

# Μη Γραμμική Ακουστική

## Εφαρμογή Μη Γραμμικής Ακουστικής

- Παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της βλάβης λόγω κόπωσης σε **κράματα τιτανίου**

# Ακουστικός χαρακτηρισμός της κόπωσης

## Γραμμική Ακουστική

- a. Small displacement amplitudes
- b. Harmonic motion
- c. Hooke's law

## Linear wave equation

Velocity/Modulus/

Elastic constants  $c_{ij}$

Attenuation/Damping

**Κόπωση**: Continuous changes in the microstructure  
due to cyclic loading (dislocations)

Influence of Fatigue on  
Sound Velocity / Elastic Modulus

**Change 1 – 2 %**

# Αλληλεπίδραση των ακουστικών κυμάτων με τις διαταραχές

## Acoustic Wave Vibrates Dislocation Segments

Vibrating String Model ( Granato and Lucke)

Increase attenuation

Small change in velocity

## Ultrasonic Attenuation:

Depends on Frequency and Grain size

Changes in attenuation **cannot** be attributed only to fatigue

# Εξίσωση κίνησης

γραμμικό Μη-γραμμικό

$$\rho_0 \ddot{u} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial a_i^2} + \delta \frac{\partial u}{\partial a_i} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial a_i^2} \right)$$

Λύση :  $u = u^0 + u'$

$$u(a, t) = A \sin(ka - \omega t) + \frac{a\beta(kA)^2}{8} \cos[2(ka - \omega t)]$$

$$\beta = \frac{8}{ak^2} \left( \frac{A_2}{A_1^2} \right)$$

a: propagation distance  
 $k = 2\pi/\lambda$

# Μη γραμμική Ακουστική

- a. Finite displacement amplitudes
- b. Anharmonic motion
- c. Hooke's law with second order term

## Nonlinear Wave Equation

Second and higher order elastic constants

Nonlinearity Parameter  $\beta$

### Longitudinal wave in isotropic material

$$\beta = [ 3 + C_{111}/C_{11} ] = (2v_1^2/a\pi f^2)(A_2/A_1^2)$$

$v_1$  = Longitudinal sound velocity

$C_{111}$  = Third order elastic constant

$C_{11}$  = Second order elastic constant

# Μη γραμμική αλληλεπίδραση των ακουστικών κυμάτων με τις διαταραχές

## Modifications to Vibrating String model

- Addition of nonlinear vibration of dislocations
- Inclusion of vibration of dislocation structures

$$\beta = \beta_{\text{lattice}} + v f_{\text{dip}} \beta_{\text{dip}} + \text{etc.}$$

$\beta_{\text{lattice}}$  Nonlinearity of the lattice

$v f_{\text{dip}}$  Volume fraction of dislocation dipoles

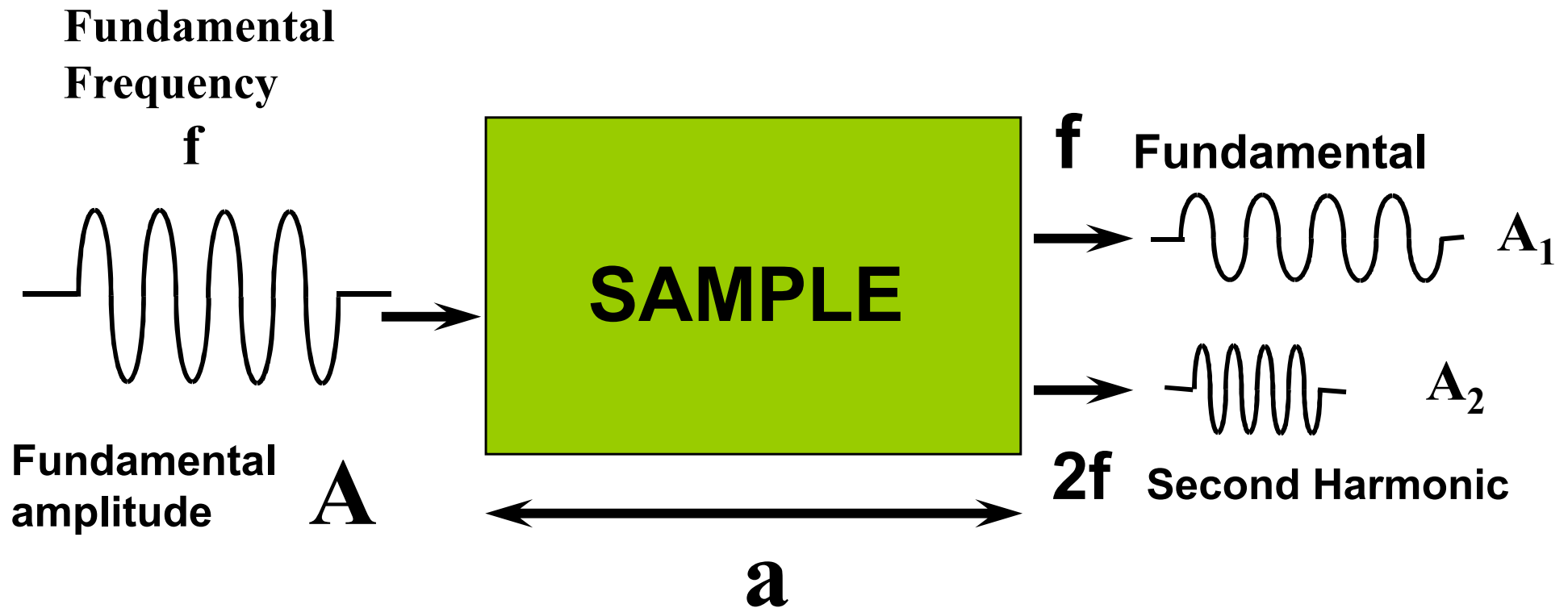
$\beta_{\text{dip}}$  Nonlinearity of the dislocation dipoles

# Δυσκολίες σε παραδοσιακά πειράματα μη-γραμμικής ακουστικής

- Χρονοβόρα
- Η μικροδομή των δοκιμίων θεωρείται ταυτόσημη
- Δεν υπάρχει δυνατότητα για πραγματοποίηση των πειραμάτων σε πραγματικό χρόνο



# Μη γραμμική ακουστική και δεύτερη αρμονική



# Πειραματικές Τεχνικές

## Μέτρηση της δεύτερης αρμονικής

1. Capacitive Detection: **Absolute amplitude and  $\beta$**
2. Piezo-Electric Detection: **Relative  $\beta$**   
(f-2f method)
3. Optical Detection: **Absolute amplitude**

# Capacitive Detection και Μέθοδος f-2f

## Capacitive Detection

- Measurement of absolute amplitude
- Absolute Nonlinearity Parameter,  $\beta$

Not possible to use with fatigue machine

## Piezo-Electric Detection / f-2f Method

Measurement of Relative amplitudes (voltage)

Calibration needed for absolute nonlinearity parameter,  $\beta$

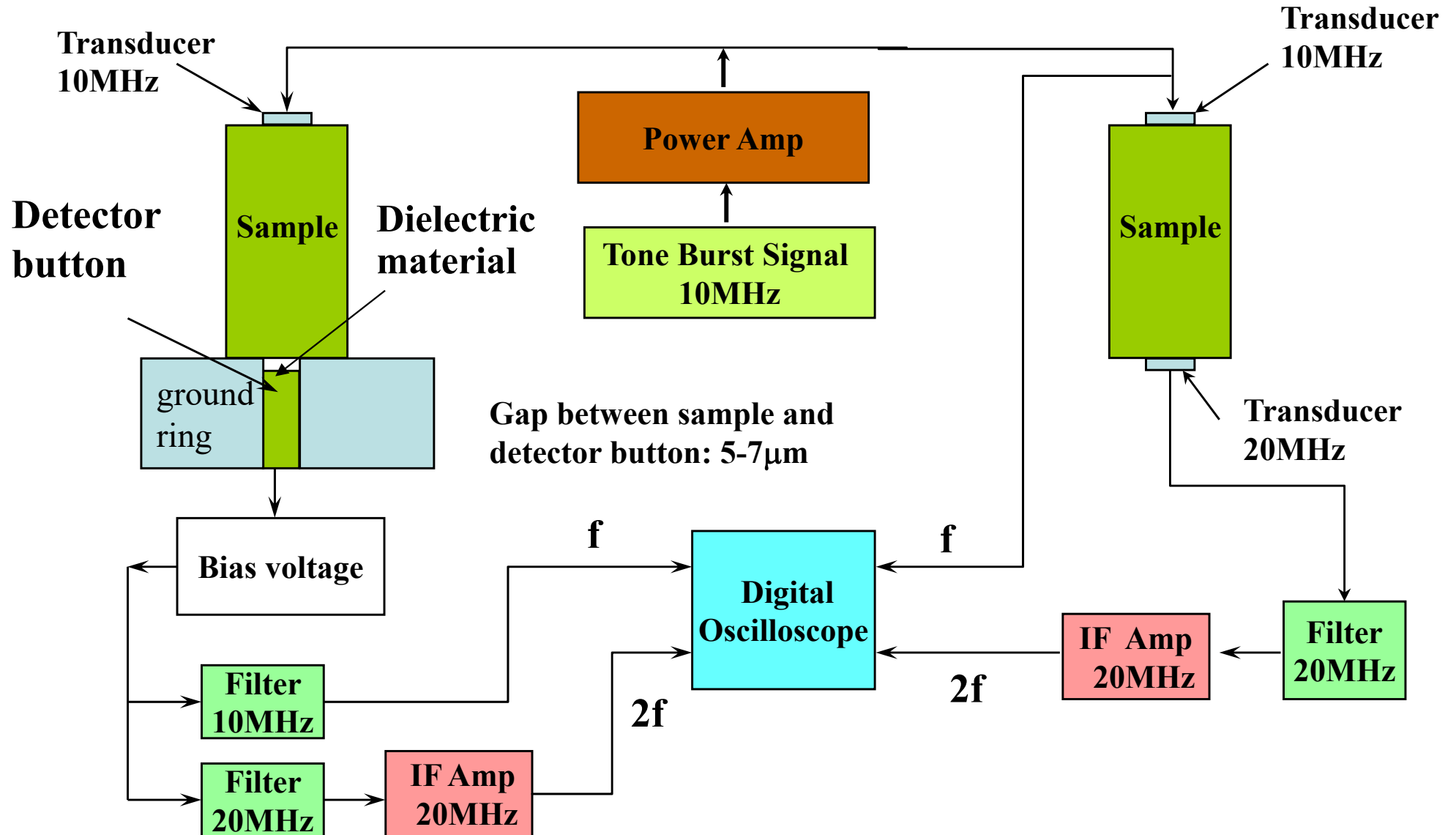
*Absolute Nonlinearity Parameter ( $\beta$ ) = Cal.Const x Nonlinear Acoustic Factor*

Μπορεί να σχεδιαστεί να μετρά κατά την κόπωση

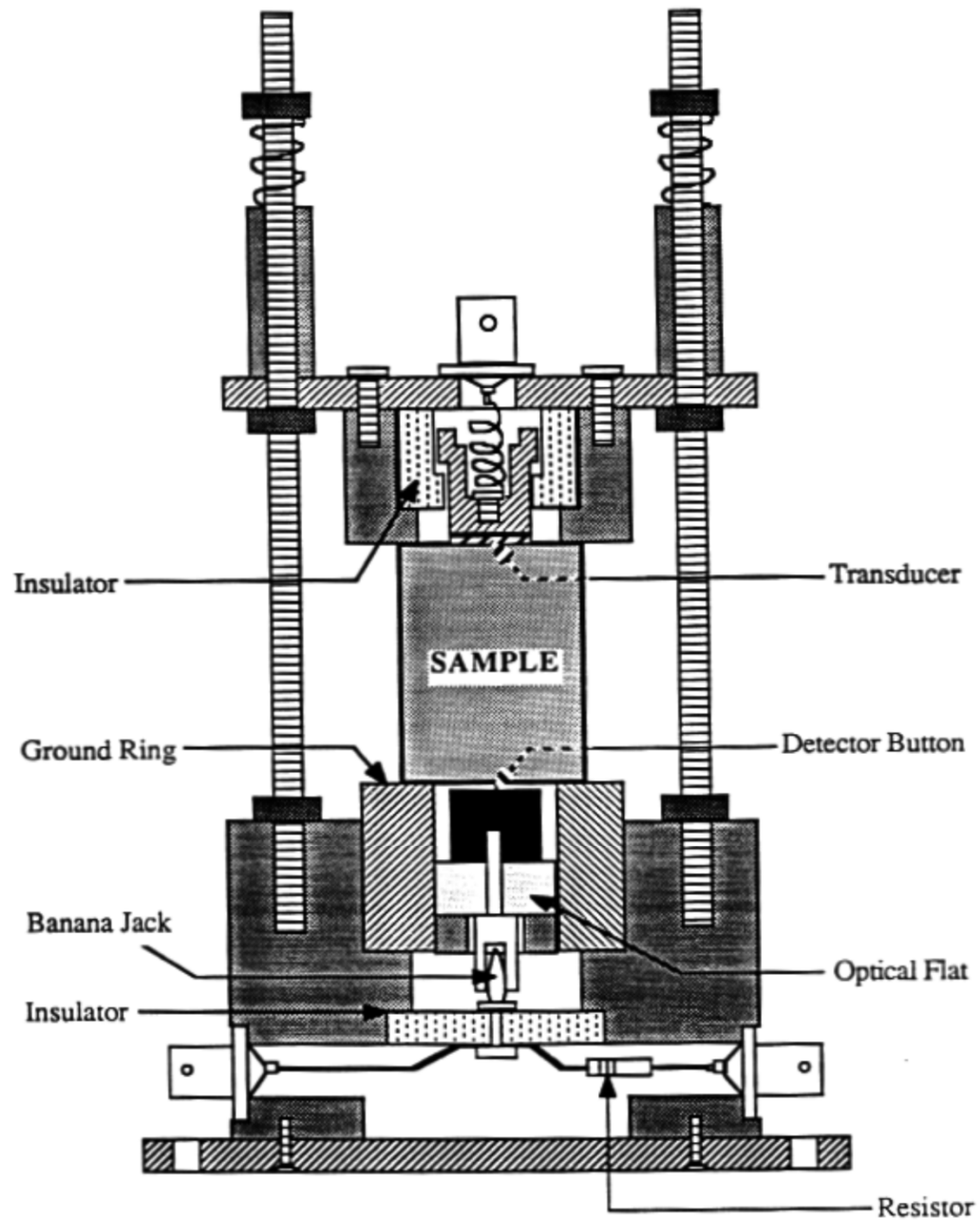
# Πειραματική διάταξη

## Dielectric Capacitive Detection

## Piezo-Electric Detection



# Capacitive Detection



# Μετρήσεις ( $f/2f$ ) σε πραγματικό χρόνο

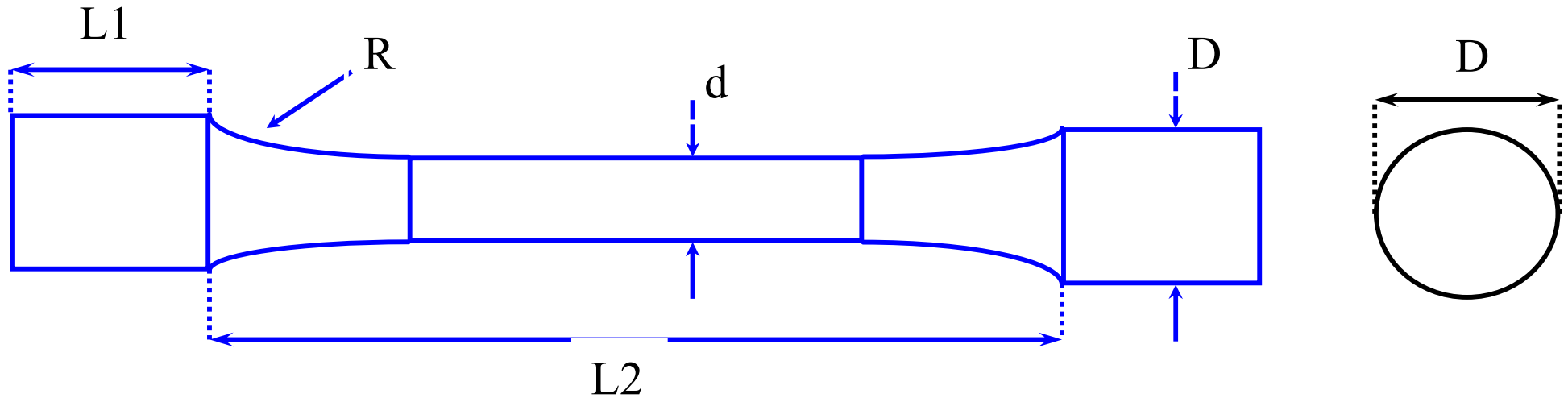
## Μη γραμμική παράμετρος $\beta$

$$\beta = \frac{8}{ak^2} \left( \frac{A_2}{A_1^2} \right)$$

Normalized by  $\beta_0$

(nonlinear parameter of the material at the virgin state)

# Προετοιμασία δοκιμίου



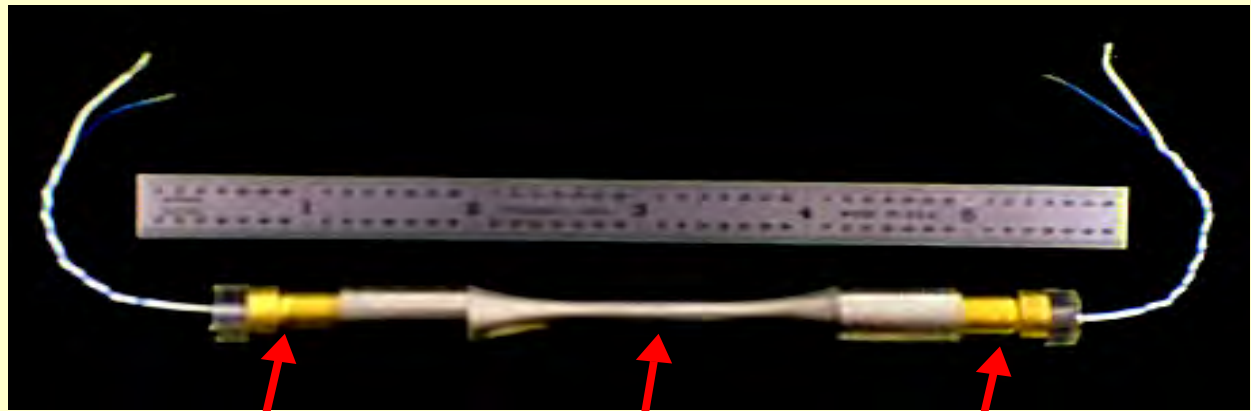
**$D=12.7$  mm;  $d=6.5$  mm;  $R=100$  mm;  $L1=20$  mm;  $L2= 54$  mm**

**Ends of the sample polished flat and parallel**

**$\text{LiNbO}_3$ , 0.25" dia. longitudinal wave transducers**

# Παρακολούθηση κόπωσης σε πραγματικό χρόνο

- Modified the fatigue machine grips
- Developed special transducer holder
- Automated the measurement of acoustic amplitude
- Interfaced acoustic measurements with fatigue machine
- Developed software to automate the measurements and controls



Transducer Holder  
(f)

Ti-6Al-4V dog-bone sample

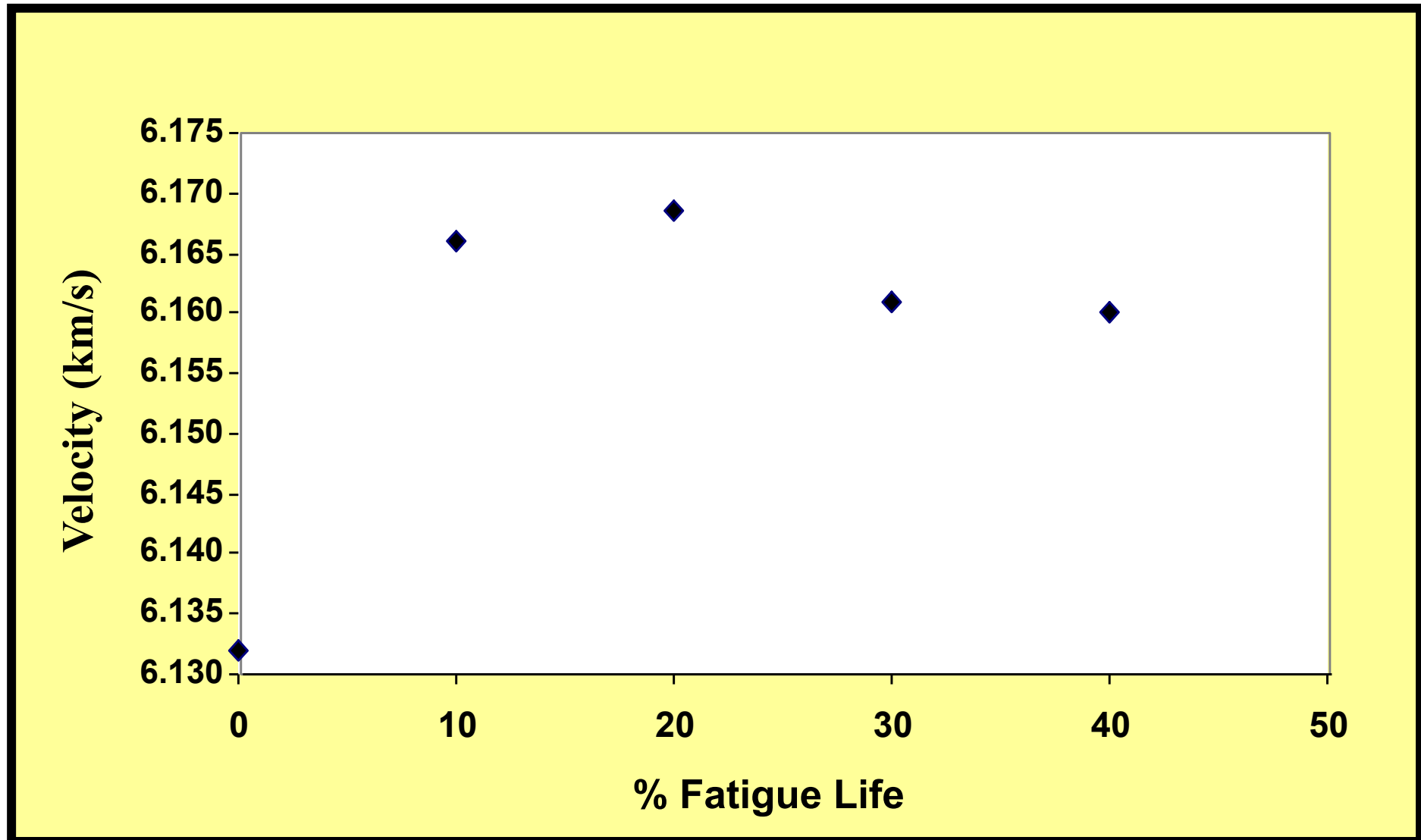
Transducer Holder  
(2f)



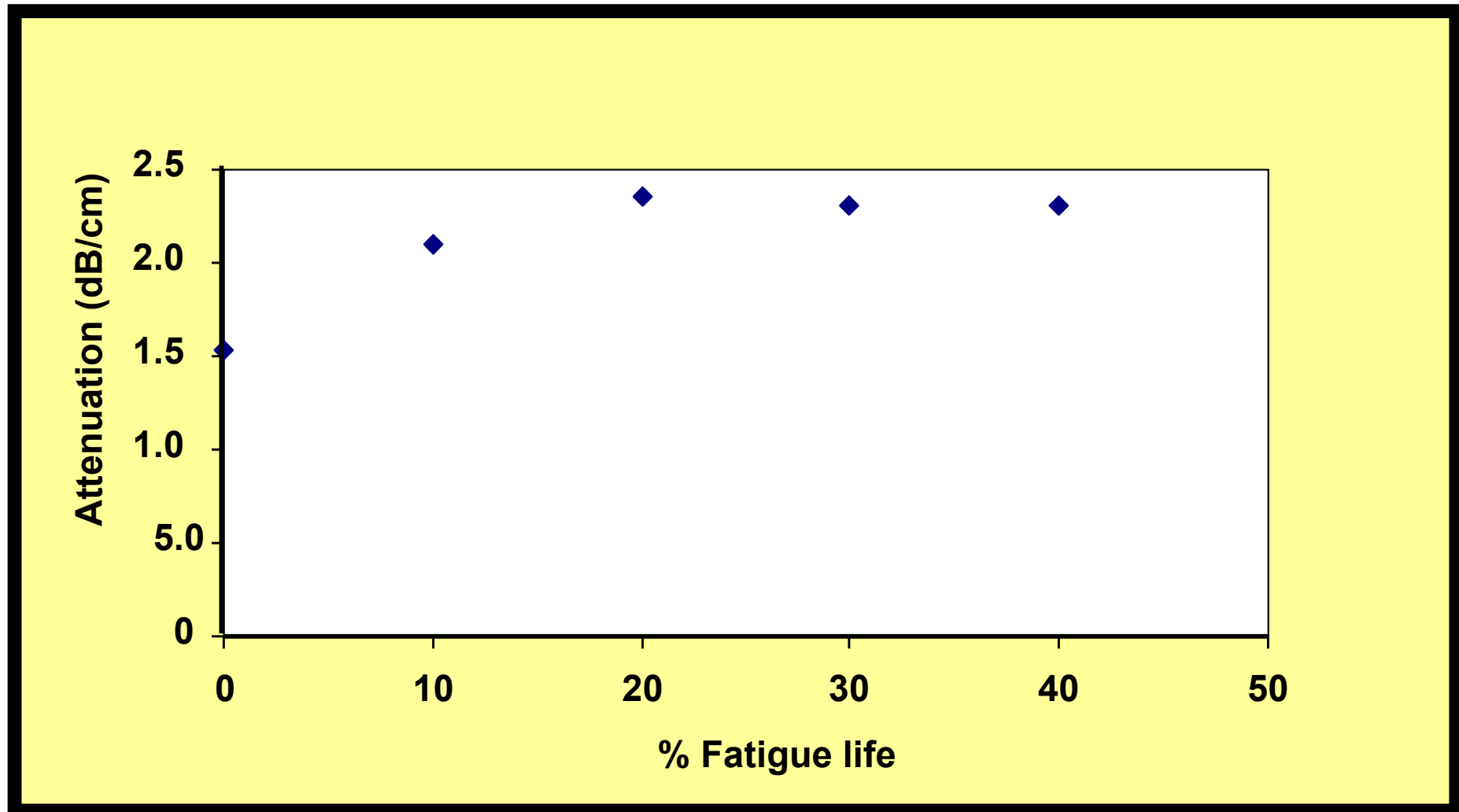
# Διαδικασία μέτρησης

1. **Determine fatigue life** of a dogbone sample (Load: 865 MPa)  
R ratio : 0.1, Cyclic loading frequency: 1 Hz  
Number of cycles to break: 35000
2. Choose another dogbone sample from the same batch and measure **longitudinal velocity**
3. Measure **ultrasonic attenuation** at 10 MHz.
4. Measure **variation of second harmonic amplitude** as a function of Fundamental.
5. Determine **Nonlinear Parameter**.
6. Load the sample in the MTS machine and **fatigue**.  
(10%, 20%, 30%, 40% etc ... of fatigue life)
7. **Repeat measurements:** velocity, attenuation, nonlinear parameter

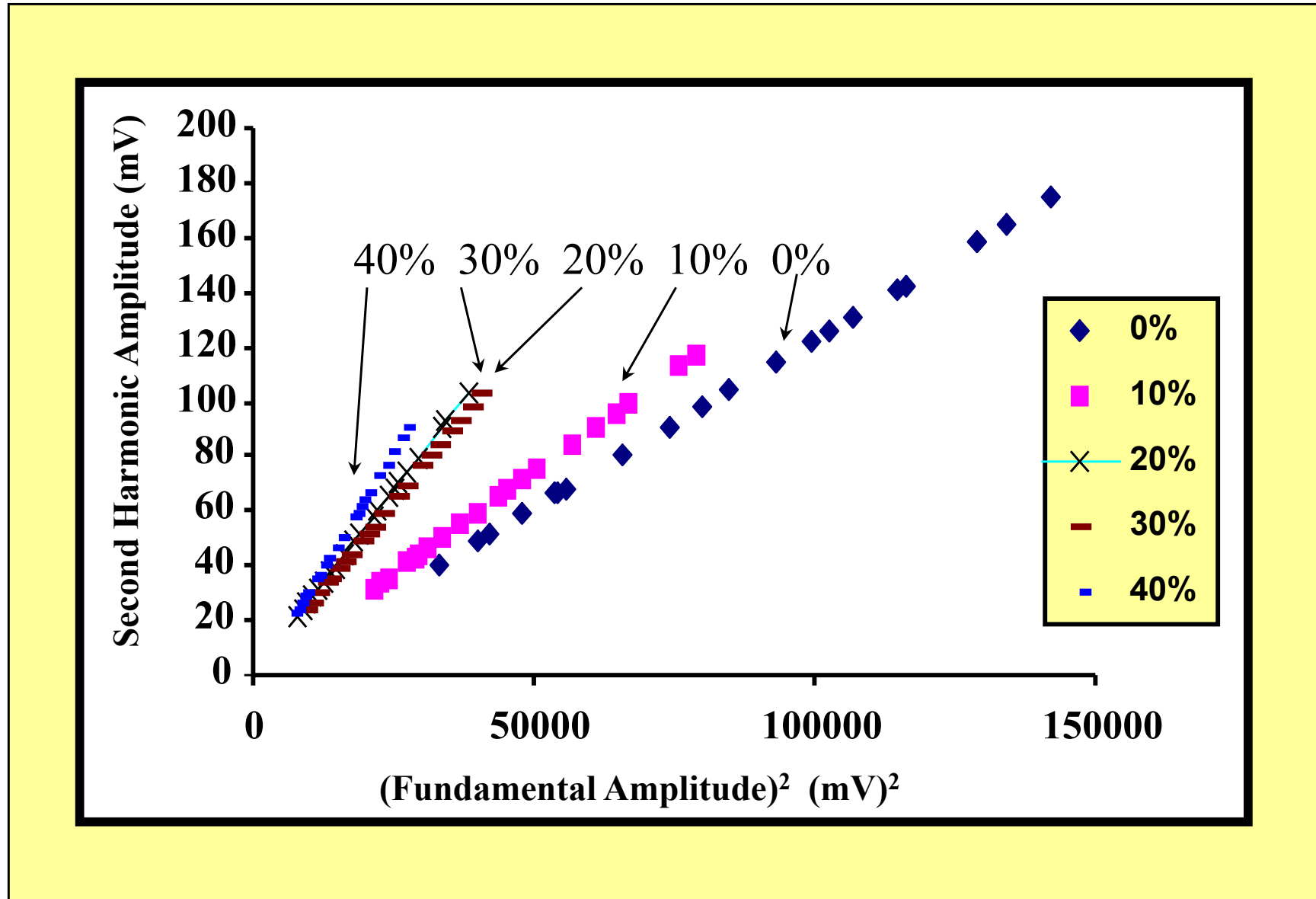
# Μεταβολή της ταχύτητας διαμηκών κυμάτων κατά την κόπωση



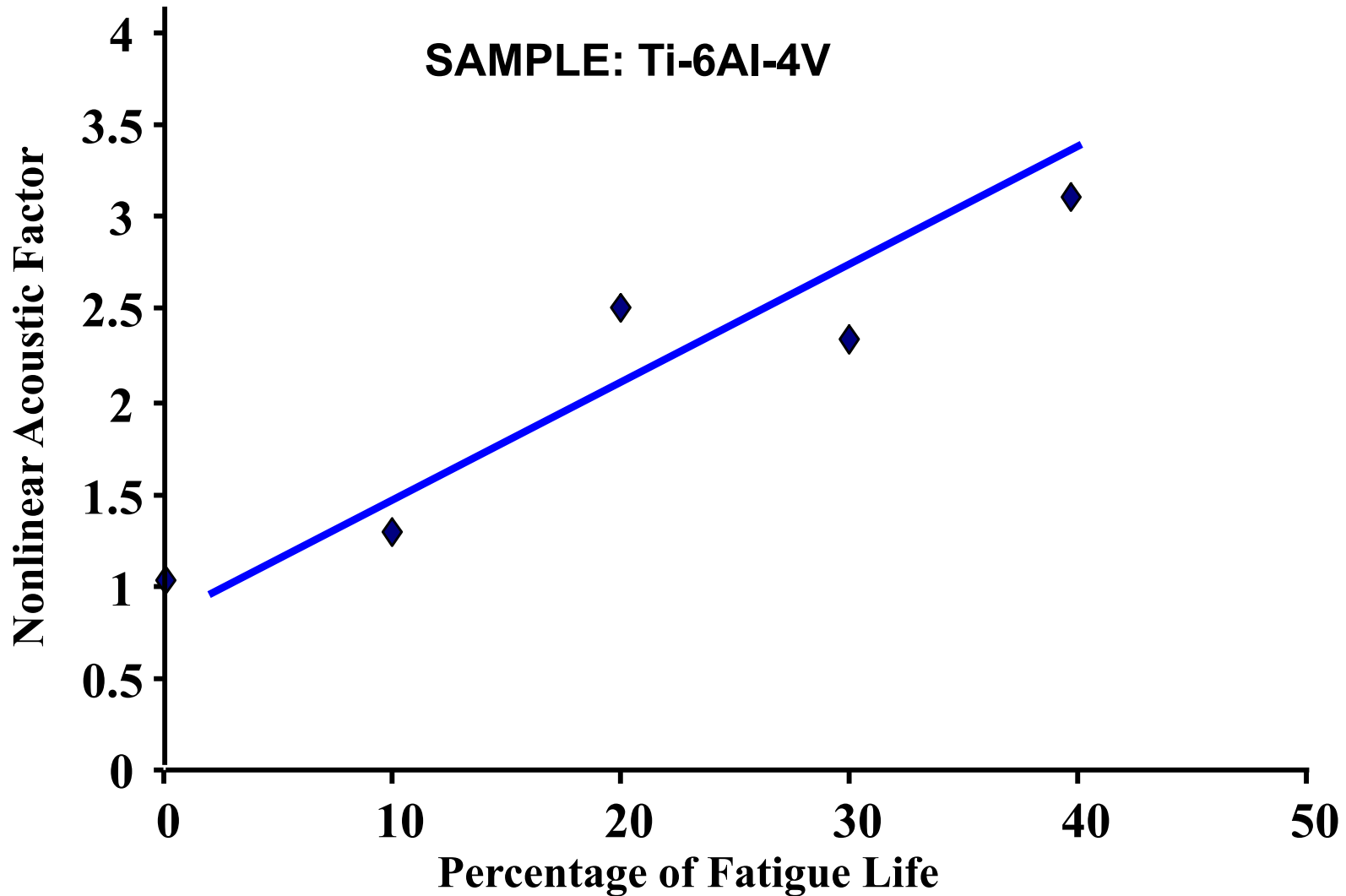
# Μεταβολή της απόσβεσης κατά την κόπωση



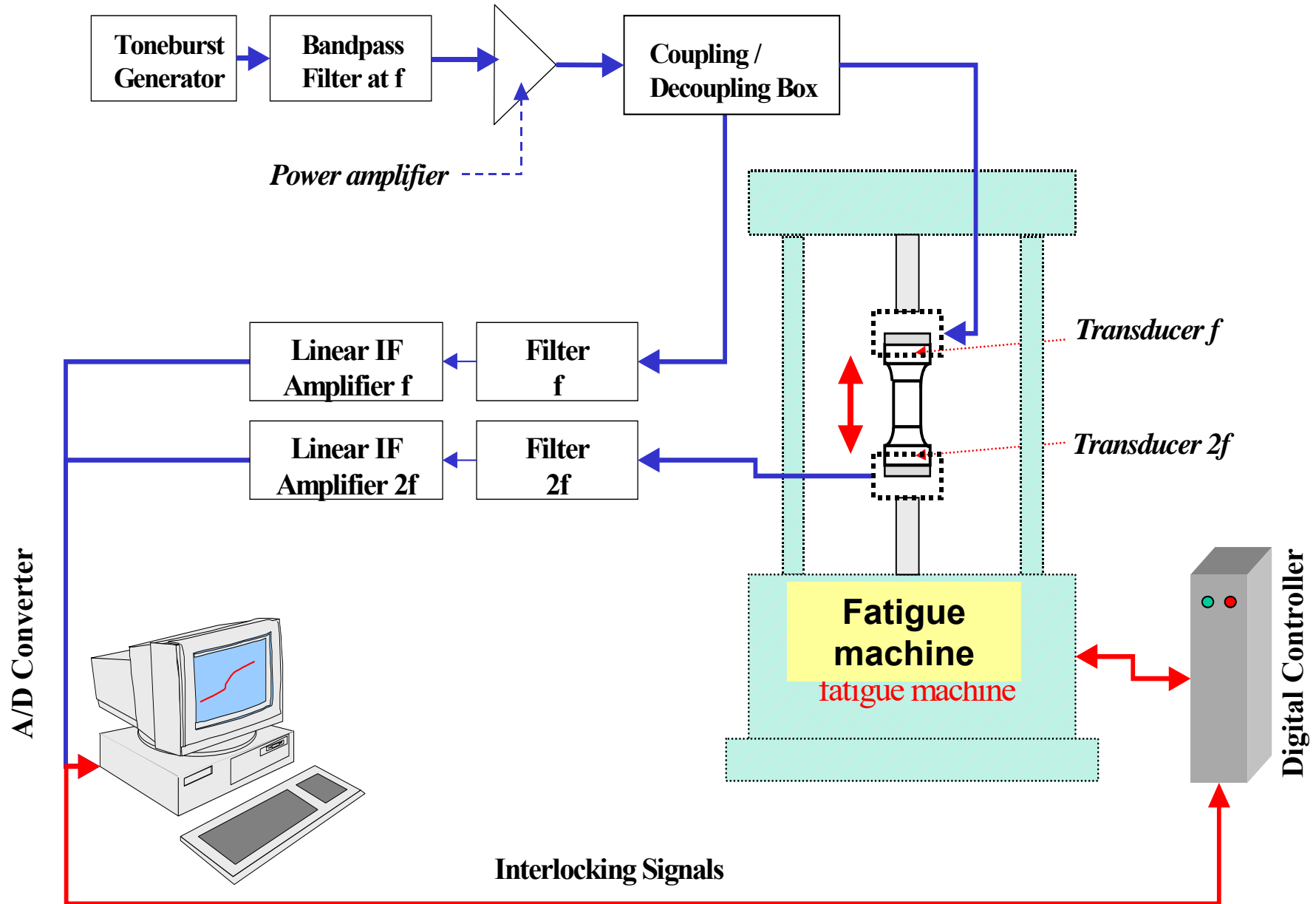
# Πλάτος δεύτερης αρμονικής ως προς τη βασική συχνότητα για διάφορα στάδια κόπωσης



# Μεταβολή της μη γραμμικής παραμέτρου κατά την κόπωση

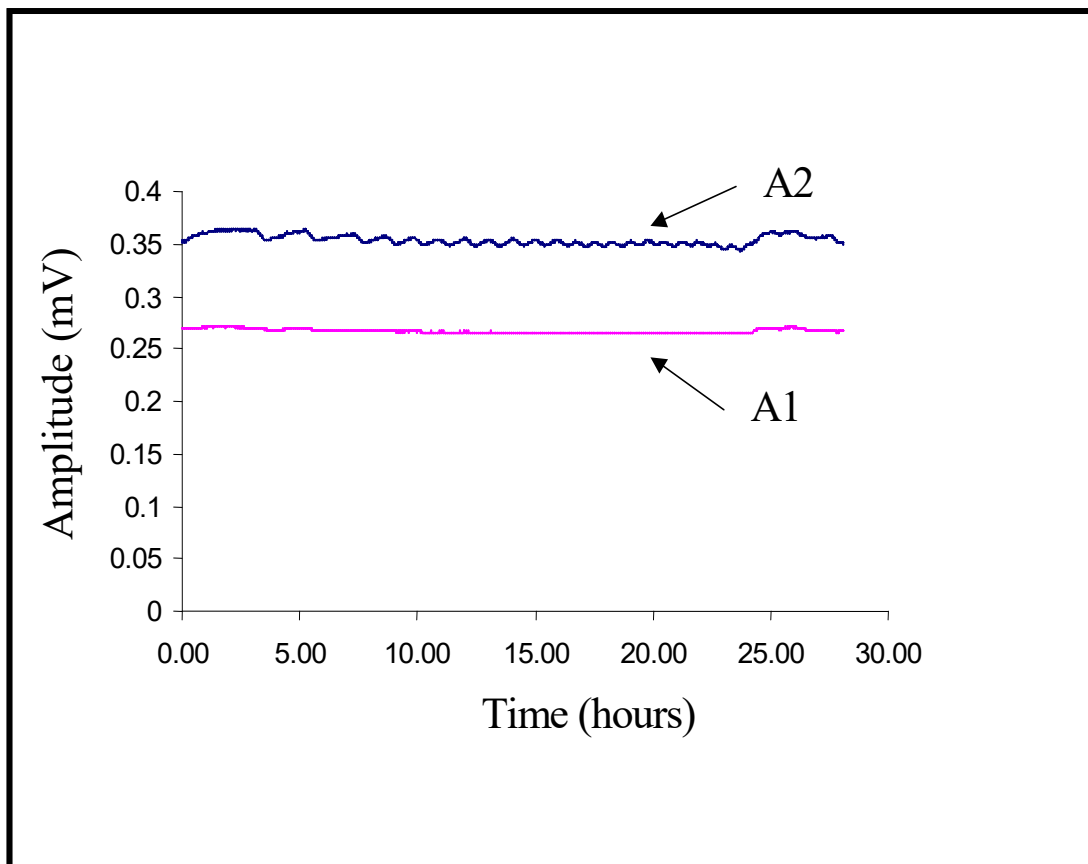


# Παρακολούθηση κόπωσης με μη γραμμική ακουστική

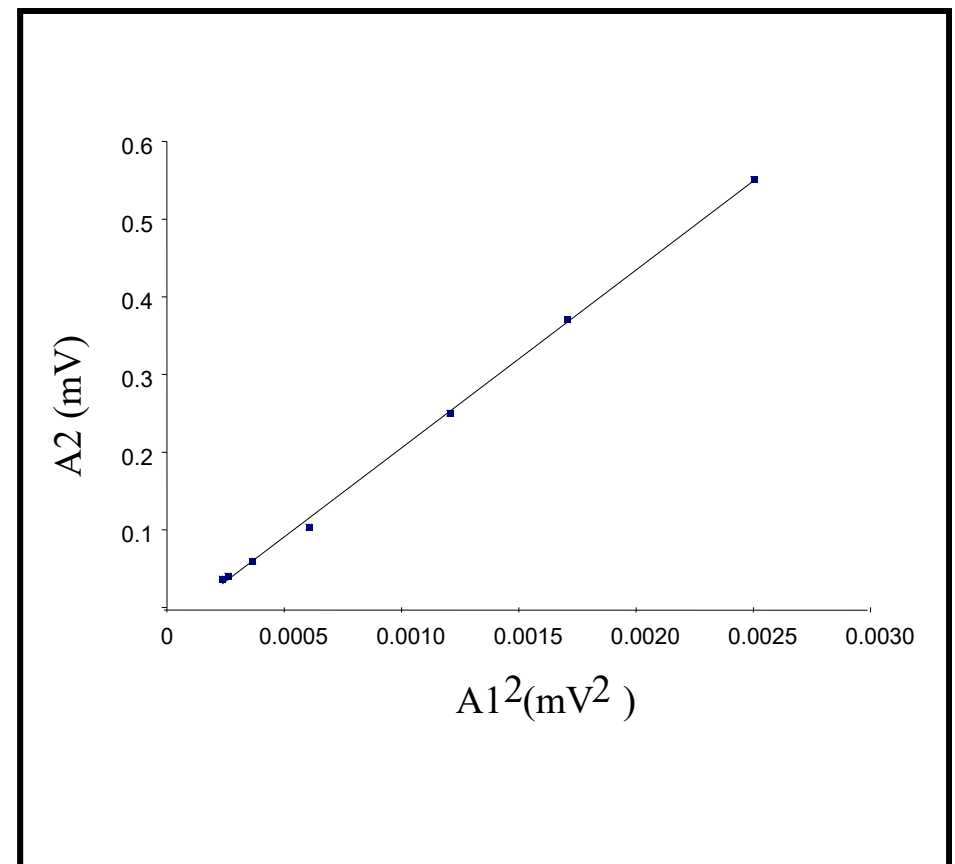


# Σταθερότητα μετρήσεων και γραμμικότητα του συστήματος

Long term stability of the amplitude measurements



Variation of second harmonic as a function of fundamental

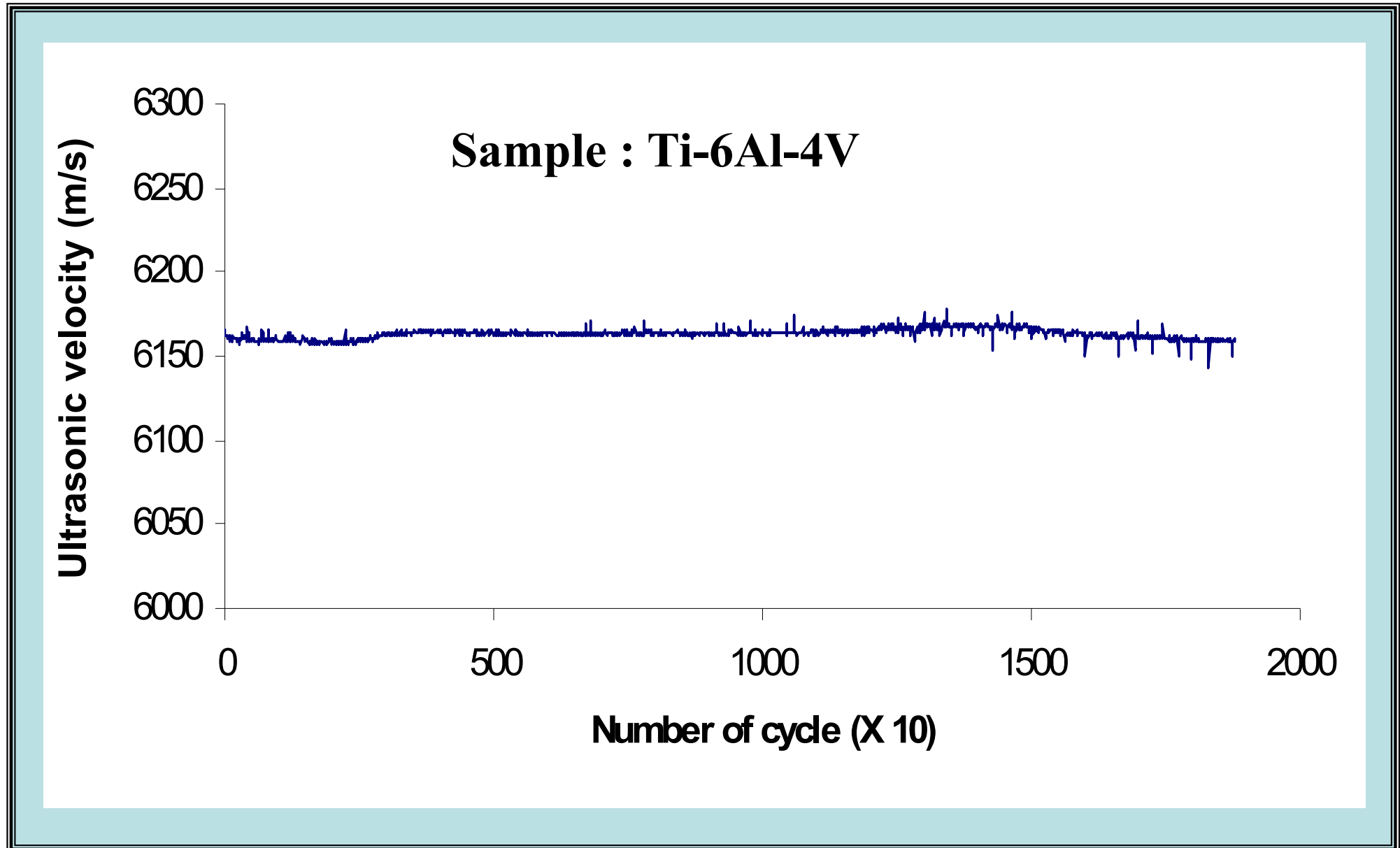


# Συνθήκες δοκιμής κόπωσης

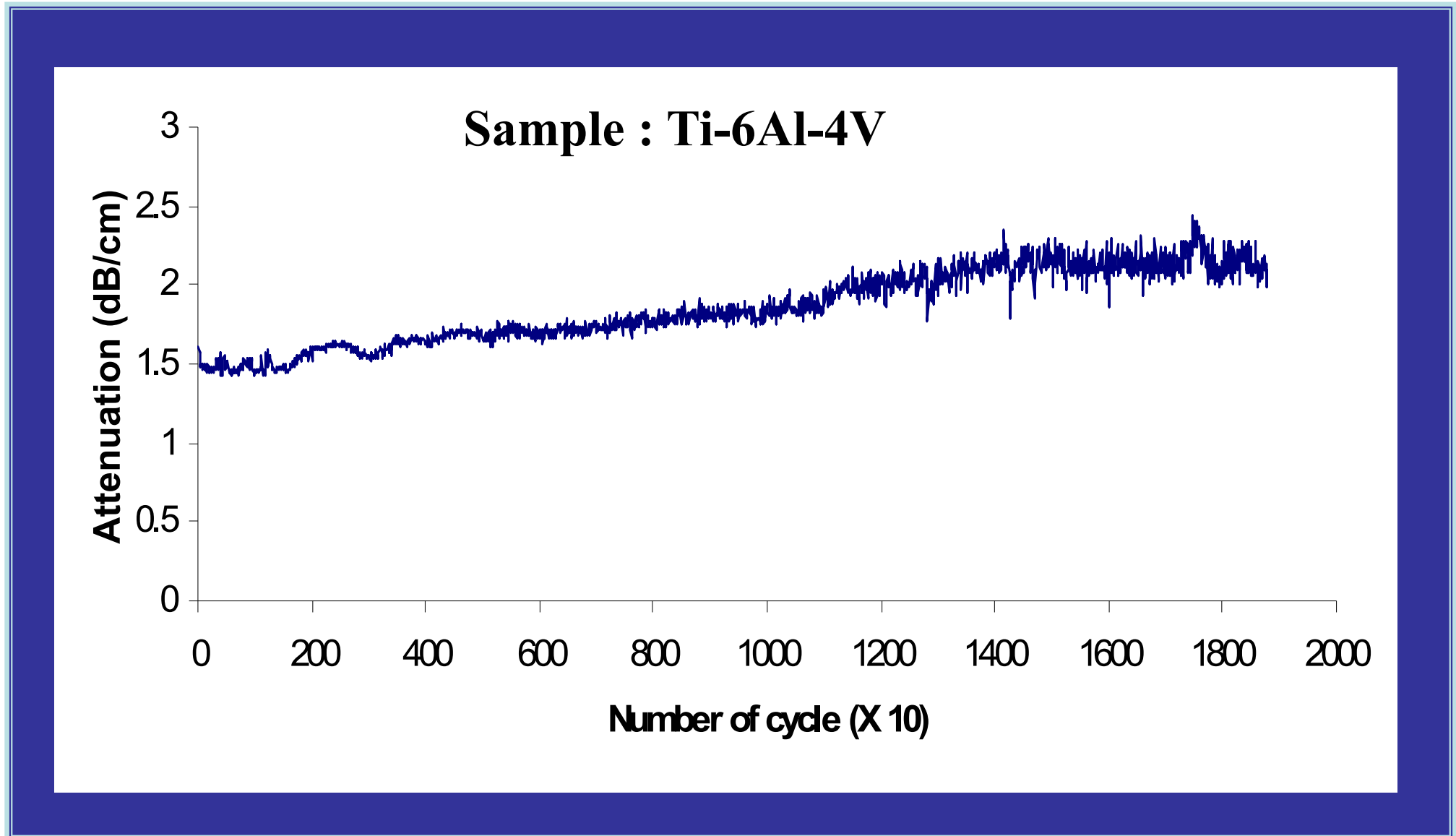
- **Maximum stress applied: 850 MPa, R ratio: 0.1**
- **Cyclic loading frequency: 1 Hz**
- **Measurement interval : 10 cycles**
- **Measurements performed at zero load**
- **$A_1$  and  $A_2$  measured in real-time, as the sample was fatigued**



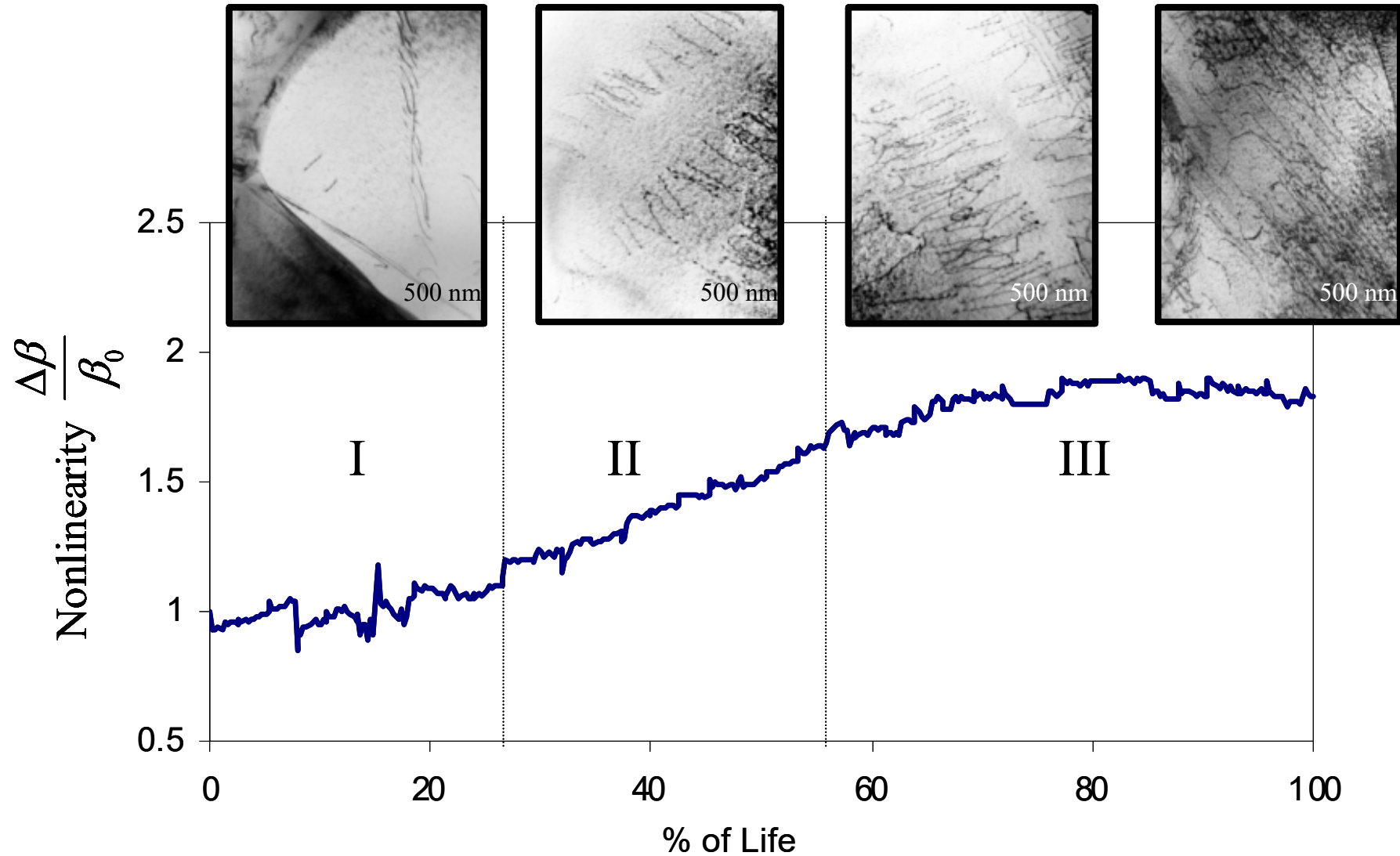
# Μεταβολή της ταχύτητας διαμηκών κυμάτων κατά την κόπωση



# Μεταβολή της απόσβεσης κατά την κόπωση



# Συσχετισμός TEM και κανονικοποιημένης μη-γραμμικότητας στο Ti-6Al-4V



# Πυκνότητα διαταραχών και κανονικοποιημένη μη-γραμμικότητα στο Ti-6Al-4V

