportamiento lo presentaron las muestras templadas en sales sin revenido, de acuerdo a los valores del coeficiente K ($K=6.7$), sin embargo este resultado fue superado ampliamente por las muestras tratadas con láser según las condiciones 1,2,3,4 y especialmente el caso 2, tratado con la mayor potencia incidente, la menor velocidad de barrido y el menor diámetro del haz ($K=26$). Aquellos casos de TTSL y que sin embargo presentaron una baja resistencia al desgaste, la causa puede estar motivada por una insignificante penetración del endurecimiento y una rápida destrucción de la capa endurecida durante los ensayos[8]. Estos planteamientos son corroborados por los resultados de las tablas 4 y 5. Como puede observarse en los casos 1,2,3,4, el desgaste lineal no excede la capa endurecida por el TTSL (PE), donde el endurecimiento ha provocado un incremento

de la resistencia al desgaste, mientras que en las muestras 5, 6, 7, 8 y 9, la capa endurecida ha sido destruida y la existencia de otras estructuras metalúrgicas con una baja resistencia al desgaste en comparación con la estructura martensítica (perlita, trostita, etc.) produce un alto desgaste. Los substratos blandos son también propensos a provocar un incremento del desgaste. Esta razón justifica las propuestas de algunos autores acerca de la necesidad de pre- tratamientos.

Para la obtención de la mejor combinación de todos los casos se valoró el desgaste del block y el cilindro como un sistema, considerando la condición más favorable la de menor desgaste del block de acero W112 y de mayor desgaste del acero 65MN4. La figura 6 confirma estos planteamientos.

**Figura 6.** Sistema de desgaste block-cilindro.

La figura 6 muestra que las probetas 1 y 2 (tratadas con láser) presentaron los mejores resultados respecto al

análisis del sistema de desgaste para los TTSL y los tratamientos convencionales (sp.1 y 2).

Uno de los aspectos más contradictorios es el relacionado a la superposición de bandas endurecidas [9,10]. La experiencia de los autores en este aspecto es a considerar una influencia negativa por el efecto de revenido que provoca cambios microestructurales con baja resistencia al desgaste. La figura 7 muestra la microdureza de bandas con y sin superposición.

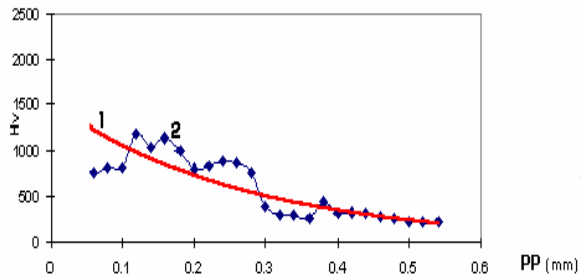


Figura 7. Microdureza v. Profundidad del endurecimiento de la banda endurecida (1) y para bandas superpuestas (2).

Las tablas 6a y 6b presentan el comportamiento de los valores máximos del coeficiente de fricción para las muestras tratadas con láser y para los tratamientos convencionales para presiones de contacto de 40, 80 y 100 MPa, bajo condiciones de fricción seca y tiempo de deslizamiento de 45 minutos.

Tabla No 6a: Variación del coeficiente de fricción (f). Tratamientos con láser

Presión de contacto Pc (MPa)			
	40	80	100
1	0.28	3	1.58
2	0.41	2.1	1.07
3	0.62	3	1.37
4	0.76	2.8	1.33
5	0.69	2	1.16
6	0.56	2.3	1.27
7	1.01	2.2	1.87
8	0.73	2.6	1.26
9	0.89	2.5	1.38

Tabla No 6b: Variación del coeficiente de fricción (f). Tratamientos convencionales.

Presión de contacto Pc (MPa)			
	40	80	100
10	1	2.67	2
11	0.76	3.3	2.13
12	0.92	3.4	2.13
13	1.06	3.42	2.7

De las tabla 6a y 6b se puede observar que en ambos casos (con y sin tratamiento láser), el coeficiente de fricción presentó similares comportamientos. Como se observa se manifiesta una tendencia a incrementar el valor de f con la presión de contacto para finalmente caer para $P_c = 100$ MPa. Sin embargo existe una diferencia significativa pues las muestras tratadas con láser presentaron una disminución en los valores del coeficiente de fricción en todo el rango de presiones de contacto ensayadas.

La variación de los valores máximos y mínimos del coeficiente de fricción seco del para aceros AISI W112/65MN4 indican en nuestra opinión la existencia del fenómeno conocido como “stick-slip”, asociado con las altas presiones de contacto, duración del deslizamiento y la compatibilidad metalúrgica de los materiales ensayados, lo que sugiere la aparición del agarramiento y la soldadura en frío.

4. Conclusiones.

Como resultado de un arreglo factorial de experimentos, los modelos experimentales y matemáticos obtenidos arrojan las siguientes conclusiones:

- La profundidad del endurecimiento guarda una estrecha relación con el parámetro $P/\sqrt{D.V}$, como ha sido sugerido en [4]. La potencia del haz de láser favoreció la máxima penetración del endurecimiento. Un incremento de la velocidad de barrido y del diámetro del haz, sin embargo, tienen un efecto negativo en este sentido.
- Los análisis metalúrgicos sugieren cuatro zonas bien definidas: a) una zona total martensita con granos muy finos en forma de agujetas, b) un área de martensita + perlita, c) una zona de transición de martensita + trostita + perlita y d) el material base como sustrato con una matriz perlítica. Todas estas estructuras tienen diferentes aptitudes en condiciones de desgaste.
- Del modelo matemático obtenido se desprende que aquellos parámetros que favorecen la mayor penetración del endurecimiento garantizan un

bajo desgaste. En tal sentido el coeficiente K demostró el efecto más favorable en cuanto a la resistencia al desgaste a los materiales tratados con láser (condiciones de operación 1, 2, 3 y 4) en comparación con los tratamientos convencionales.

- Las bandas superpuestas producen microestructuras no deseables, una disminución de la dureza y la resistencia al desgaste.
- El comportamiento del coeficiente manifestó una tendencia a incrementar su valor con la presión de contacto para luego caer para todos los tratamientos ensayados. En todo el rango de presión de contacto, los materiales tratados con láser presentaron un coeficiente de fricción significativamente más bajo que para los tratamientos convencionales.

5. Bibliografía.

1. Amende, W. Laser surface treatment, transfer of scientific result to practical. Laser Treatment of material. Edited by Barry, L.M. (1986).
2. Eckersley, J. Laser applications in metal surface hardening. Advanced surface treatments. Pergamon Press (1984).
3. Damborenea, J. Tratamiento superficial con láser: temple de aceros inoxidables martensíticos. Metalurgia .Madrid, 26 (1990).
4. Steen, W. Laser Processing Material. Springer-Verlag. London (1991).
5. Steen, W. Surface heat treatment of En8 steel using a 2Kw continuous wave CO₂ laser. Metals Technology , December 1979.
6. Shang,H. On the width and depth of hardened zones during laser transformations hardening of tool steel. Journal of Material Processing Technology 23, 1990.
7. Sagaro, R. Surface treatment of U8 steel using a Nd:YAG laser. Metallurgy., Madrid, (2),1998.
8. Ruiz, J. et al. Effect of surface laser treatment on the microstructure and wear behaviour of grey iron. Materials & design, vol. 17, No. 5/6.
9. Gnanamuthu, D.Laser –solid Interactions and laser processing-1978. American Institute of Physics.1979.
10. Vischer, H. The influence of laser line hardening of carbon steel AISI 1045 on lubricated wear against steel AISI 52100. Wear of Materials Conference, EU.1976.

Tribological behavior of AISI W112 steel with lineal hardening by means of Nd:YAG laser.

Abstract.

Diminishing wear in tribological systems is usually done by locally hardening those areas subject to wear. In this paper is presented the increasing of hardness and resistance to wear of AISI W112 steel by means of a Nd:YAG laser. The characteristics of friction and wear of AISI W112 steel under sliding contact in dry friction conditions with the 65MN4 steel were evaluated for conventional treatments and after laser irradiation. In the work are presented the transformations that take place during the laser treatment, as well as the influence of the laser operational parameters in the depth of the hardened layer and the tribological characteristics. The experimental work corroborated that the resistance to wear of AISI W112 steel is several times superior in comparison with conventional treatments.

Key words: Tribological behavior , lineal hardening, laser superficial treatment.