

VIBRACIONES ULTRASÓNICAS NO-LINEALES EN ALEACIONES METÁLICAS: CONSTANTES ELÁSTICAS DE TERCER ORDEN.

C. Campos Pozuelo y J.A. Gallego Juárez.

U E I de Ultrasonidos. Instituto de Acústica. C.S.I.C.
Serrano, 144. 28006 Madrid.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta un método para la caracterización no-lineal de metales vibrando bajo la acción de ultrasonidos de alta intensidad. Este trabajo se enmarca en una de las principales líneas de investigación de la U E I de Ultrasonidos, centrada en el estudio y desarrollo de transductores sónicos y ultrasónicos de potencia para emisión en gases. Los materiales utilizados en la construcción de este tipo de transductores están sometidos, en condiciones reales de trabajo, a altos niveles de deformación mecánica, a frecuencias ultrasónicas. Se hace, por tanto imprescindible el análisis detallado de este tipo de deformaciones, el estudio del comportamiento no-lineal de las aleaciones metálicas empleadas y en consecuencia su caracterización elástica.

En el campo de la acústica no-lineal existe abundante bibliografía referente a ondas de amplitud finita en fluidos, tanto en propagación como en ondas estacionarias ⁽¹⁾. Sin embargo las ondas mecánicas de amplitud finita en sólidos han sido mucho menos estudiadas y en la mayoría de los casos los estudios realizados se han limitado a ondas progresivas ⁽²⁾, siendo realmente escasa la literatura referente a sistemas resonantes no-lineales.

SISTEMA EXPERIMENTAL

El trabajo experimental ha consistido fundamentalmente en la medida de la amplitud y forma de onda de la velocidad de vibración a lo largo de diferentes tipos de probetas de los materiales en estudio, excitadas a distintas intensidades en uno de sus modos de vibración. La temperatura se mantuvo siempre constante para anular su influencia.

Las muestras son excitadas mediante un transductor piezoeléctrico tipo sandwich al que se le ha añadido un amplificador mecánico con objeto de obtener grandes desplazamientos en el extremo donde se une la muestra (Figura 1). La frecuencia de trabajo del transductor empleado ha sido de 23 kHz y las probetas se diseñaron para resonar a esta misma frecuencia, que es del orden de las de trabajo de los transductores en estudio.

La amplitud y forma de onda de la vibración se mide mediante un interferómetro laser de frecuencia 10^{14} Hz. El rango de trabajo del interferómetro es entre $10 \mu\text{m/s}$ y 10m/s en velocidad de vibración y de hasta 1.5 MHz en frecuencia. El interferómetro se ha

conectado a un P.C. con objeto de almacenar y analizar las formas de onda. Este análisis se ha hecho utilizando métodos de FFT. El control de temperatura se ha llevado a cabo mediante un termómetro de infrarrojos. De esta forma todas las medidas se realizan sin puntos de contacto con las muestras, evitando así cualquier influencia del sistema de captura de datos.

Para el estudio de vibraciones longitudinales las probetas construidas fueron barras cilíndricas escalonadas con la sección central más delgada que los extremos (ver Figura 1). Con este tipo de geometrías lo que se pretende es concentrar la energía de vibración en las muestras para alcanzar el rango no-lineal en las mismas, mientras se mantiene el transductor trabajando en el rango lineal. De hecho para barras cilíndricas escalonadas

la condición de resonancia viene dada por $(3) \tan\left(\frac{\omega l}{4c}\right) = \frac{d_2}{d_1}$, donde ω es la frecuencia angular de resonancia, l la longitud de la probeta, c la velocidad de propagación en el material y, d_1 y d_2 , los diámetros de las secciones ancha y delgada respectivamente. Esto significa una longitud de resonancia menor que $\lambda/2$ y una notable concentración de energía en las probetas, especialmente en su zona central de menor diámetro d_2 , donde el aumento de deformación respecto a las zonas externas de mayor diámetro d_1 es proporcional a d_1/d_2 .

Las probetas se han construido con un número de pequeñas pestañas repartidas a lo largo de su longitud con objeto de captar la vibración longitudinal en diferentes puntos. El tamaño de dichas pestañas ha sido calculado de forma que no presenten modos propios de vibración cercanos a la frecuencia de trabajo. El sistema de excitación se calibró utilizando como patrón una muestra cilíndrica resonante a $\lambda/2$.

Empleando el mismo sistema de excitación y medida se han estudiado también modos de vibración flexionales en el rango no-lineal. Para esto se han diseñado y construido probetas en forma de barras de sección rectangular excitadas en su parte central (ver Figura 1). Por la misma razón que en el caso de vibraciones longitudinales se han utilizado geometrías escalonadas, obteniéndose también un notable aumento de la deformación en las zonas delgadas.

RESULTADOS

Mostraremos algunos de los resultados obtenidos para vibraciones longitudinales y flexionales en aleaciones de titanio (Ti 6Al 4V) y de vibraciones longitudinales en duraluminio. El material de titanio presenta un campo de comportamiento lineal considerablemente mayor que el duraluminio (Figura 2). En este segundo se observa, a niveles de excitación relativamente bajos un comportamiento fuertemente no-lineal, con un notable aumento de la atenuación del material y una importante generación de armónicos, de segundo y tercer orden. En el Ti 6Al 4V, en cambio, para niveles de excitación del orden de los aplicados en el caso del duraluminio, no se observan aún componentes apreciables de segundo orden. Por tanto, desde el punto de vista práctico de la construcción de transductores, este material presenta características claramente más adecuadas.

Otra importante conclusión de los resultados experimentales obtenidos para vibraciones longitudinales, es que la generación de armónicos apreciable ocurre sólo en la zona central de la muestra, donde se alcanzan altos niveles de deformación, mientras que en los extremos de las probetas se obtiene una onda perfectamente sinusoidal (Figura 3). Es interesante poner de manifiesto algunas diferencias entre estos resultados y los que aparecen en la literatura referidos a ondas longitudinales progresivas de amplitud finita en sólidos (2) . En particular, en ondas progresivas la producción de armónicos aumenta

con la distancia de propagación. En cambio, en ondas estacionarias, son las condiciones de contorno las que provocan los resultados que aquí estamos presentando.

Estos resultados se han obtenido también de forma teórica, desarrollando un modelo aproximado con el que se ha estudiado el caso unidimensional de vibraciones longitudinales considerando términos de hasta segundo orden, sin tener en cuenta las pérdidas ⁽⁴⁾. Aplicando este modelo aproximado de segundo orden ha sido posible obtener, en conexión con los datos experimentales, el valor del parámetro de no-linealidad y, por lo tanto, la constante elástica de tercer orden para la aleación de titanio estudiada, quedando así caracterizado el comportamiento de este material en el rango no-lineal. Los valores obtenidos son 50 para el parámetro de no-linealidad lo que implica una constante de tercer orden $C_{11} = 97Y_0$, siendo Y_0 el módulo de Young del material.

El interés práctico del estudio de vibraciones flexionales con alto nivel de excitación radica en el hecho de que es la forma más común de trabajo de los transductores de potencia para emisión en gases. El estudio experimental de este tipo de vibraciones se ha realizado tanto sobre muestras de sección constante como variable, mostrándose que, al igual que en vibraciones longitudinales, la generación de efectos no-lineales es mucho mayor cuando se utilizan geometrías de sección variable.

Los principales resultados se resumen en las figuras 2, 3 y 4. La figura 2 muestra una comparación de la desviación del comportamiento lineal para duraluminio y para Ti 6Al 4V. Se trata de resultados obtenidos sobre una probeta idéntica de cada uno de los materiales y teniendo en cuenta la calibración del sistema. La figura 3a muestra, para el Ti 6Al 4V la evolución de la amplitud del segundo armónico generado, en un punto, en la zona de alta deformación de la muestra y en el extremo más lejano al transductor, en función de la excitación en el otro extremo de la muestra. La figura 3b muestra, para el duraluminio la evolución de la amplitud del tercer armónico generado, en un punto, en la zona de alta deformación de la muestra y en el extremo más lejano al transductor, en función de la excitación en el otro extremo de la muestra. Las diferencias comentadas entre ambos materiales y entre los diferentes puntos de las probetas son evidentes. La figura 4a muestra para una barra escalonada vibrando en su modo flexional fundamental la distribución de velocidad de vibración con bajo nivel de excitación (comportamiento lineal), y una comparación con la predicción teórica. La figura 4b muestra para la misma barra la distribución de segundo armónico en alto nivel de excitación.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran la validez del método teórico-experimental desarrollado para estudiar las vibraciones de amplitud finita en sólidos elásticos, así como su generalidad al poderse aplicar tanto a vibraciones longitudinales como flexionales. Los resultados experimentales presentan un buen acuerdo con el modelo teórico desarrollado ⁽⁴⁾, lo que ratifica la validez del mismo y proporciona un nuevo método de medida de las constantes elásticas de tercer orden.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto de la CICYT "Estudio y desarrollo de sistemas ultrasónicos de potencia para su aplicación a procesos industriales en medios multifásicos".

BIBLIOGRAFÍA

1. Dah-You, *Chin. Jour. of Acoust.* Vol 9 No.3 (1990) 193
2. M.A. Breazeale and J. Philip, in *Physical Acoustic Vol XVII.*, ed. W.P. Mason and R.N. Thurston (academic Press, Orlando, 1984)

3. C. Campos-Pozuelo and J.A. Gallego-Juárez. *Ultras. Int. 91 Conf. Proceedings.* (Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford 1991) p 645
4. C. Campos-Pozuelo and J.A. Gallego-Juárez in *Advances in Nonlinear Acoustics.* ed. H. Hobaek p 478.

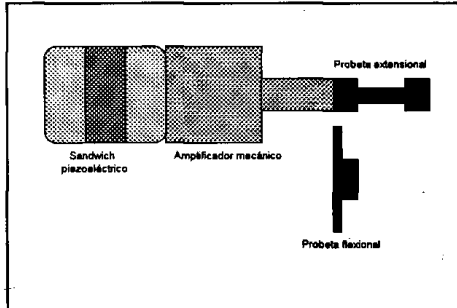


Figura 1 Esquema del transductor de excitación y de las probetas utilizadas

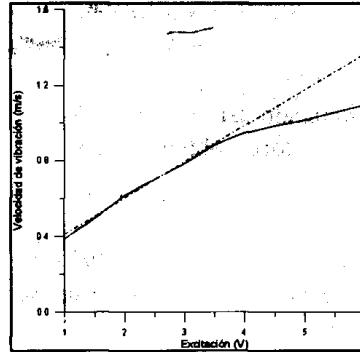


Figura 2 Velocidad de vibración en la punta de una muestra de Ti 6Al 4V (-.-) y otra de duraluminio (-) ambas con una relación de diámetros de 1.6. Vibración longitudinal

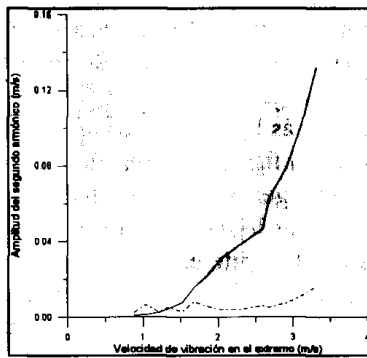


Figura 3a Amplitud del segundo armónico, en la zona central (-) y en el extremo (-.-) de una muestra de Ti 6Al 4V en función de la excitación. Relación de diámetros 1.6. Vibración longitudinal.

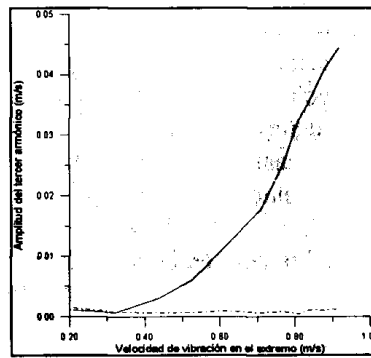


Figura 3b Amplitud del tercer armónico en la zona central (-) y en el extremo (-.-) de una muestra de duraluminio en función de la excitación. Relación de diámetros 1.6. Vibración longitudinal.

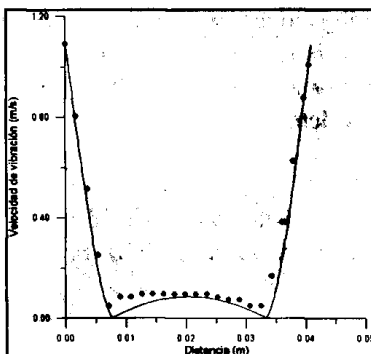


Figura 4a Distribución de la velocidad de vibración en una barra escalonada vibrando en su primer modo flexional. Comparación teórico (-) experimental (*).

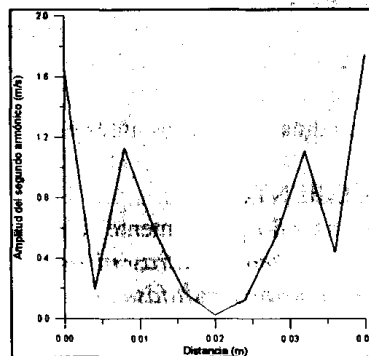


Figura 4b Distribución de la amplitud del segundo armónico en una barra escalonada vibrando flexionalmente. Velocidad de excitación 2 m/s