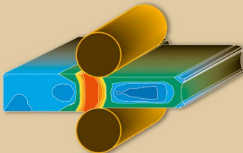


ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ DR.-ING. HABIL.

ΚΩΝ/ΝΟΣ - ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ Ε. ΜΠΟΥΖΑΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Μορφοποιήσεις με πλαστική παραμόρφωση υλικού



ISBN 960-431-614-1

© Copyright: Κ.-Δ. Μπουζάκης, Εκδόσεις Ζήτη, Απρίλιος 2000, Θεσσαλονίκη

Η κατά οποιονδήποτε τρόπο και μέσο αναπαραγωγή, δημοσίευση ή χρησιμοποίηση όλου ή μερών του βιβλίου αυτού απαγορεύεται χωρίς την έγγραφη άδεια του συγγραφέα και εκδότη.



Εκτύπωση: **Π. ΖΗΤΗ & Ια ΟΕ**
18^ο χλμ Θεσσαλονίκης-Περαιάς
Τ.Θ. 171, Νέοι Επιβάτες, Θεσσαλονίκη, Τ.Κ. 570 19
Τηλ (0392) 72 222 ☎ (με ραμιά) • Fax (0392) 72 229

Διανομή: **ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ**
Αρμενοπούλου 27
Τ.Κ. 546 35, Θεσσαλονίκη
Τηλ (031) 203 720 • Fax (031) 211 305
www.ziti.gr e-mail: info@ziti.gr

Η Διαμορφωτική Μηχανολογία πραγματεύεται τις μεθόδους και τα μέσα υλοποίησης των μηχανικών κατασκευών και διατάξεων. Δύο μεγάλες κατηγορίες τέτοιων μεθόδων, είναι οι μηχανουργικές κατεργασίες με αφαίρεση και αυτές με παραμόρφωση υλικού του τεμαχίου κατά τη μορφοποίησή του.

Το παρόν βοήθημα αναφέρεται στη δεύτερη από τις παραπάνω δύο μνημονευθείσες κατηγορίες μορφοποιήσεων, δηλ. σε αυτή με πλαστική παραμόρφωση του υλικού του τεμαχίου κατά την κατεργασία του, δίδοντας έμφαση στα φαινόμενα, που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεξαγωγή τους, στους μηχανισμούς πλαστικής διαρροής του υλικού, καθώς και στους τρόπους της θεωρητικής προσέγγισής τους. Τοιουτοτρόπως αποσκοπείται η δυνατότητα κατανόησης και περιγραφής των πολυπλόκων μηχανισμών, κατά τη διεξαγωγή των μηχανουργικών κατεργασιών με παραμόρφωση υλικού, που επηρεάζουν τη διαστατική ακρίβεια του τεμαχίου, τις εν γένει ιδιότητές του και την συμπεριφορά του κατά την χρησιμοποίησή του.

Οι εξελίξεις των τεχνικών υπολογισμών με αρχές πεπερασμένων στοιχείων (FEM) παρέχουν σήμερα εξαιρετικές δυνατότητες μαθηματικής προσέγγισης συνθέτων μηχανισμών παραμόρφωσης - αστοχίας των υλικών κατά την μορφοποίησή τους. Μέσω αυτών καθίσταται εφικτή η διερεύνηση της επίδρασης όλων των σχετικών παραμέτρων επί της πορείας διεξαγωγής μιας κατεργασίας, καθώς και επί του αποτελέσματος της, δηλ. επί του ετοιμού τεμαχίου. Εν προκειμένω έμφαση δίδεται στις καταστατικές εξισώσεις και στις αρχές με τη βοήθεια των οποίων διεξάγονται οι υπολογισμοί με χρησιμοποίηση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Καινοτομίες στην περιοχή των υλικών (χρησιμοποίηση) λεπτών σκληρών επικαλύψεων, υλικά εργαλείων με προηγμένες ιδιότητες, κ.λπ.), βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα των διαφόρων μεθόδων μορφοποίησης και για το λόγο αυτό, δίδεται έμφαση στις σχετικές εφαρμογές.

Μέσω των επιλεγμένων ασκήσεων, που συνοδεύουν τον παρόν βοήθημα, επιδιώκεται η εμπέδωση βασικών μεθοδολογιών και η καλύτερη κατανόηση των σχετικών γνώσεων.

Θεσσαλονίκη, Απρίλιος 2000

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Στοιχεία θεωρίας πλαστικότητας μετάλλων 7-30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Κριτήρια πλαστικής διαρροής και υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών κατά τις μορφοποιήσεις με πλαστική παραμόρφωση 31-48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πειραματικός προσδιορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών και ιδιοτήτων υλικών κατά τις διαμορφώσεις με πλαστική παραμόρφωση 49-58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Εργαλεία διαμορφώσεως 59-73

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Ταξινόμηση κατεργασιών διαμορφώσεως 75-94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπίεση και σφυρηλάτηση 95-114

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Ελαση με κυλινδρικά έλαστρα 115-126

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Διέλαση 127-150

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Κάμψη ελασμάτων 151-185

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

Διάτμηση ελασμάτων 187-216

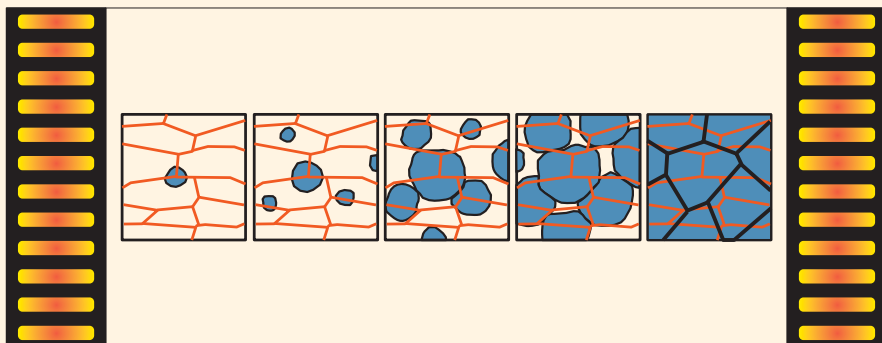
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

Βαθεία κοίλανση και περιώθηση 217-237

ΑΣΚΗΣΕΙΣ 239-250

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Στοιχεία θεωρίας πλαστικότητας μετάλλων



1. Δομή κρυσταλλικού πλέγματος

Σχήμα 01	Στοιχειώδη κρυσταλλικά πλέγματα δομών μετάλλων	10
Σχήμα 02	Δύναμη συνοχής μεταξύ ατόμων σαν συνάρτηση της μεταξύ τους απόστασης.....	10
Σχήμα 03	Πολυκρυσταλλική δομή μετάλλου	11
Σχήμα 04	Παραδείγματα συστημάτων ολίσθησης διαφόρων μετάλλων	11

2. Ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις κρυσταλλικού πλέγματος

Σχήμα 05	Πλαστική παραμόρφωση (σχηματικά) κρυσταλλικού πλέγματος μονοκρυσταλλικού υλικού σε διάφορες περιπτώσεις καταπονήσεων	12
Σχήμα 06	Ενδεικτικές τιμές αντοχής σε εφελκυσμό και σε διάτμηση μονοκρυσταλλικού υλικού με ιδανικό και όχι τέλειο πλέγμα, καθώς και του αντίστοιχου πολυκρυσταλλικού.....	12
Σχήμα 07	Ελαστική παραμόρφωση κρυσταλλικού πλέγματος.....	13
Σχήμα 08	Πλαστική παραμόρφωση κρυσταλλικού πλέγματος μέσω διάτμησης	13
Σχήμα 09	Προσδιορισμός επιπέδου μέγιστης διατμητικής τάσης.....	14
Σχήμα 10	Υπολογισμός μέγιστης διατμητικής τάσης	14
Σχήμα 11	Ειδικές θέσεις των επιπέδων ολίσθησης σε σχέση με την διεύθυνση της δύναμης που εφαρμόζεται.....	15

3. Αταξίες κρυσταλλικού πλέγματος και μετατοπίσεις τους

Σχήμα 12	Αιτίες διαφοροποίησης των ιδεατών ιδιοτήτων μηχανικής αντοχής των υλικών	15
Σχήμα 13	Σημειακές αταξίες πλέγματος	16
Σχήμα 14	Είδη μονοδιάστατων αταξιών	16
Σχήμα 15	Προσομοιωτικά πρότυπα (μοντέλα) για τον υπολογισμό της κατανομής τάσεων που προκαλούνται από Ι. κλιμακωτές, ΙΙ. ελικοειδείς αταξίες με εφαρμογή της θεωρίας της ελαστικότητας	17
Σχήμα 15α	Τάσεις που δημιουργούνται στην περιοχή της γραμμής αταξίας κλιμακωτής αταξίας	17
Σχήμα 16	Κρυσταλλικές δομές σε όρια κόκκων.....	18
Σχήμα 17	Μετατόπιση κλιμακωτών αταξιών υπό την επίδραση διατμητικής τάσης.....	18
Σχήμα 18	Αλληλοεξουδετέρωση κλιμακωτών ετεροσέμων αταξιών	19
Σχήμα 19	Μετατόπιση κλιμακωτής αταξίας με ασυνέχεια στην γραμμή αταξίας μέσω διάχυσης ατόμων	19

Σχήμα 20	Συγκέντρωση αταξιών μεταξύ της περιοχής δημιουργίας τους και εμποδίων μετατόπισής τους.....	20
Σχήμα 21	Δημιουργία αταξιών σε κεκαμένο μονοκρυσταλλικό υλικό και πολυγωνική διάταξή τους.....	20
Σχήμα 22	Τρόποι μετατόπισης ελικοειδών αταξιών.....	21
Σχήμα 23	Δημιουργία διδύμων κρυσταλλικών δομών.....	21
Σχήμα 24	Στερεά διαλύματα υποκατάστασης και ένθεσης σε ενδιάμεσες θέσεις	22

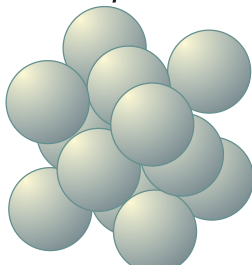
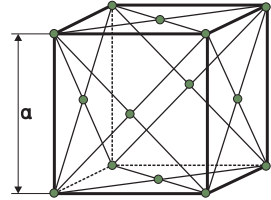
4. Τάσεις εφελκυσμού και πλαστικής διαρροής - Βαθμός παραμόρφωσης

Σχήμα 25	Δημιουργία ρωγμών λόγω συγκέντρωσης αταξιών σε μικρορωγμές ή άλλα εμποδία (δίδυμες δομές, όρια κόκκων, κλπ)	22
Σχήμα 26	Προκύπτουσες τάσεις κατά την επαλληλία μονοαξονικών τάσεων.....	23
Σχήμα 26α	Οριακός βαθμός παραμόρφωσης (μέχρι τη θραύση) σε διάφορες περιπτώσεις εντατικής κατάστασης του υλικού	23
Σχήμα 26β	Ορισμοί μεγεθών.....	24
Σχήμα 27	Συμβατική και πραγματική τάση κατά την δοκιμασία εφελκυσμού	24
Σχήμα 28	Τυπική μορφή συστολής θραύσης στην περιοχή του μέσου δοκιμίου εφελκυσμού.....	25
Σχήμα 29	Τάση και ανηγμένο ιδανικό έργο παραμόρφωσης	25
Σχήμα 29α	Τάση και ανηγμένο ιδανικό έργο παραμόρφωσης	26
Σχήμα 30	Επίδραση του βαθμού παραμόρφωσης στις μηχανικές ιδιότητες κατά την ψυχρή παραμόρφωση	26
Σχήμα 31	Διακύμανση οριακής τάσης ελαστικής παραμόρφωσης.....	27
Σχήμα 32	Επίδραση της γήρανσης υλικού στην τάση εφελκυσμού	27

5. Επίδραση αταξιών θερμικών μετασχηματισμών και μηχανικών ιδιοτήτων επί της κρυσταλλικής δομής και παραμόρφωσης

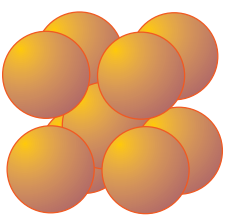
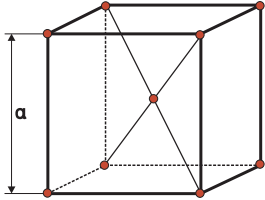
Σχήμα 33	Επίδραση μετατόπισης αταξιών και ανακρυστάλλωσης στην τάση εφελκυσμού.....	28
Σχήμα 34	Επίδραση της μετατόπισης αταξιών και της ανακρυστάλλωσης στις μηχανικές ιδιότητες παραμορφωμένου υλικού.....	28
Σχήμα 35	Επίδραση της θερμοκρασίας και του βαθμού παραμόρφωσης στο μέγεθος των κόκκων κατά την ανακρυστάλλωση	29
Σχήμα 36	Επίδραση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας παραμόρφωσης επί της τάσης διαρροής.....	29
Σχήμα 37	Επίδραση του βαθμού παραμόρφωσης, της ταχύτητας και της θερμοκρασίας επί της τάσης διαρροής	30
Σχήμα 38	Διαδοχικές ανοιπήσεις ανακρυστάλλωσης και βελτίωσης κρυσταλλικού πλέγματος για την αποφυγή θραύσεων κατά την ψυχρή παραμόρφωση.....	30

**Εδροκεντρωμένο
κυβικό**

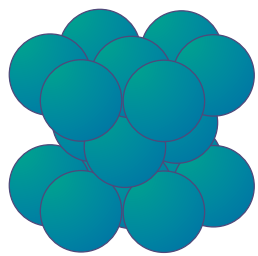
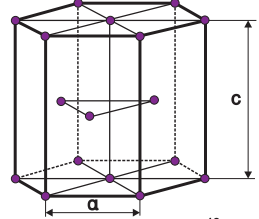
π.χ. γ-Fe : $a \sim 3.64 \cdot 10^{-10} \text{ m}$

**Χωροκεντρωμένο
κυβικό**

π.χ. γ-Fe : $a \sim 2.87 \cdot 10^{-10} \text{ m}$

**Εξαγωνικό
(μέγιστη πυκνότητα)**


π.χ. Mg : $a \sim 3.2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$
 $c \sim 5.2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$

	Πρωτόνιο	Νετρόνιο	Ηλεκτρόνιο	Διάμετρος πυρήνα: $(5,6-20) \cdot 10^{-15} \text{ m}$
Μάζες (kg)	$1,6606 \cdot 10^{-27}$	$1,675 \cdot 10^{-27}$	$9,110 \cdot 10^{-31}$	Διάμετρος ηλεκτρονίου $< 10^{-16} \text{ m}$

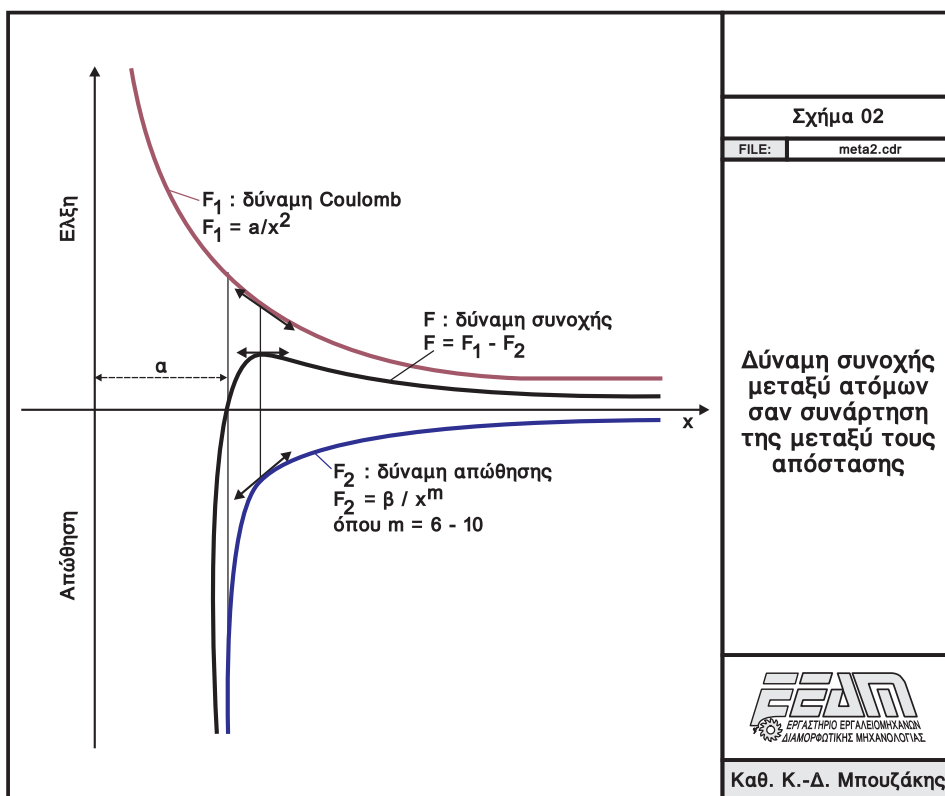
Σχήμα 01

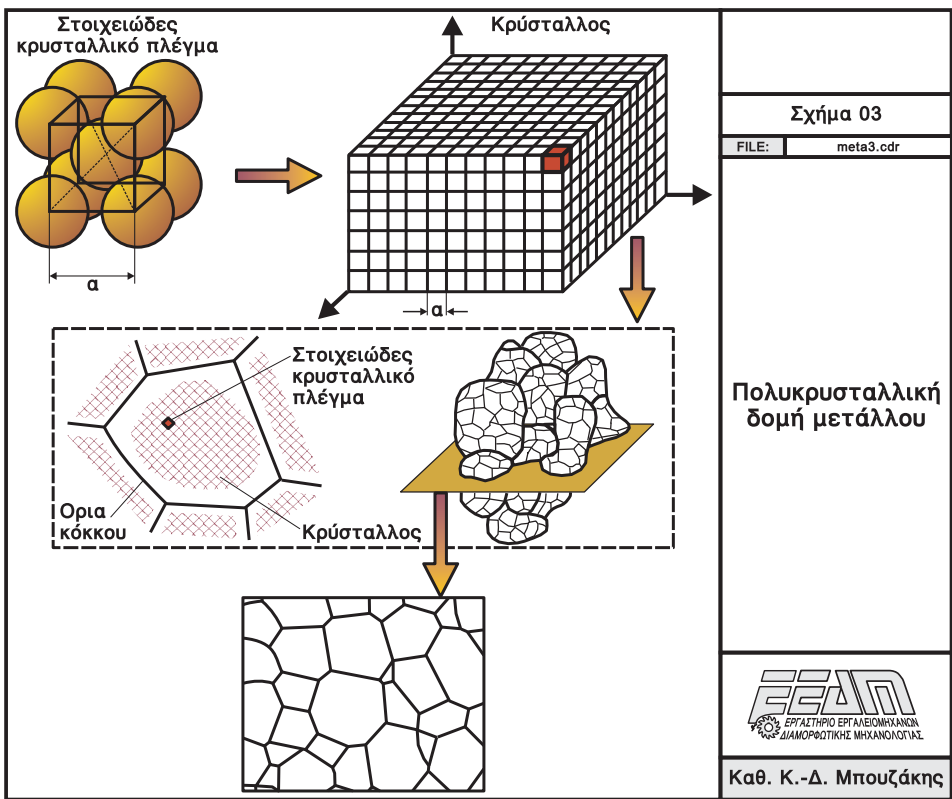
FILE: meta1.cdr








**Στοιχειώδη κρυσταλλικά πλέγματα
δομών μετάλλων**




Καθ. Κ.-Δ. Μπουζάκης






Κρυσταλ- λική δομή	Σύστημα ολίσθησης	Πλήθος			Κρυσταλ- λική δομή	Σύστημα ολίσθησης	Πλήθος		
		Επιπέ- δων ολίσθη- σης	Διευθύν- σεων ολίσθη- σης	Συστημά- των ολίσθησης			Επιπέ- δων ολίσθη- σης	Διευθύν- σεων ολίσθη- σης	Συστημά- των ολίσθησης
Κυβικό εδρο- κεντρωμένο Cu, Al, Ni Pb, Au, Ag γ - Fe		4	3	12	Εξαγωνικό Cd, Zn, Mg Ti, Be		1	3	3
		6	2	12			3	1	3
		12	1	12				6	1
		24	1	24					

Επίπεδο ολίσθησης

 Διεύθυνση ολίσθησης

Σχήμα 04		Παραδείγματα συστημάτων ολίσθησης διαφόρων μετάλλων	 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ
FILE:	meta4.cdr	Καθ. Κ.-Δ. Μπουζάκης	

Εφέλκυσμός

θλίψη

Διάτμηση

Σχήμα 05

FILE: meta5.cdr

Πλαστική παραμόρφωση (σχηματικά) κρυσταλλικού πλέγματος μονοκρυσταλλικού υλικού σε διάφορες περιπτώσεις καταπονήσεων

ΕΕΔΜ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΡΓΑΣΙΟΜΗΧΑΝΩΝ
ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

Καθ. Κ.-Δ. Μπουζάκης

- Θεωρητικά μέγιστη εφελκυστική τάση (= αντοχή σε εφέλκυσμό)

$$\sigma_{\text{θεωρ,max}} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot E}{a}}$$

- Θεωρητικά μέγιστη διατμητική τάση (= αντοχή σε διάτμηση)

$$\tau_{\text{θεωρ,max}} = \frac{G}{30}$$

όπου : E = μέτρο ελαστικότητας
G = μέτρο στρέψης
a = πλευρά κρυσταλλικού πλέγματος
γ = ανηγμένη ενέργεια διάτμησης

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Για σίδηρο E = 200.000 N/mm²
G = 83.000 N/mm²
γ = 2.10⁻⁶ Nm/mm²
a ≈ 3.10⁻¹⁰ m

$\sigma_{\text{θεωρ,max}} \approx 40.000 \text{ N/mm}^2$
 $\tau_{\text{θεωρ,max}} \approx 2.760 \text{ N/mm}^2$

για ιδανικό μονοκρυσταλλικό (ινώδες) υλικό (whiskers)

σ_{max} όχι τέλειου πλέγματος μονοκρυσταλλικού υλικού $\sigma_{\text{θεωρ,max}} / 1000$
 τ_{max} όχι τέλειου πλέγματος μονοκρυσταλλικού υλικού $\tau_{\text{θεωρ,max}} / 150$
 σ_{max} πολυκρυσταλλικού υλικού $\approx \sigma_{\text{θεωρ,max}} / 100$
 τ_{max} πολυκρυσταλλικού υλικού $\approx \tau_{\text{θεωρ,max}} / 15$

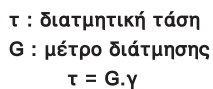
Σχήμα 06

FILE: meta6.cdr

Ενδεικτικές τιμές αντοχής σε εφέλκυσμό και σε διάτμηση μονοκρυσταλλικού υλικού με ιδανικό και όχι τέλειο πλέγμα, καθώς και του αντίστοιχου πολυκρυσταλλικού

ΕΕΔΜ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΡΓΑΣΙΟΜΗΧΑΝΩΝ
ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

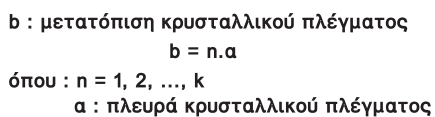
Καθ. Κ.-Δ. Μπουζάκης



FILE:	meta7.cdr
-------	-----------



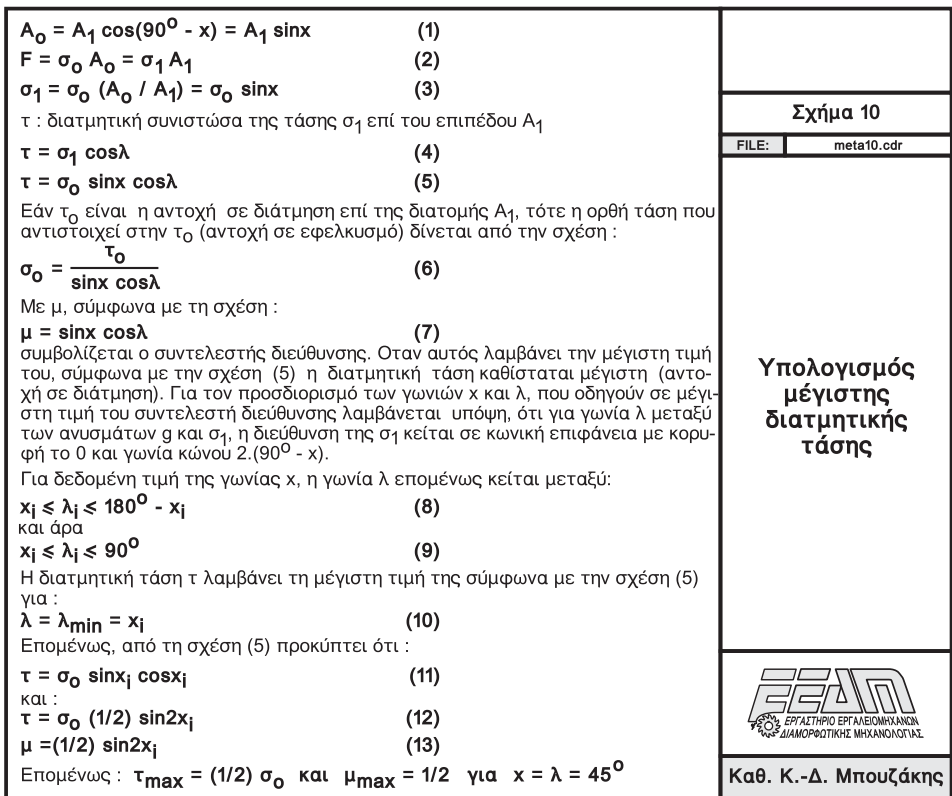
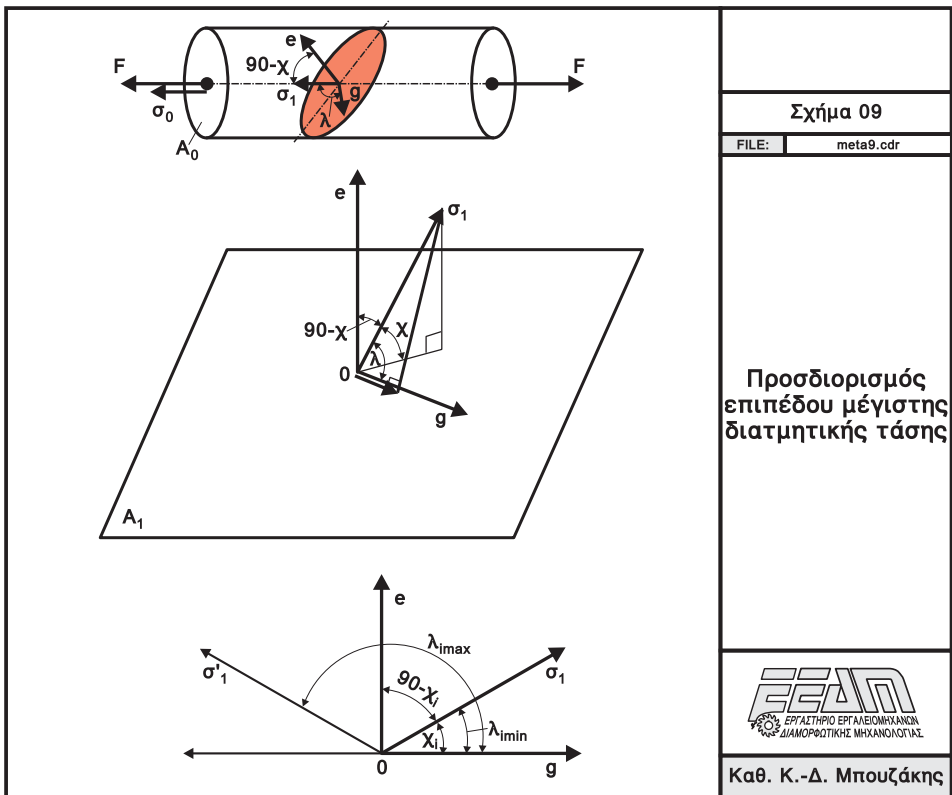
Καθ. Κ.-Δ. Μπουζάκης

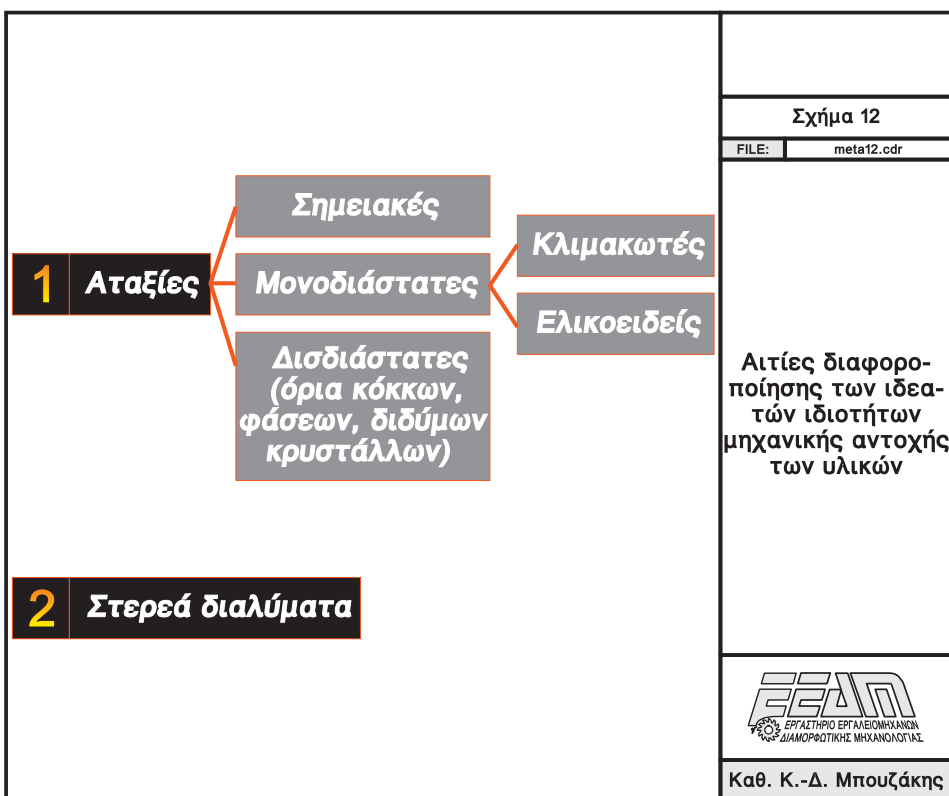
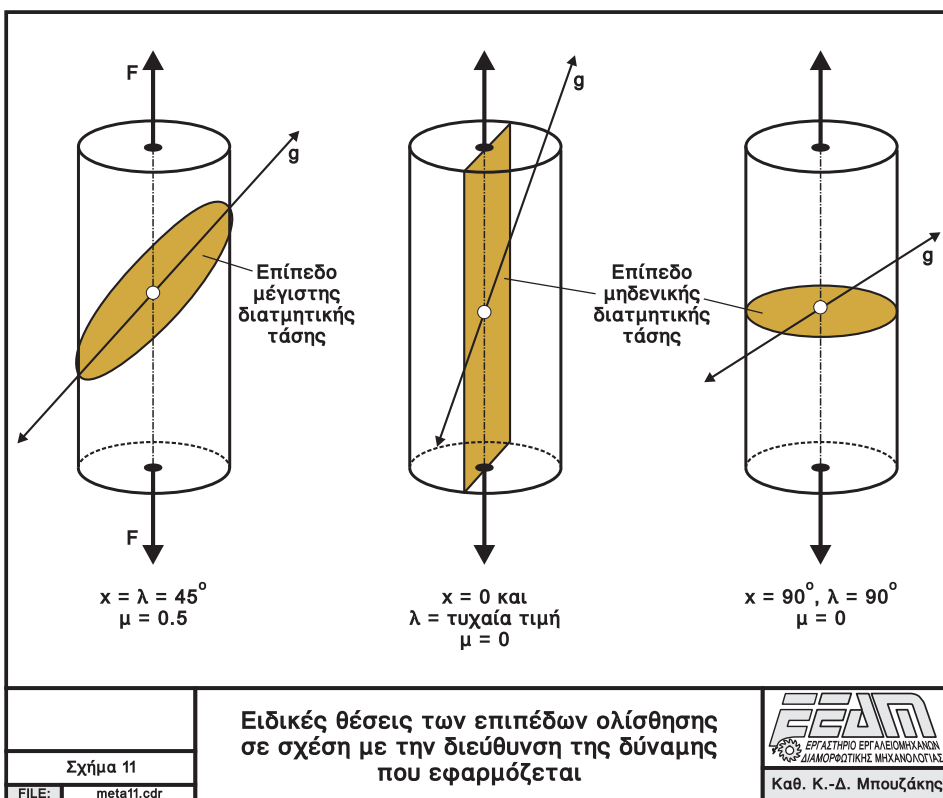


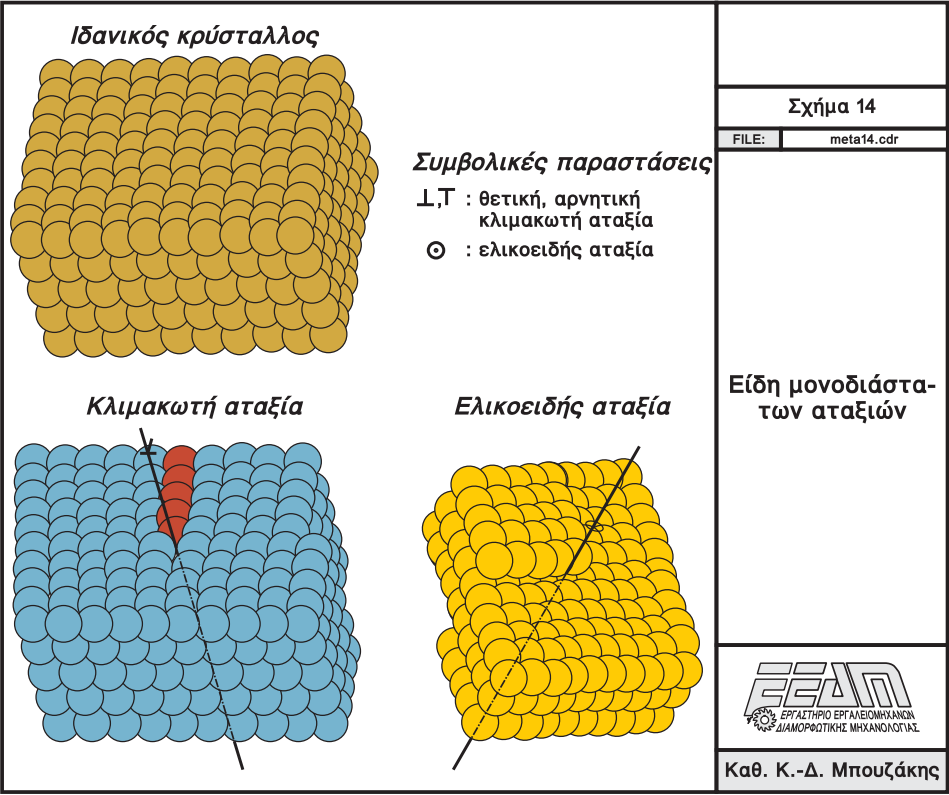
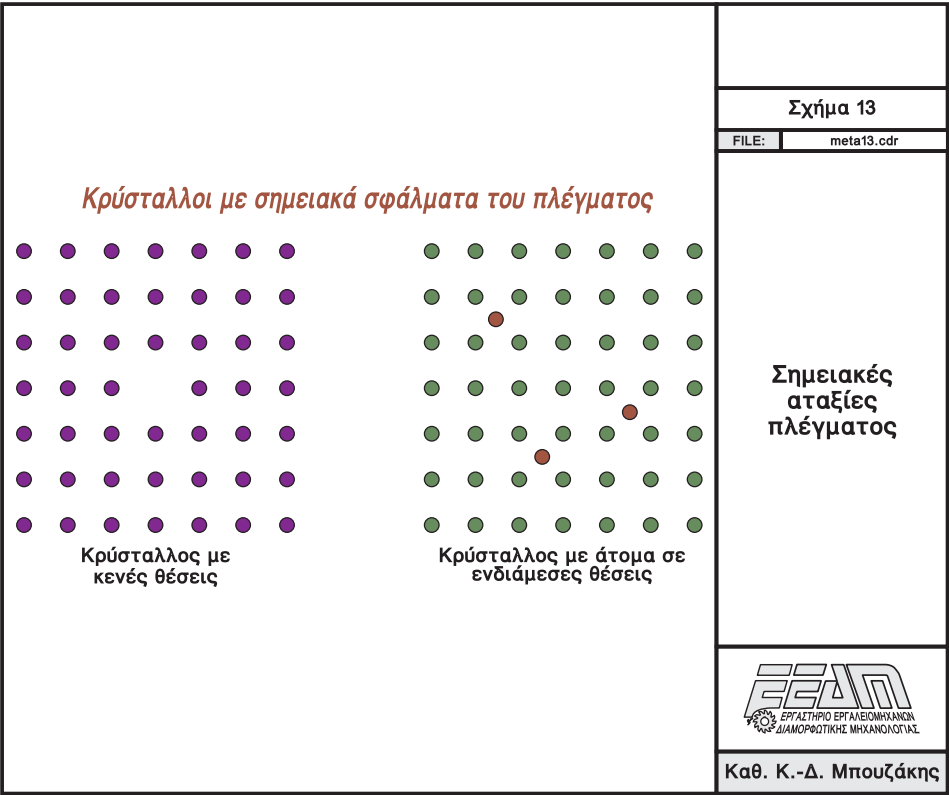
FILE:	meta8.cdr
-------	-----------

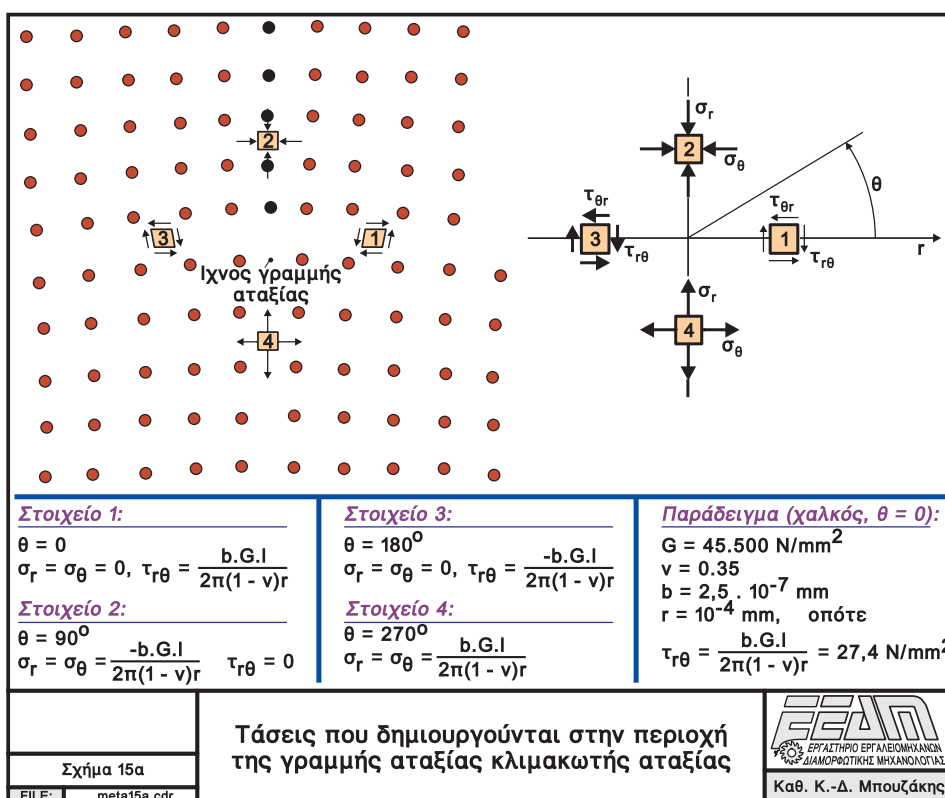
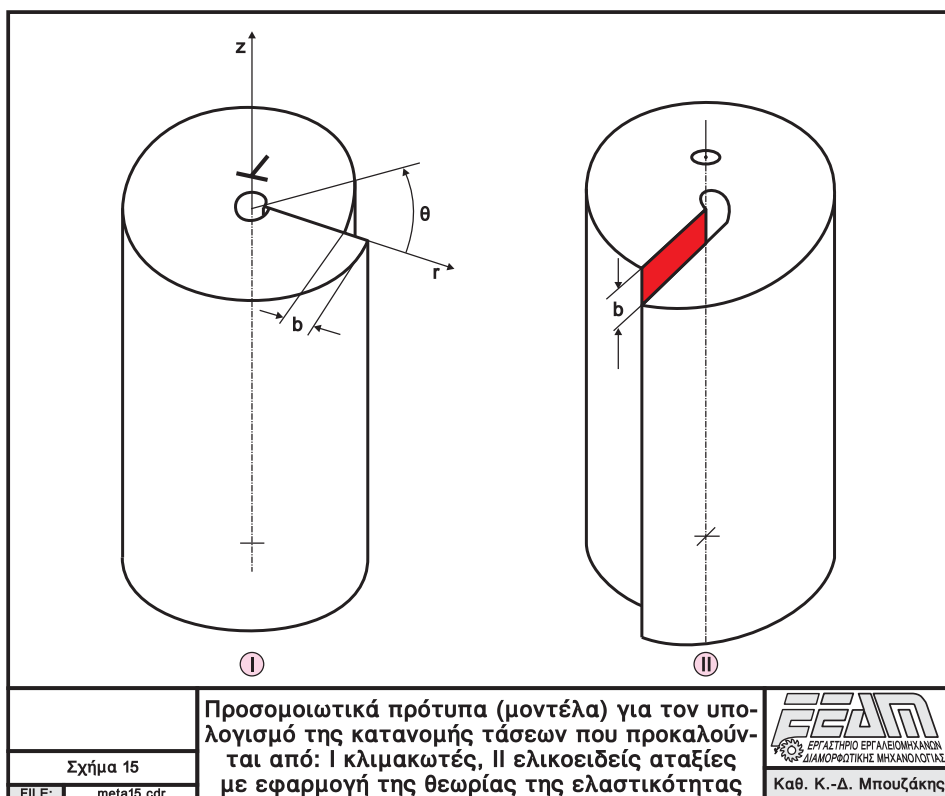


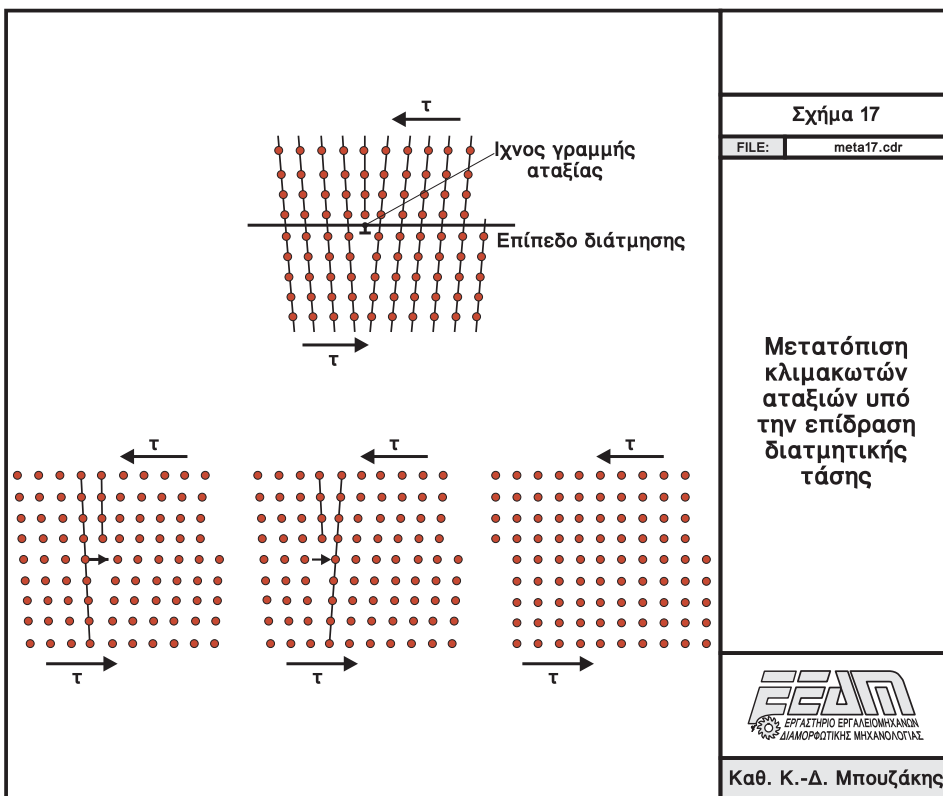
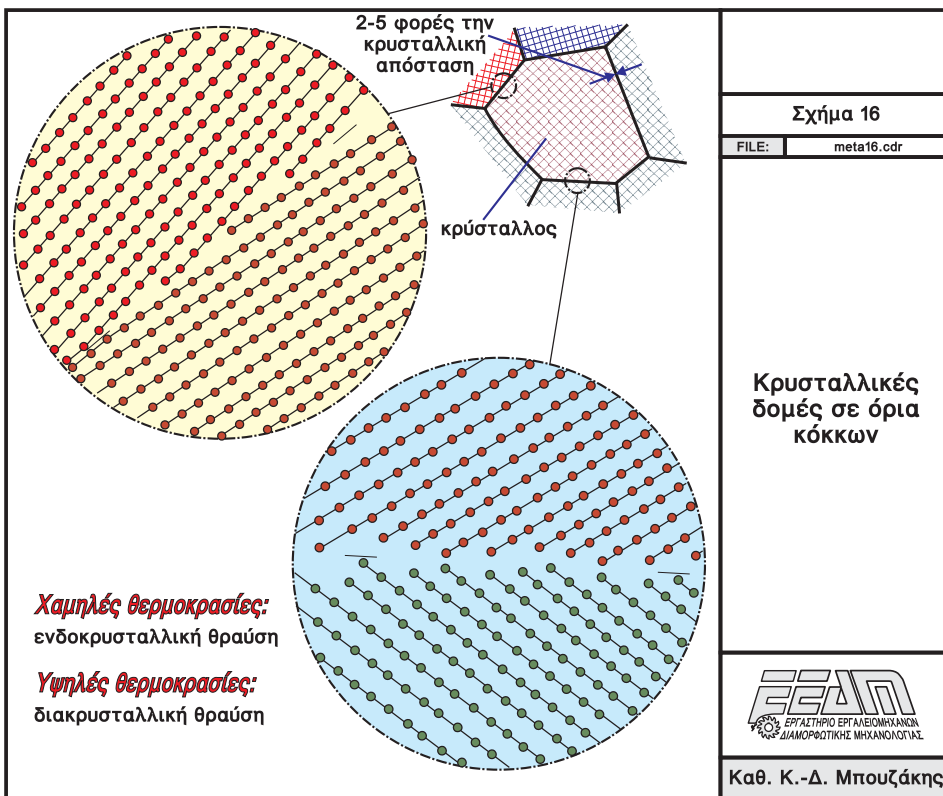
Καθ. Κ.-Δ. Μπουζάκης

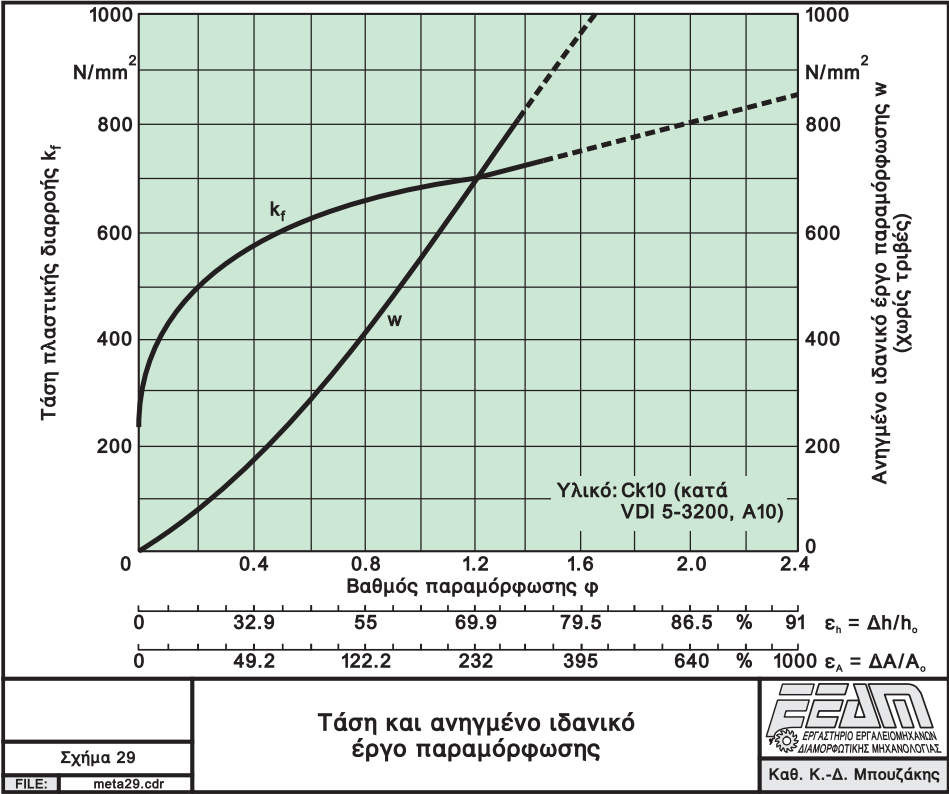
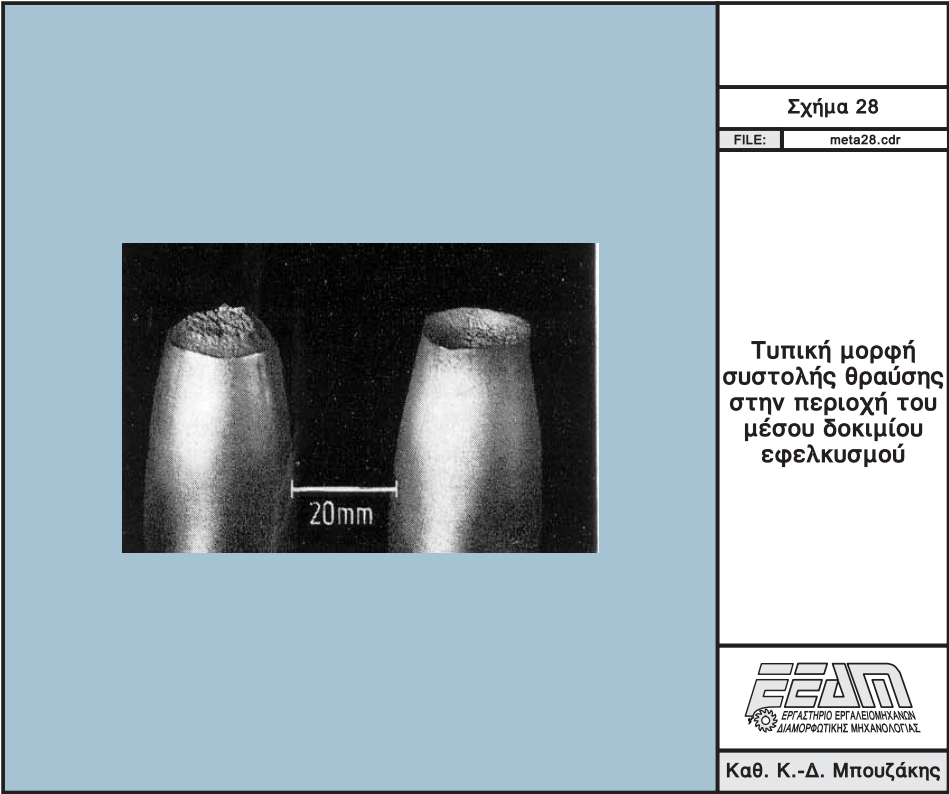


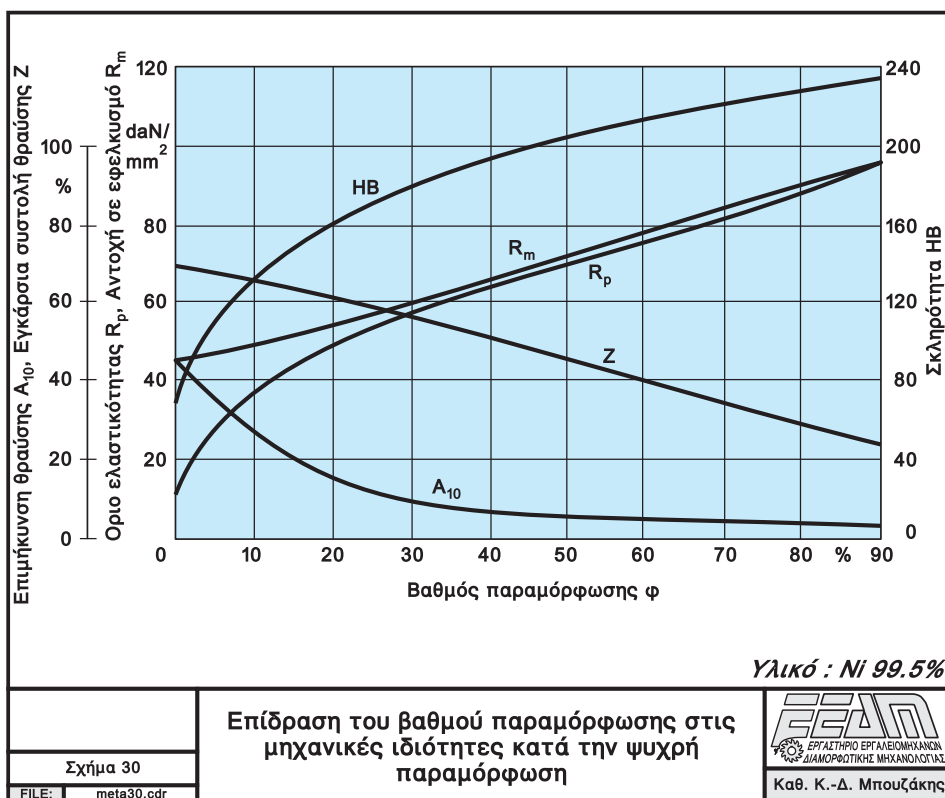
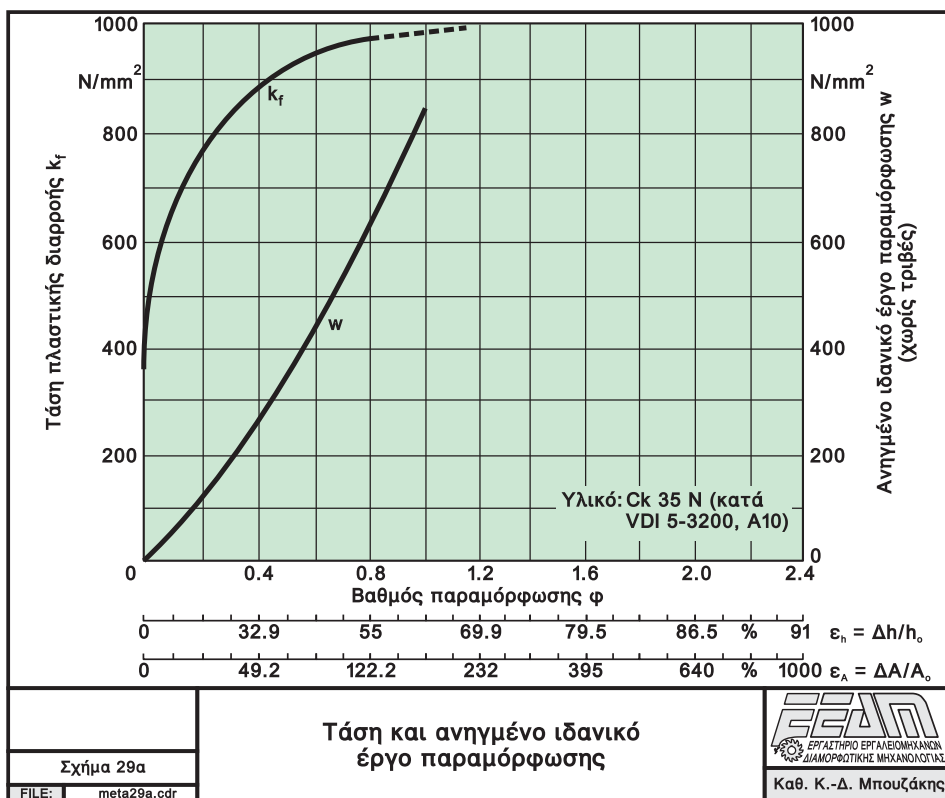


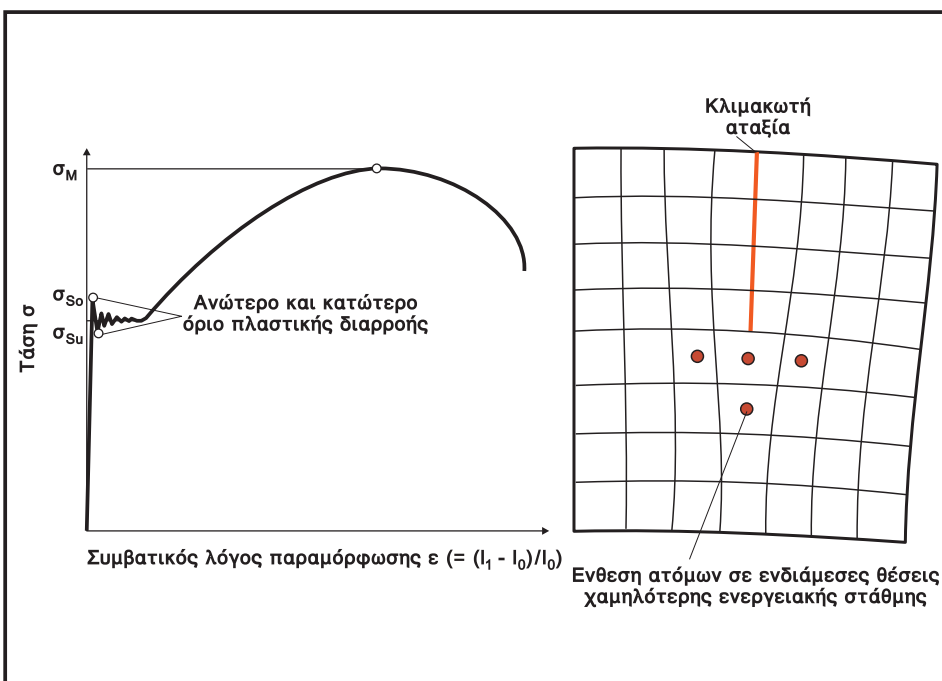




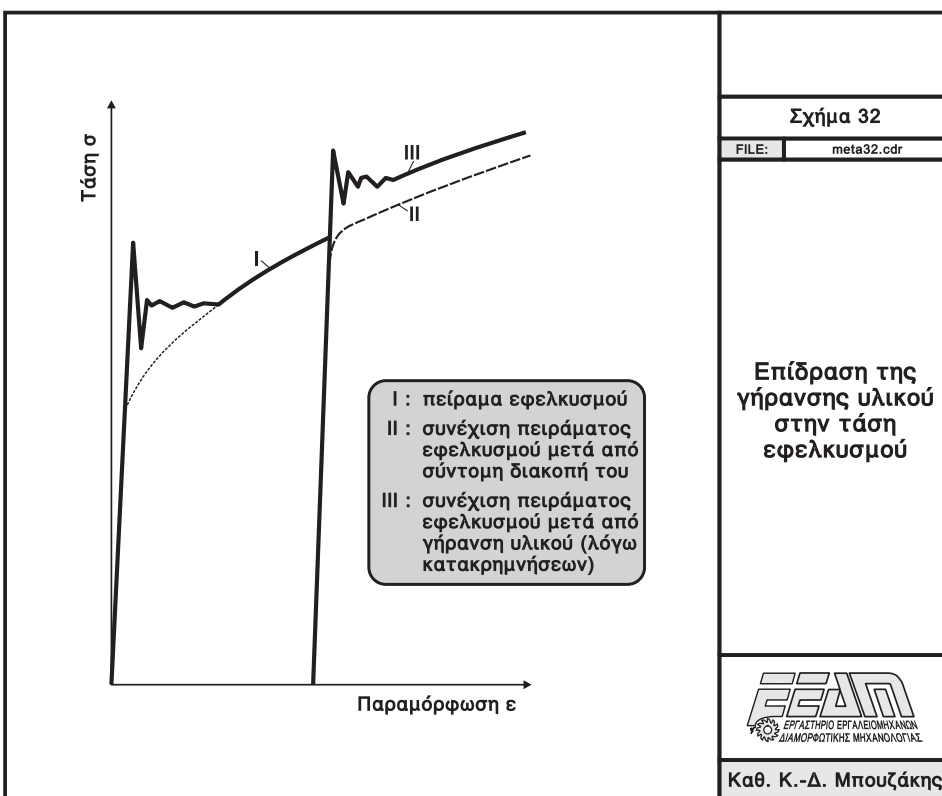


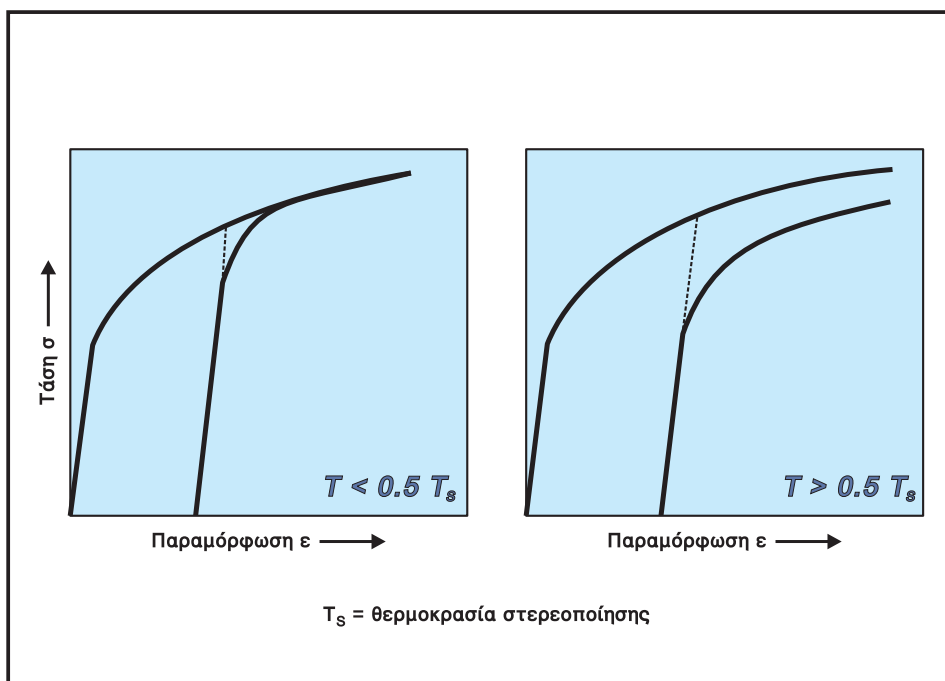




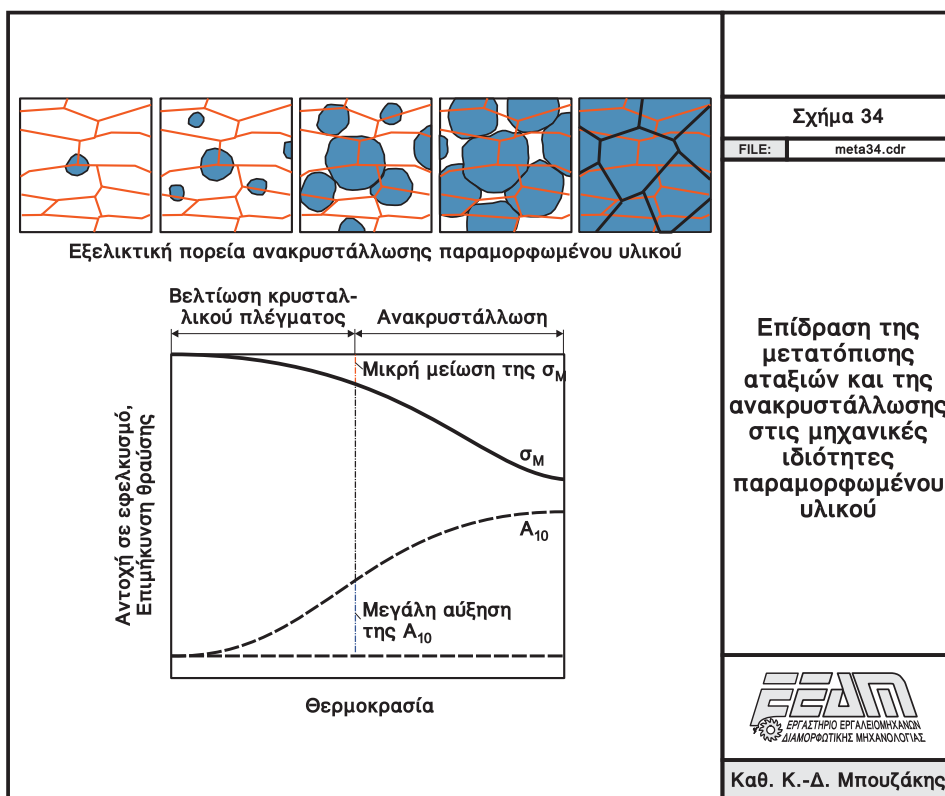


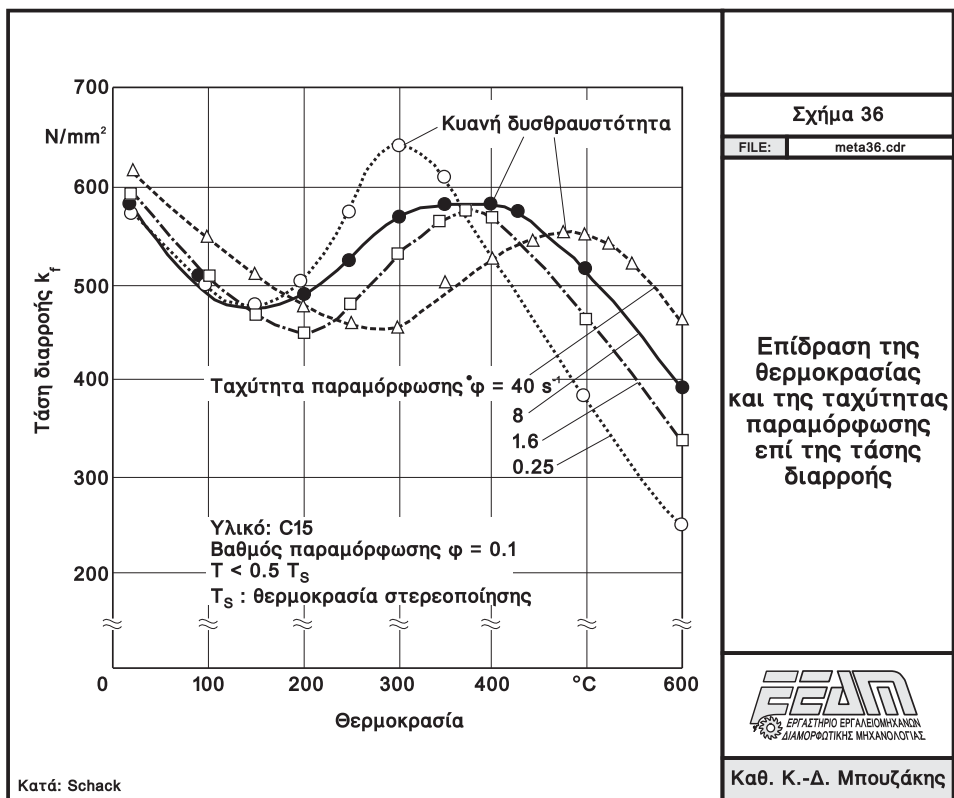
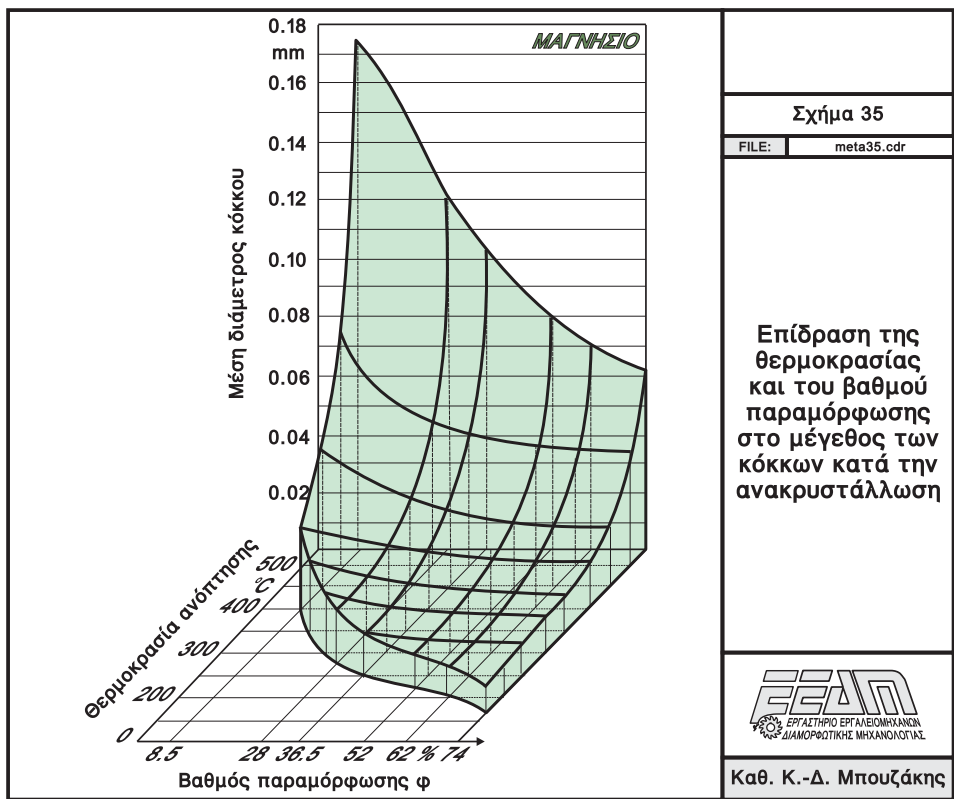
Σχήμα 31	Διακύμανση οριακής τάσης ελαστικής παραμόρφωσης	ΕΕΔΜ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ Καθ. Κ.-Δ. Μπουζάκης
FILE: meta31.cdr		





Σχήμα 33	Επίδραση μετατόπισης αταξιών και ανακρυστάλλωσης στην τάση εφελκυσμού	
FILE: meta33.cdr		





Κατά: Schack

