

DIAGNOSTICO Y PREDICCIÓN DE LA FRACTURA POR FATIGA

**P.A.Tamayo Meza¹, I.N. Ovchinnikov², J.M. Sandoval Pineda¹, L.A. Flores Herrera¹
Arait Montoya³, Leonardo Díaz³, Ruíz García, Rubén⁴.**

(1) Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, ESIME. México.

(2) Universidad Estatal Superior de Tecnología BAUMAN de Moscú. RUSIA.

(3) Alumnos del Programa Institucional de Fomento a la Investigación, PIFI. México.

(4) Alumno del Programa de Posgrado, Ingeniería Mecánica, ESIME, SEPI, IPN-AZC.

E-mail (autor de contacto): ptamayom@ipn.mx

RESUMEN

La aplicación de carga con velocidad de vibración constante, es un régimen de ensayo dinámico que se realiza en máquinas y sistemas pulsantes electrodinámicos en las cuales se ensayan especímenes en distintos materiales, y una importante variedad de elementos mecánicos y mecanismos, principalmente – álabes de turbinas.

Por lo general, en la etapa inicial de los ensayos con el uso de extensómetros se mide la deformación en la sección transversal de mayor riesgo, o bien el desplazamiento del extremo libre de un espécimen empotrado en cantiléver, sobre el cual analíticamente se determina la deformación en el empotramiento. Se considera, que con este valor (inicial) de la deformación, los ensayos se prolongan hasta el instante mismo cuando surge la fractura, y se mantienen constantes o bien los parámetros que regulan el funcionamiento de la plataforma vibratoria de carga de la máquina de fatiga, o bien el desplazamiento del extremo libre del espécimen.

La realización de un considerable volumen de estudios experimentales bajo diferentes condiciones de trabajo empleando este original método, y con el uso de extensómetros triaxiales indeformables de nuevo diseño que no se deforman juntamente con la muestra objeto de estudio, permitió revelar una serie de propiedades nunca antes observadas en el material.

Tópico 2: Materiales Metálico.

Palabras claves: Fatiga, frecuencia, fractura, vibraciones.

1. INTRODUCCIÓN

La confiabilidad y el volumen de material utilizado en las estructuras es un factor fundamental. A medida que los mecanismos y estructuras se tornan más complejos y las condiciones de trabajo se hacen más severas, abruptamente se incrementan las posibilidades de fallas y catástrofes, fatales para la vida de los hombres (aviones, puentes), y para la contaminación del medio ambiente (buques tanques, plataformas marinas (!), centrales nucleares, ductos de petróleo y gas, etc.). La falla de estas instalaciones es de consecuencias económicas colosales. Simultáneamente, las condiciones de explotación de una serie de objetos (cohetes, aparatos cósmicos y aviación, submarinos, y otros), y el déficit incremental de materia prima en todo el mundo, impone una disminución de la masa y el volumen de material empleado en su consecución.

Encontrar un adecuado compromiso entre una máxima confiabilidad, asociada a una estructura con mínima masa, implica el desarrollo de adecuados métodos para determinar el comportamiento de los materiales dentro del marco de su capacidad de trabajo y seguridad. Este conjunto de problemas tanto experimentales así como teórico, significa: a) determinar el comportamiento funcional del metal bajo condiciones específicas de las cargas de trabajo (sus cambios estructurales y la deformación); b) selección de los criterios que caracterizan el comportamiento del material; c) realización de los ensayos bajo condiciones cercanas a las de explotación; d) construcción de los equipos de ensayo capaces de realizar las pruebas bajo específicas condiciones y registrar el comportamiento del metal; e) uso de la matemática estadística que permite de manera objetiva evaluar los

resultados de los experimentos; f) desarrollo de la teoría de fatiga; g) formulación de los métodos de diagnóstico de la fractura por fatiga y de los métodos no destructivos de control; h) formulación de los métodos de pronóstico de la vida útil.

Hasta hace muy poco tiempo la mayor parte de los desarrollos, incluido la resistencia a las vibraciones de los motores de aviación, de los componentes mecánicos más solicitados, se llevaba a cabo experimentando sobre modelos a escala natural. Para determinar el potencial de funcionamiento de un motor de aviación durante un período establecido de 5000 horas según las normas, se requieren 60 camiones cisternas de combustible, sin embargo, el tiempo estipulado de los ensayos sobre la capacidad de funcionamiento no se limitaba.

Durante los ensayos bajo vibración se resuelven dos problemas fundamentales: 1. Obtener confiables características de fatiga del material, cercanas a las de trabajo, y estudios sobre la capacidad de resistencia a las vibraciones de las estructuras y pronosticar la vida útil de los implementos bajo condiciones de explotación de trabajo; 2. Evaluar la confiabilidad y resistencia a las vibraciones de los elementos ensayados durante un período de tiempo base bajo cargas determinadas.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante el diseño de complejos sistemas estructurales de considerable masa los métodos experimentales juegan un papel fundamental. Por esta razón centramos la atención en las vibraciones súbitas de amplio espectro, que son las que más generalizadas y, además, las menos estudiadas en el proceso de aplicación de la carga.

3. METÓDICA DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

Dos objetivos fundamentales fueron el objetivo del presente estudio:

1. Incrementar el volumen de la información obtenida (mediante la unificación de los problemas dinámicos de vibración, y los ensayos de fatiga y medición de la máxima cantidad de parámetros);
2. Incrementar la confiabilidad de los resultados de los ensayos mediante el uso metodológico de una serie de nuevas operaciones y de nuevos métodos de medición y control de los ensayos.

El análisis de la fractura por vibración demostró que comúnmente se rompen los elementos externos de unión, - ductos, columnas, vigas, etc. Se utilizó un modelo de viga con empotramiento en cantiléver. Las dimensiones del espécimen fueron 365x20x4 mm. Las tres primeras frecuencias propias fue de $f_1 = 28 \text{ Hz}$, $f_2 = 175 \text{ Hz}$ y $f_3 = 485 \text{ Hz}$, respectivamente. Los regímenes de los ensayos fueron similares a los que comúnmente se encuentran bajo condiciones de explotación.

Con el objeto de incrementar la confiabilidad y certidumbre de los resultados de los ensayos se desarrolló una serie de galgas extensométricas sin contacto, capaces de medir prácticamente cualquier magnitud de deformación en flexión independiente de su extensión. En los nuevos sensores se empleó un relativamente nuevo tipo de empaque de desplazamiento comparado con las tradicionales galgas de capacitores volumétricos. Se usó un sensor volumétrico capaz de medir la deformación tanto de superficies planas así como cilíndricas con curva gaussiana cero en dirección circunferencial. Se seleccionó un rígido régimen de trabajo optimizando el efecto vibratorio de la consola a partir de la potencia de la máquina. Esto significa encontrar el tipo de efecto $f(x,t)$, que genera las condiciones extremas de carga sobre el espécimen. Matemáticamente esto se expresa como:

$$\text{extr}F[y, \dot{y}, \ddot{y}, \dots, y^n(t), x, t, f(x,t)] \quad (1)$$

para $f(x,t) \in \Phi$, donde F - funcional, que caracteriza el movimiento vibratorio del objeto; Φ - efectos múltiples establecidos. La solución de la función (1) es difícil, sin embargo, durante la ejecución práctica del ensayo surgen limitaciones sobre el tipo de efecto, - de potencia, número de las armónicas, - control de las coordenadas que siguen el movimiento del objetivo (sección de peligro), etc.

La parte experimental se realizó solucionando los siguientes problemas fundamentales: estudiar la influencia del ancho del espectro sobre la capacidad de vibración y longevidad del espécimen, determinar el el régimen extremo de carga considerando la longevidad del espécimen, analizar las condiciones equivalentes determinantes y casuísticas de los regímenes, y la posibilidad de establecer un diagnóstico de la fractura por fatiga. En los ensayos se utilizó un vibroforo AMSLER y una Losenhausenwerk con capacidad de 10 t.

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1. CARGA DEL ESPÉCIMEN BAJO PARÁMETROS CONSTANTES DE LA CONSOLA VIBRADORA.

Durante la carga cíclica con velocidad constante o con aceleración cíclica, la deformación media (tensión) en el espécimen durante el 70 al 85% del tiempo del ensayo, se incrementa entre un 15 al 60% respecto a la inicial, para posteriormente decrecer de forma abrupta, y justamente antes de la fractura ésta adquiere valores muy cercanos a los iniciales, Figura 1. La variación de la deformación durante estos cambios respecto al tiempo está relacionada con alteraciones en el espectro del ensayo y con el nivel de la carga.

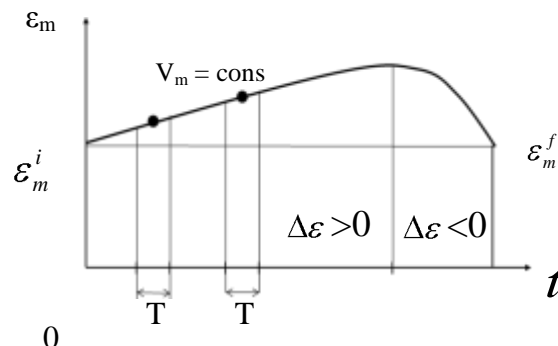


Figura 1. Variación de la deformación media en función del tiempo en la sección de peligro del espécimen durante el ensayo a un nivel medio constante de los valores de la velocidad cíclica.

Estas curvas se obtuvieron porque durante el ensayo de manera permanente y, en los ensayos de control minuto a minuto, se midió la magnitud de la deformación media ε_m^i (de $T = 15$ a $T = 30$ seg). Los valores tabulados corresponden a los puntos a través de los cuales se trazan las curvas. Como el carácter en la variación de las magnitudes ε_m^i , para 8 regímenes de ensayos, su valor medio es $\varepsilon_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_m^i$, se considera como la medida de la deformación (esfuerzo) del espécimen durante el tiempo de carga (n – cantidad de mediciones).

Al detenerse el ensayo en un valor $\varepsilon_{m,i} = \varepsilon_m^i$ (valor inicial de la medición) a simple vista se visualiza una grieta magistral transversal a todo lo ancho del espécimen, Figura 1.

Esta nueva característica permite diagnosticar la fractura por fatiga del material midiendo directamente una magnitud física – la deformación. Para un incremento positivo de la deformación ($+\Delta\varepsilon$) hasta alcanzar un máximo de la curva, el material trabaja la mayor parte del tiempo bajo carga dentro de la zona de seguridad. Se puede considerar que en esta etapa del ensayo el material se debilita, por el hecho de que una carga constante corresponde a una deformación cada vez más creciente. Cuando aparece un incremento negativo de la deformación ($-\Delta\varepsilon$), después de un máximo en la curva del tiempo hasta la fractura total, se puede de manera muy precisa realizar un pronóstico para la función analizada. De la curva en la Figura 1, se concluye que el proceso de acumulamiento de daño transcurre de forma paulatina, y esto es detectado por el extensómetro. Se puede suponer que en la zona extrema surgen alteraciones irreversibles dentro del material, y este es el comienzo del desarrollo de una grieta magistral en el espécimen, la cual evoluciona y conduce a un rompimiento relativamente rápido del espécimen.

4.2. CARGA DEL ESPÉCIMEN CON DEFORMACIÓN CONSTANTE

Medir la deformación del espécimen usando un extensómetro triaxial indeformable permitió, con ayuda de un régimen auto excitable de vibración autónoma RAVA, ejecutar regímenes de carga con valores constantes de

deformación. Tanto bajo carga con velocidad constante de vibración, como en carga con deformación constante hay acumulación de daño por fatiga, que altera los parámetros de la carga aplicada. La curva de variación de la velocidad de vibración de la consola en función del tiempo, prácticamente es similar tanto para los regímenes mono armónico, así como poli armónico, Figura 2. Esta curva es una característica muy peculiar del proceso de acumulación de daño así como por sus parámetros físicos, y se conoce como “**velocidad característica de vibración de la fractura por fatiga**”. Esta función difiere significativamente de la primera del proceso de acumulación de daños por fatiga. El rápido decremento de la velocidad de vibración en las etapas iniciales de carga puede explicarse por el debilitamiento del material, puesto que para mantener una deformación establecida posterior, se requiere una velocidad de vibración significativamente menor. La etapa más prolongada con un paulatino decremento de la velocidad de vibración de la consola vibratoria, es el proceso de acumulación de daño. Después de extinguirse cerca del 95% de la vida útil, la velocidad de vibración de la consola crece abruptamente hasta alcanzar valores levemente superiores a los iniciales, cayendo abruptamente hasta cero con el rompimiento instantáneo del espécimen.

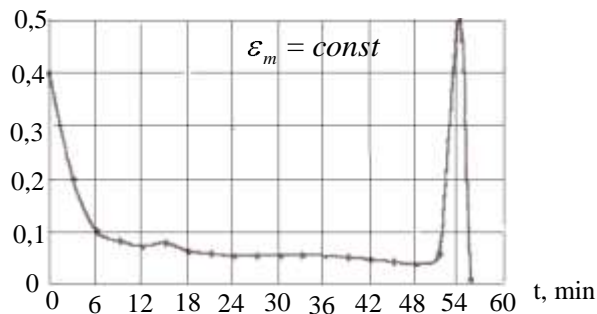


Figura 2. Variación de la velocidad media de vibración respecto al tiempo del área de peligro para un valor medio de la deformación.

El abrupto incremento en la velocidad de vibración se explica porque los vértices de la grieta engendrada experimentan endurecimiento localizado, efecto que la máquina vibratoria debe sobrepasar manteniendo la deformación dada, Figura 3.

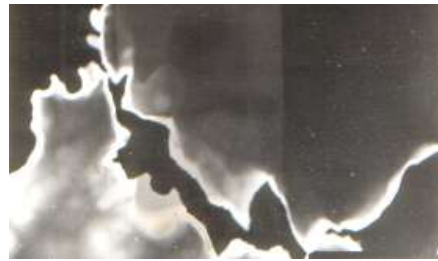


Figura 3. Desarrollo de una grieta según el mecanismo de deslizamiento intergranular; observación en campo oscuro. Material – acero inoxidable 304.

Por otro lado, la grieta generada altera la forma inicial de la curva de flexión. El extensómetro, que hasta ahora registraba una alteración permanente de la curva de la probeta, puede enviar una señal que incorrectamente reflejaría la deformación real. La manera de cómo varía la velocidad de vibración de la máquina para un análogo es similar al descrito, pero los valores máximos al inicio y al final de la carga es significativamente menor, y difieren por su valor promedio. Lógicamente, es difícil imaginarse un régimen de trabajo bajo carga que se desarrolle con deformación constante. Sin embargo, durante los ensayos es importante pronosticar el tiempo que resta para la fractura. Así, en estructuras masivas bajo carga, por ejemplo, alas de aviones, se requiere evitar la fractura total de la estructura al finalizar el ensayo, puesto que bajo éstas suelen ubicarse instrumentos, equipo y hombres. Por lo tanto, las propiedades obtenidas pueden ser utilizadas para efectuar un diagnóstico de la fractura durante los ensayos. Ambas curvas, Figura 1 y 2, pueden considerarse como funciones del proceso de acumulación de daño según parámetros físicos. Primero – bajo velocidad constante de

vibración y, segundo, bajo deformación constante. Ambas funciones permiten pronosticar el tiempo que resta para que surja la fractura por fatiga.

4.3. ELECCIÓN DE LA CLASE DE FUNCIÓN PARA LA DESCRIPCIÓN ANALÍTICA DE LAS CURVAS DE FATIGA.

El intento de describir analíticamente las curvas de fatiga comenzó hace tiempo [1,2,3,4,5,6], y hasta el día de hoy este problema no ha sido resuelto.

Primeramente para solucionar este problema se requiere escoger un sistema de coordenadas, donde los resultados experimentales pueden representarse de manera sencilla y en forma lineal. Para comenzar el análisis del problema utilizamos las curvas de fatiga para una aleación de aluminio tipo AMg6B.

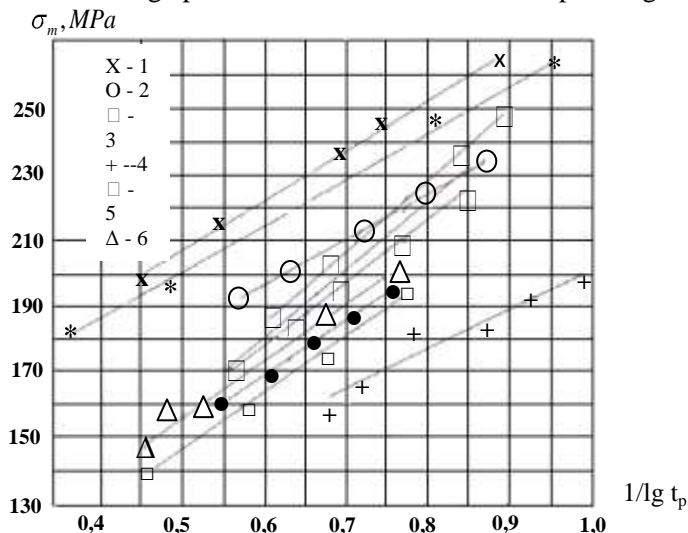


Figura 4. Resultados experimentales de los ensayos de fatiga en coordenadas $\sigma_m - 1/\lg t_p$

Las curvas de fatiga en la Figura 5, están en coordenadas « $\sigma_m - \lg t_p$ », en lugar de las conocidas « $\sigma_m - \lg N$ ».

Para espectros de cargas semi armónicas y fortuitas, el concepto N - número de ciclos pierde su sentido, y el uso de los métodos de esquematización de estos procesos conduce a serios errores.

La forma de las curvas de fatiga permite suponer que éstas pueden representarse por hipérbolas de tipo:

$$\sigma_m(t) = \sigma_{-1} + A / \lg t_p \tag{2}$$

Donde σ_{-1} y A - constantes; t_p - vida (tiempo para la fractura).

Estas funciones presentan dos campos de comportamiento asintótico: uno con una asintótica horizontal donde $t_p \rightarrow \infty$, y el otro con una asintótica vertical donde $t_p \rightarrow 0$. Físicamente la constante en la ecuación (2) se determina para $\lg t_p \rightarrow \infty$. Cuando $\sigma_m(t_p) \approx \sigma_{-1}$, entonces σ_{-1} es físicamente el límite de fatiga. En este caso el miembro $A / \lg t_p$ de la ecuación (1) representa la componente de resistencia a la fatiga en función del tiempo para una vida determinada del espécimen y « A » es un coeficiente numérico que caracteriza al material y al régimen de carga.

La función tipo (2) se linealiza en coordenadas « $\sigma_m - 1/\lg t_p$ », y esta circunstancia se utilizó para comprobar la posibilidad de describir con su ayuda las curvas de fatiga. En la Figura 4 se muestran los resultados experimentales en coordenadas « $\sigma_m - 1/\lg t_p$ ». Se observa que las curvas de fatiga son trazos rectos con ángulos un tanto diferentes (los regímenes Nº6, 7, 8 tienen ángulos casi iguales), que permiten pronosticar los resultados de los ensayos. El orden de distribución de los trazos calculados se conserva igual, como en las curvas de fatiga.

En un trabajo [5] se demostró, que las curvas de fatiga para aleaciones de aluminio bajo carga armónica en el campo de alto ciclado ($105 \leq N \leq 1016$) en coordenadas « $\sigma - \lg N$ » se linealizan y pueden describirse mediante una ecuación análoga a (2).

$$\sigma = \sigma_{-1} + A \times (\lg N) - n \quad (3)$$

Considerando la similitud en las estructuras de las funciones (2 y (3), entre ellas hay una fundamental diferencia física; (2) se utilizó para describir solamente los resultados de los ensayos en regímenes armónicos.

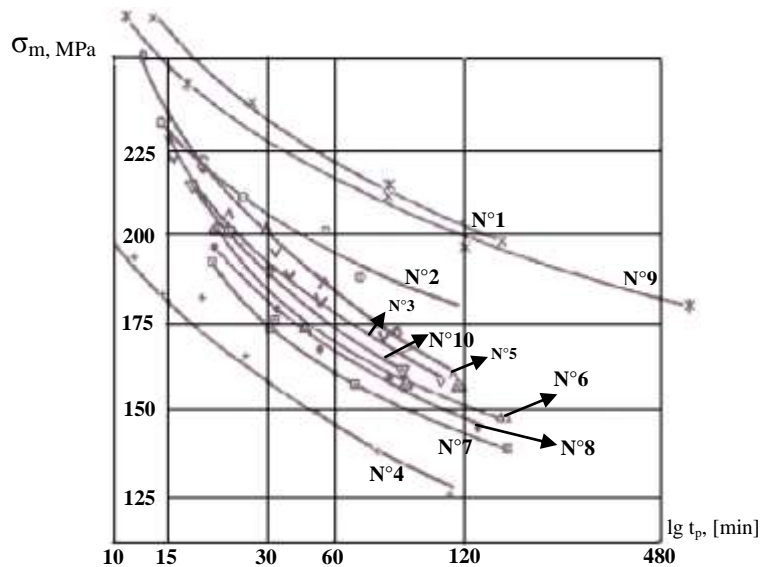


Figura 5. Curvas de fatiga para diez (10) regímenes diferentes de ensayos.

De una manera más compleja la ecuación (3) para generalizar los resultados de los ensayos de fatiga en aleaciones de aluminio bajo régimen armónico podemos proponer la ecuación (4)

$$\sigma(t) = \sigma_{-1} + \frac{a}{[\lg(N + N_1)]^\alpha} \quad (4)$$

Donde N_1, a, α - parámetros de la función; N - número de ciclos hasta la fractura.

La constante N_1 en la ecuación (4) surge como resultado de un análisis regresivo de las curvas experimentales, y ésta considera las singularidades del comportamiento de la función logarítmica inversa en la fatiga de bajo ciclado. La dificultad de emplear la ecuación (4) reside en el gran número de constantes.

El análisis estadístico de las curvas experimentales de fatiga con ayuda de los métodos de Kolmogorov y los mínimos cuadrados de Pearson, demostró que el concepto lineal de estas curvas con ayuda de (2) puede ejecutarse con gran precisión, y funciones de este tipo pueden utilizarse para aproximar las curvas de fatiga. La función (2) es un caso particular de otra función tal como:

$$\sigma_m(t) = \sigma_{-1} + A / (\lg t_p)^n \quad (5)$$

Donde n - exponente de grado (entero o fracción) y para $n=1$, donde el criterio de Pearson tiene un valor máximo, lo que permite emplear una función más sencilla.

En la Tabla 1, se muestran los valores de la constante σ_{-1} y «A» para todos los regímenes de los ensayos de fatiga de la aleación AMg6B a partir de los análisis estadístico. Estas constantes se emplean en los cálculos para el límite de vida.

Tabla 1. Valores de las constantes σ_{-1} y «A» para una aleación de aluminio AMg6B

Nº del régimen	1	9	2	10	3	4	5	6	7	8
σ_{-1} , MPa	131,79	130,14	113,68	62,02	55,46	79,06	54,21	68,87	61,18	68,60
A, MPa	150,28	140,08	137,89	193,00	207,53	121,84	217,17	173,58	170,49	166,81

Para una posterior aproximación de las curvas de fatiga se empleó el valor crítico del esfuerzo σ_K , donde se considera que la longitud de la grieta de fatiga alcanza el tamaño de grano del metal. Resultó, que si el valor de $(\sigma - \sigma_{-1})$ lo dividimos entre el valor del esfuerzo σ_K , entonces el logaritmo de esta relación y el doble logaritmo del tiempo hasta la fractura permiten representar las curvas de fatiga como una familia de líneas paralelas, Figura 6 [7]. Esto permite pronosticar el recurso restante de servicio mediante la vida, encontrar el coeficiente de «transición» de un régimen al otro que, como antes, por medio de las curvas de fatiga, Figura 5, no es una magnitud constante. Sin embargo, el sistema elegido complica la descripción del proceso de fatiga y su interpretación física.

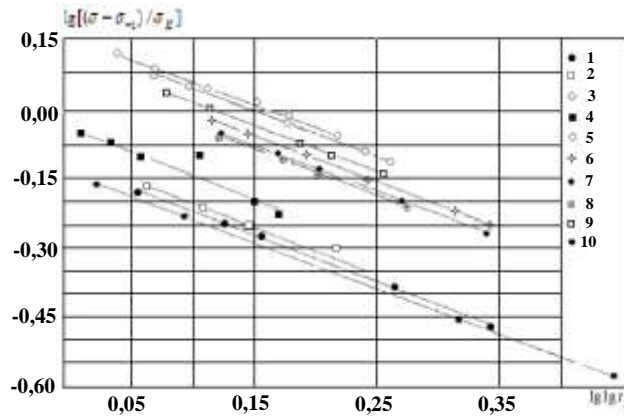


Figura 6. Resultados de los ensayos de fatiga, «normalizados», a una magnitud crítica del esfuerzo.

La búsqueda de expresiones más simples para las coordenadas condujo a plantear otro método para representar las curvas de fatiga, el cual condicionadamente se denomina « límite normalizado de fatiga». Todos los puntos experimentales de los especímenes para la aleación AMg6B, fueron ensayados según los regímenes N°1 al 10, y

se representan en coordenadas $\frac{A}{\sigma_m(t) - \sigma_{-1}} - \lg t_p$, y se ubican en sola línea recta, Figura 7. Esto abre enormes

posibilidades para pronosticar las curvas de fatiga bajo diferentes regímenes de carga disponiendo de una cantidad limitada de especímenes para los ensayos.

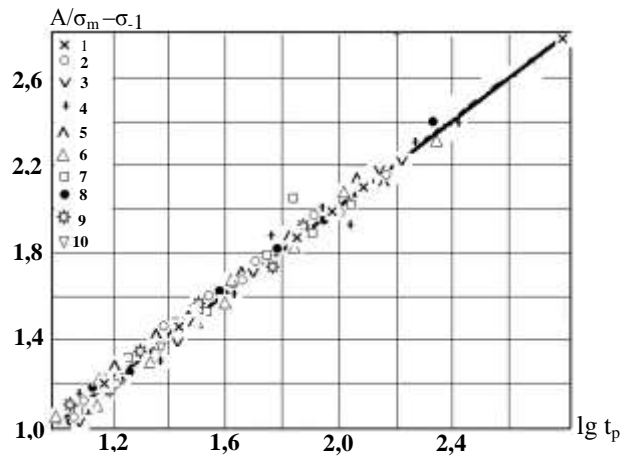


Figura 7. Resultados de los ensayos de fatiga, «normalizados» a la magnitud del límite de fatiga del material.

Como la determinación de un severo régimen de carga cíclica es uno de los problemas fundamentales a resolver, el análisis del grado de severidad de los regímenes considerando el daño inducido por fatiga se llevó a cabo durante todas las etapas de la investigación. Utilizando la ecuación (1) y los valores de los parámetros de aproximación que entran en ésta tomados de la Tabla 1, obtenemos los correspondientes valores de la longevidad para valores establecidos del esfuerzo aplicado según la ecuación:

$$t_p = e^{\frac{MA}{\sigma_m - \sigma_1}} \quad (5)$$

Donde $M = 2,303$ – módulo de cambio de logaritmos decimales a logaritmos naturales.

5. CONCLUSIONES

El método propuesto para comparar los regímenes de carga cíclica por la duración de vida del material bajo valores determinados del esfuerzo dentro del rango de variaciones considerado como relevante, permite comparar los regímenes no solo con los estándares (que son los menos rigurosos y débiles), contemplados para evaluar la tenacidad del material a la fractura por fatiga, sino que también con cualesquier otro régimen de trabajo.

REFERENCIAS

1. V.P. Kogaev. “Raschety na prochnost pri napryazheniyaj, peremennyj vo vremeni” – “Cálculo de la resistencia bajo esfuerzos cíclicos respecto al tiempo”.- M.: Mashinostroyeniye, (1977), p. 232. (libro).
2. V.S. Ivanova. Ustalost metallov – “Fatiga de Metales”.- M.: Metallurgizdat, (1963), p. 258.
3. V.F. Terentiev. “Ustalostnaya prochnost metallov i splavov”.- “Resistencia a la fatiga de metales y aleaciones”.M.: Internet Engeneering, (2002), p.287. (paper).
4. V.T. Troshenko y A.A. Sosnovsky. “Soprotivleniye ustalosti metallov I splavov”.” Resistencia a la fatiga de metals y aleaciones”. - Kiev: Nauk. Dumka, (1987), Parte 1, 650 Pgs.; parte 2.- p. 653. (libro).
5. M. N. Stepnov y E.V. Giatsintov. “Ustalost liojkij konstruktsionnij splavov”. “Fatiga de aleaciones no ferrosas”.- M.: Mashostroyeniye, (1973), p.317. (libro).
6. V.S. Gudramovich y E.S. Pereverzev. “Nesushaya sposobnost I dolgovechnost elementov konstruksii”. “Capacidad de Resistencia y longevidad de elementos estructurales”. -Kiev: Nauko. Dumka, (1981), p. 284. (libro).
7. V.A. Yermishkin y I.N. Ovchinnikov. “Otsenka opasnosti rezhimov tsiklicheskogo nagruzheniya dlya ustalostnoy povrezhdaemosti materialov”. // Compendio de trabajos, Conferencia Internacional, Ciencia y Tecnología, «Problemas Actuales sobre Seguridad Tecnológica, Energética y Transporte de Maquinas. Samara, 2003. – M.: Mashinostroyeniye, (2001), p. 414-421. (artículo en acta de congreso).

