

COMPORTAMIENTO AL DESGASTE POR CONTACTO RODANTE DE UN ACERO DE BAJA ALEACION AL CROMO - MOLIBDENO

J.E. Romero C.^{1*} y E. Rondón²

¹ Centro de Investigación en Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

² Laboratorio de Predicciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

*joromer@uc.edu.ve

RESUMEN

Se describe una investigación para la caracterización del comportamiento de desgaste por rodamiento del acero AISI 4140. Se realizaron ensayos de desgaste por contacto rodante en seco y con un lubricante (mineral R&O ISO46), en un tribómetro tipo anillo sobre anillo. Los parámetros seleccionados, fueron: La carga normal (50 y 100 N), relación de velocidades (10 y 30%) y el tiempo (2,5x10⁵ y 1x10⁶ ciclos). Se analizaron las características de las huellas de desgaste por microscopía óptica y se determinó el coeficiente de desgaste en seco. Se identificó que los desechos de desgaste se generan por mecanismos de adhesión, deformación cíclica simple y deformación cíclica repetida. El resultado del coeficiente de desgaste promedio sin lubricante fue $k_A = 1,54 \times 10^{-05} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ y $k_B = 1,69 \times 10^{-04} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$. para las condiciones evaluadas.

Palabras Clave: Tribología, Degaste por contacto rodante, Fatiga por contacto rodante

ABSTRACT

An investigation for the characterization of the bearing wear behavior of AISI 4140 steel is described. Rolling contact wear tests were carried out, dry and with a lubricant (mineral R & O ISO46), in a ring-on-ring tribometer. The parameters selected were: normal load (50 and 100 N), speed ratio (10 and 30%) and time (2.5x10⁵ and 1x10⁶ cycles). The characteristics of the wear traces were analyzed by optical microscopy and the coefficient of dry wear was determined. It was identified that wear debris is generated by adhesion mechanisms, simple cyclic deformation and repeated cyclic deformation. The result of the average wear coefficient without lubricant was $k_A = 1.54 \times 10^{-05} \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ and $k_B = 1.69 \times 10^{-04} \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$. for the conditions evaluated.

Keywords: Tribology, rolling contact wear, rolling contact fatigue

INTRODUCCIÓN

Para fines de ingeniería, se considera el desgaste como un daño progresivo a una superficie causado por un movimiento relativo con respecto a otra sustancia [1]. Un aspecto significativo de esta definición amplia, es que el desgaste es un daño y no se limita simplemente a la pérdida de material o masa o cambios dimensionales. Un ejemplo de esto podría ser el desarrollo de una red

de grietas en una superficie [1]. Este tipo de daño es característico en aplicaciones que involucran engranes y levas, en el que el contacto por movimiento rodante es su mecanismo de movimiento. En este trabajo se describe una investigación para la caracterización del comportamiento de desgaste por rodamiento de un acero de baja aleación al cromo molibdeno como el AISI 4140, ensayado en un dispositivo de desgaste de dos cilindros o anillos con y sin lubricante.

METODOLOGÍA

Preparación de probetas y caracterización superficial de los materiales

En cuanto a la manufactura de las probetas del acero AISI 4140, se realizó mediante un mecanizado en torno, siguiendo la geometría y dimensiones especificadas por León y Pinto [2] en su investigación, a partir de un tocho de acero AISI4140 de 0,5 m de longitud. En cuanto a la preparación, a las probetas se les realizó una limpieza en baño ultrasónico alcohol y acetona, con la finalidad de eliminar en lo posible todo residuo en la superficie.

Se realizó una determinación inicial de la rugosidad promedio R_a en sentido circunferencial utilizando un rugosímetro de punta de diamante y la dureza en un durómetro Rockwell.

Máquina de ensayos y selección de los parámetros de ensayo

Los ensayos de desgaste por rodamiento se llevaron a cabo en un tribómetro tipo anillo sobre anillo que se encuentra disponible en el Laboratorio de Predicciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo, el cual es un desarrollo propio [3] [2], y su arreglo se muestra en la figura 1. En este tribómetro al energizar el sistema (1) se tiene por medio de la acción de motores, el giro de los ejes donde se posicionan los especímenes, es decir, el motor 1 (inferior) (5) acciona el eje que contiene la probeta tipo B (4), mientras que el motor 2 (superior) (2) hace girar el eje de la probeta tipo A (3), siendo este último el que posee el sistema de la carga normal (6) que se aplica sobre los especímenes y estando la probeta tipo B en contacto con el lubricante que se encuentra en el recipiente (8). Los parámetros que se pueden controlar en el tribómetro descrito son la carga normal, velocidad de deslizamiento, la relación de velocidades y distancia o tiempo de duración del ensayo.

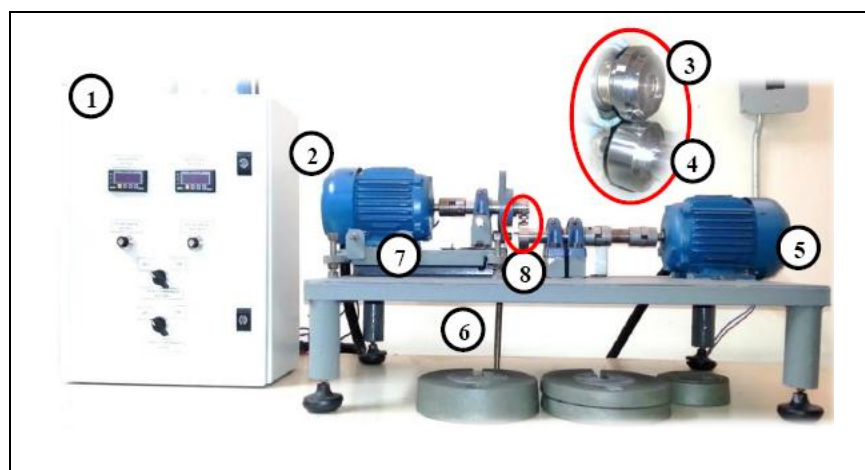
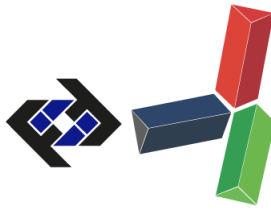


Figura 1. Arreglo general del tribómetro tipo anillo sobre anillo



La matriz de ensayo se planificó en función de evaluar los tres parámetros antes mencionados, para elementos de máquinas y considerando las limitaciones del equipo de ensayo. Los porcentajes de relación de velocidades se ajustan a situaciones promedio de deslizamiento que puedan estar sometidos elementos de máquinas tal como en dientes de engranajes rectos y helicoidales, considerando las velocidades de operación del tribómetro disponible para una relación de 10% se emplean 2.000 rpm para el motor 1 (inferior) y 2200 rpm para el motor 2 (superior) y para una relación de 30% son 2000 y 2600 rpm, respectivamente. La distancia recorrida escogida, hace referencia a la posibilidad de reproducir el fenómeno de la fatiga superficial que podría presentarse a partir de 10^5 y 10^6 ciclos, en superficies de aceros altamente pulidas [4]. Así mismo, tomando en cuenta limitaciones de valores operacionales permisibles por el tribómetro se optó por dos niveles de estudio para la carga aplicada: 100 N y 50 N. Las pruebas se realizaron en condiciones sin lubricante y con acetite mineral con protección contra la herrumbre y la oxidación (R&O) de viscosidad ISO46 y ambiente normal en laboratorio.

Diseño experimental y análisis de los datos

Para la selección de la cantidad de experimentos se emplea el método de Taguchi [5], que no es más, que la aplicación de una serie de matrices ortogonales que indica los experimentos a realizar para encontrar un buen resultado, realizando un número de ensayos relativamente reducido. De este modo, se seleccionó una combinación L4, que contempla el empleo de tres parámetros en dos niveles cada uno, para un total de cuatro (4) experimentos (Tabla 1) sin repeticiones, realizados en presencia de un lubricante. Además de esto, se realizaron dos experimentos más (Tabla 2), sin presencia de lubricante.

Tabla 1. Matriz de ensayos con lubricante

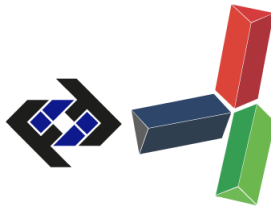
Experimento	Carga (N)	Relación de Velocidad (%)	Tiempo (Ciclos)
1	50	10	$2,5 \times 10^5$
2	50	30	1×10^6
3	100	10	1×10^6
4	100	30	$2,5 \times 10^5$

Tabla 2. Matriz de ensayos sin lubricante

Experimento	Carga (N)	Relación de Velocidad (%)	Tiempo (Ciclos)
5	100	30	$2,5 \times 10^5$
6	50	30	1×10^6

Caracterización del desgaste, determinación del volumen y coeficiente de desgaste

Una vez realizados las pruebas, la huella producida fue sometida a una inspección visual y por microscopía óptica en un microscopio metalográfico a fin de determinar la condición final de las probetas. Adicionalmente, se procedió calcular el volumen del desgaste sufrido por las probetas



ensayadas en seco, a partir de la medición del ancho y profundidad de la huella mediante la utilización de un perfilómetro y usando las ecuaciones presentadas en [2]. El coeficiente de desgaste por su parte se calculó a partir de la ecuación de Archard [6] tomando como base el volumen de desgaste, la dureza y los parámetros utilizados en cada ensayo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mecanismo de desgaste

El desgaste en algunas de las superficies de las probetas ensayadas, en presencia de lubricante y en seco, se pueden observar en las fotografías de las figuras 2.

En una evaluación general por inspección visual de las huella de desgaste mostradas en las micrografías de las figuras 3 a 8, tenemos que parte de las marcas, micro fisuras y/o grietas poco profundos que se observan en las probetas estudiadas y que forman parte de lo teóricamente esperado, están relacionadas a lo que llaman micro-picaduras (alrededor de las 10 μm) esto pueden ser el resultado de un aumento de la carga, disminución del espesor del espécimen y la presencia de deslizamiento, así como también, la transferencia de material, factores que aumentan la tasa de este tipo de desgaste [7]. También, se logró observar descamaciones poco profundas (flakings) que oscilan de 3 a 30 μm , donde la superficie empieza a pelarse fácilmente, característico cuando la dureza de al menos uno de los elementos rodantes de acoplamiento es baja, tal como menos de 58 HRC, o cuando la rugosidad de la superficie de uno de los elementos rodantes de acoplamiento es áspera [8].

Es importante resaltar, que la huella que se presenta la probeta B1 (Figura 3b) es similar a lo que Tallian [9] denomina astillamiento por fatiga, las imágenes al ser comparadas, podrían estar presentando el mismo tipo de desgaste. En general se puede intuir, que más allá del desgaste adhesivo, hubo otros tipos de desgaste presentes en las probetas ensayadas del tipo A y B, estando asociadas a micro marcas que según los autores varían en sus nombres como la micro-peladura, la descamaciones poco profundas o peladuras por fatiga, que Bayer [1] clasifica como sub grupos de deformación cíclica simple y deformación cíclica repetida.

En relación a la cantidad de marcas (huella), sus tamaños o sus profundidades visibles, se puede decir, que la probeta tipo B (menos cantidad de huellas, pero tamaño superiores en comparación a las tipo A) estuvo influenciada por el contacto directo al lubricante, una vez se forme una pequeña marca o grieta, ésta se llena de lubricante al acercarse el cierre del rodillo, y se cierran a presión oprimiendo al fluido atrapado en ellas. La presión del fluido crea un esfuerzo a tensión en la punta de la grieta, generando un crecimiento rápido de la misma y una ruptura subsecuente formando un picado [4].

En las probetas A1 y A4 se observa (Figura 3a y 6a) un desgaste pobre en la superficie, mostrando que las marcas de desgaste presente es adhesivo logrando sobre ellas como un pulido. Evidentemente se puede percibir como el desgaste es mayor en la probeta A4. Así mismo, se aprecia la aparición de pequeños grietas o descamaciones, observándose a la probeta A4 como la más desgastada.

En las probetas A2 y A3 (Figura 4a y 5a), el desgaste es adhesivo siendo éste más severo y uniforme respecto a las probetas A1 y A4. El espécimen A2 se ve con mayor desgaste que puede atribuirse al un mayor deslizamiento; pero el espécimen A3, es quien posee más marcas como especie de grietas poco profundas, siendo éstos también de mayor área. Se logra apreciar, como la combinación de baja carga aplicada y alto deslizamiento o viceversa, puede originar una superficie similar de desgaste. Es importante resaltar, que se observan ciertos desgastes de forma ondulada, como consecuencia de las vibraciones que aún posee el tribómetro.

Los especímenes ensayados sin presencia de lubricante, A5 y A6, son los que pueden observarse

(figura 7a y 8a) con un desgaste severo, en forma de combinación de desgaste adhesivo y abrasivo, sin embargo, suelen diferenciarse por las marcas o micro fisuras más pronunciadas en A5; es A6 quien presenta un desgaste abrasivo más uniforme, atribuido al largo tiempo de duración del ensayo ya que el deslizamiento es el mismo en ambas pruebas.

Las probetas tipo “B” son las que durante los ensayos tenían contacto directo con el lubricante, es por ello que se percibe un menor desgaste general de las probetas (ver Tabla 1). Sin embargo, comparando B1 y B4, ambas probetas con la misma duración de ensayo (Figura 3b y 6b), puede observarse que este primer espécimen reporta menos desgaste superficial pero sus marcas o astillamientos son de tamaño más grande respecto a B4. Se evidencia como esta última probeta tiene un amplio desgaste en la zona de contacto debido a la eliminación de asperezas o irregularidades de material (rugosidad) y las partículas de desgaste que se eliminan de la superficie quedando sumergidas en el lubricante contenido en el recipiente; esto se encuentra relacionado a un deslizamiento mayor.

Los especímenes B2 y B3 (Figura 4b y 5b), se ven muy similares en cuanto a desgaste superficial que se podría intuir a la adhesión y remoción de material en áreas puntuales, el cual se debe a la compensación de una baja carga aplicada y un alto deslizamiento, así como también a alta carga de aplicación y bajo deslizamiento. No obstante, puede verse como la probeta B3 tiene mayor cantidad de marcas o especie de grietas, siendo también más pronunciados, y se puede intuir a la presencia de una combinación entre astillamiento y fatiga superficial.

Se puede apreciar que la probeta B5 (Figura 7b) tiene un desgaste superficial uniforme en comparación a B6 (Figura 8b) , atribuido al deslizamiento y a la duración de ensayo más prolongada de esta última probeta, donde el material removido puede quedarse en él por un tiempo y luego ser arrancado de manera brusca (influyendo el deslizamiento) dejando huellas un poco profundas. En general, el tipo de probetas que presentó mayor desgaste superficial y más huellas, son las de tipo A; las probetas tipo B a pesar que las marcas de desgaste fueron menor, son donde las huellas tienen un mayor tamaño y más profundidad.

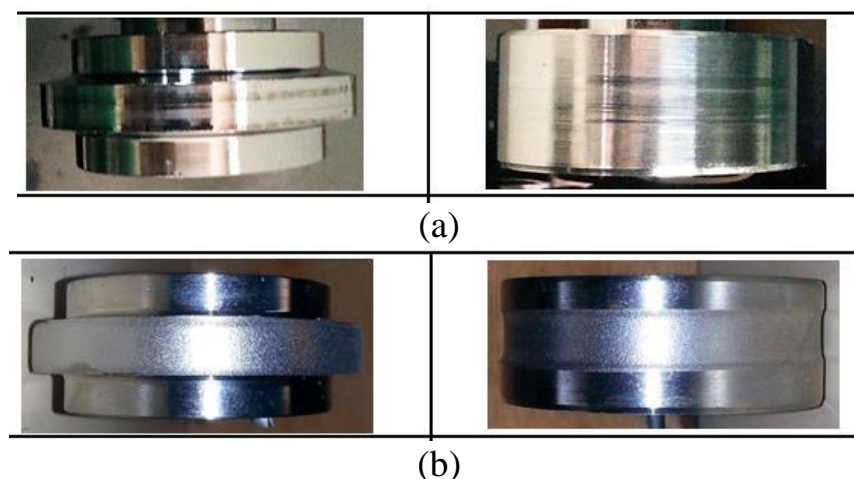
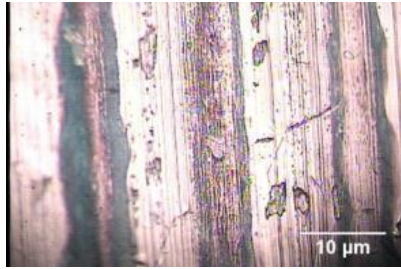
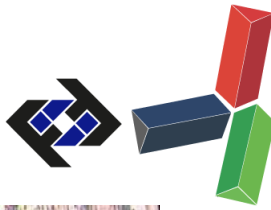
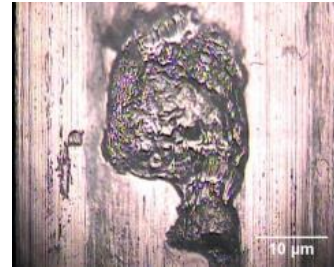


Figura 2. Fotografías de la huella de desgaste del acero ANSI 4104 (a) con lubricante del experimento 1 (b) sin lubricante del experimento 5

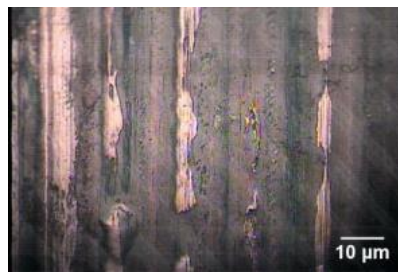


(a) Probeta A

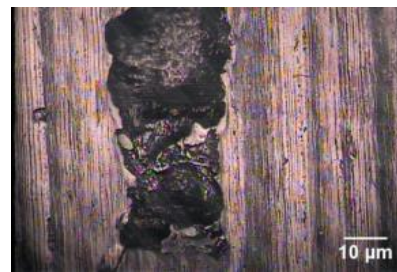


(b) Probeta B

Figura 3. Micrografías obtenidas por microscopía óptica a 200x de la huella de desgaste del experimento 1 del acero ANSI 4104



(a) Probeta A



(b) Probeta B

Figura 4. Micrografías obtenidas por microscopía óptica a 100x de la huella de desgaste del experimento 2 del acero ANSI 4104

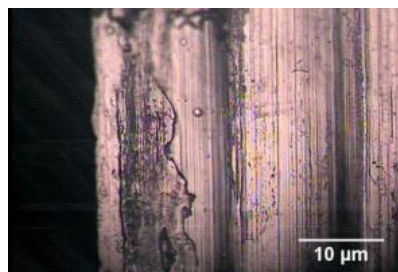


(a) Probeta A

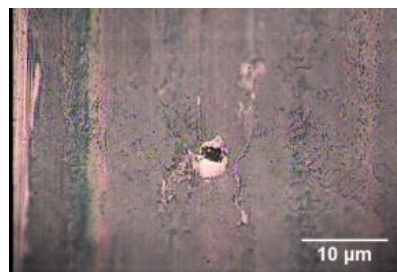


(b) Probeta B

Figura 5. Micrografías obtenidas por microscopía óptica a 100x de la huella de desgaste del experimento 3 del acero ANSI 4104



(a) Probeta A



(b) Probeta B

Figura 6. Micrografías obtenidas por microscopía óptica a 200x de la huella de desgaste del experimento 4 del acero ANSI 4104

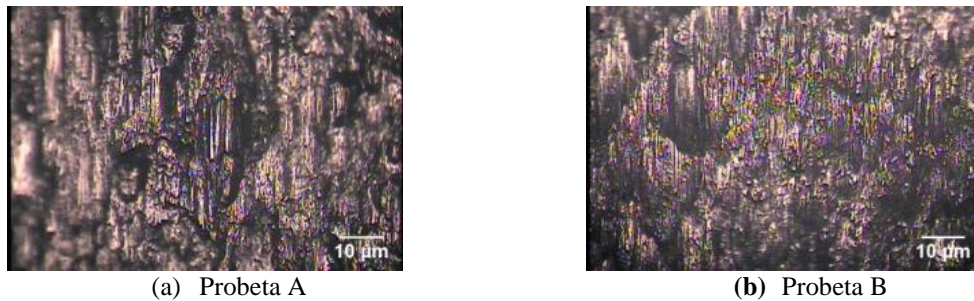


Figura 7. Micrografías obtenidas por microscopía óptica a 100x de la huella de desgaste del experimento 5 del acero ANSI 4104

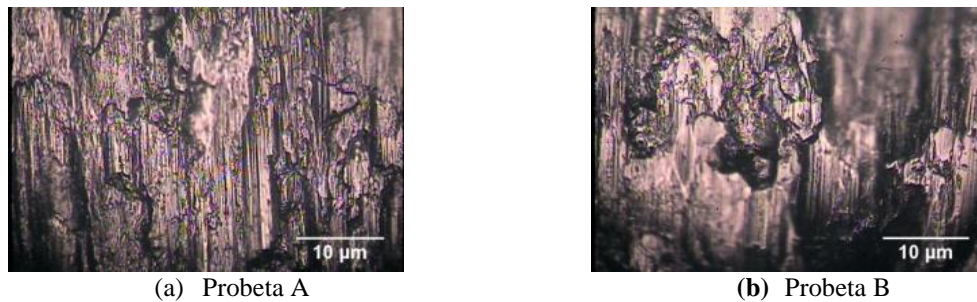


Figura 8. Micrografías obtenidas por microscopía óptica a 200x de la huella de desgaste del experimento 6 del acero ANSI 4104

Volumen y coeficiente de desgaste

Sólo se reportan el volumen y el coeficiente de desgaste de las probetas tipo A y B de los ensayos 5 y 6 (sin lubricación), ya que para el poco desgaste resultante en las probetas con lubricación, como era esperado, no se disponen de equipos con la precisión requerida.

Los resultados de los cálculos realizados para las probetas en seco, se muestran en la tabla 3. El resultado del coeficiente de desgaste promedio sin lubricante fue $k_A = 1,54E^{-05} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ y $k_B = 1,69E^{-04} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. para las condiciones evaluadas.

Tabla 3. Volumen de desgaste y Coeficiente de desgaste k, probetas en seco.

Probeta	Volumen de desgaste, V	Coeficiente de desgaste,
A5	73,07615019 mm ³	1,41E-05 mm ³ /N·m
A6	173,82290440 mm ³	1,68E-05 mm ³ /N·m
B5	682,32877167 mm ³	1,71E-04 mm ³ /N·m
B6	1323,90849648 mm ³	1,66E-04 mm ³ /N·m

CONCLUSIONES

Se identificó que los desechos de desgaste se generan por mecanismos de adhesión, deformación cíclica simple y deformación cíclica repetida.

No se pudo conocer la tasa de desgaste para las probetas lubricadas, los especímenes en seco

arrojaron un coeficiente de desgaste promedio de $k_A = 1,54 \times 10^{-05} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ y $k_B = 1,69 \times 10^{-04} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$.

La presencia del lubricante influyó sobre el desgaste, éste es un medio aislante del contacto metal-metal y por ende reduce altamente el volumen de desgaste; sin embargo, una inadecuada aplicación del lubricante puede influir en el aumento del tamaño de marcas o picaduras en la superficie.

REFERENCIAS

- [1] R. Bayer, *Mechanical Wear Fundamentals and Testing*, New York: Marcel Dekker, 2004.
- [2] J. León and M. Pinto, "Elaboración de una metodología para detectar fallas subsuperficiales en condiciones de contacto rodante mediante el uso de ultrasonido," Universidad de Carabobo, Nagunagua, 2013.
- [3] L. Heredia and A. Ledo, "Tribómetro para la simulación de la fricción y el desgaste bajo condición de contacto rodante," Universidad de Carabobo, Nagunagua, 2011.
- [4] R. Norton, *Diseño de Máquinas: Un enfoque integrado*, Cuarta ed., Mexico: Pearson Educación, 2011, p. 888.
- [5] J. E. Romero C., "Evaluación del comportamiento ante el desgaste por frotamiento del acero dúplex SAF 2507," Univesidad de Carabobo, Bárbula, 2012.
- [6] J. Archard, "Contact and Rubbing of Flat Surface," *Journal of Applied Physics*, vol. 24, no. 8, pp. 981 - 988, 1953.
- [7] M. N. Webster and C. J. J. Norbart, "An Experimental Investigation of Micropitting Using a Roller Disk," *Tribology Transactions*, vol. 38, no. 4, pp. 883-893, 1995.
- [8] M. Takuda, M. Nagafuchi, N. Tsushima and H. Muro, "Observations of the Peelling Mode of Failure and Surface Originate Flaking from a ring-to-Ring Rolling Contact Fatigue Test Rig," *ASTM STP 771 Rolling Contact Fatigue Testing of Bearing Steels*, pp. pp 150-165, 1982.
- [9] T. Tallian, "On Competing Failure Modes in Rolling Contact," *ASLE Transactions*, vol. 10, no. 4, pp. 418-439, 1967.