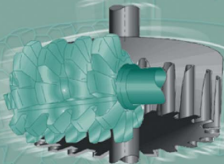


ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ DR.-ING. HABIL.  
**ΚΩΝ/ΝΟΣ - ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ Ε. ΜΠΟΥΖΑΚΗΣ**  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

# Μορφοποιήσεις με αφαίρεση υλικού

2<sup>η</sup> έκδοση



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ



ΕΚΔΟΣΕΙΣ  
**ΖΗΤΗ**

ISBN 960-431-689-3

© Copyright: Κ.-Δ. Μπουζάκης, Εκδόσεις Ζήτη, Νοέμβριος 1999, Β' έκδοση Ιανουάριος 2001  
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.



Παλαιόστανελαθέσιμ  
- Εκδόσεις

Εκδόσεις

**Π. ΖΗΤΗ & Ια ΟΕ**

18<sup>ο</sup> χλμ. Θεσσαλονίκης-Περαιάς (Συνέλευση Πρώτου) • Τ.Θ. 17057  
Θεσσαλονίκη 542 10 • Τ.Φ. (0352) 72 222 (Συνέλευση)

**ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ**

Αρμενισαίου 27 • Τ.Φ. (031) 203 720  
Θεσσαλονίκη 546 35 • Fax (031) 211 305

[www.ziti.gr](http://www.ziti.gr)

e-mail: [ziti@ziti.gr](mailto:ziti@ziti.gr)

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

---

Η Διαμορφωτική Μηχανολογία πραγματεύεται μεταξύ άλλων, τις μεθόδους 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 στην πρώτη από τις παραπάνω μνημονευθείσες κατηγορίες μορφοποιήσεων, δηλ. σε αυτή με αστοχία και στην συνέχεια αφαίρεση του υλικού του τεμαχίου κατά την κατεργασία του, δίδοντας έμφαση στα φαινόμενα, που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεξαγωγή τους, 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 αφαίρεση 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 και ειδικά αυτών με χρησιμοποίηση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) παρέχουν σήμερα εξαιρετικές δυνατότητες μαθηματικής προσέγγισης συνθέτων μηχανισμών παραμόρφωσης - αστοχίας των υλικών κατά την μορφοποίησή τους, καθιστώντας εφικτή τη διερεύνηση της επίδρασης όλων των σχετικών παραμέτρων επί της πορείας διεξαγωγής μιας κατεργασίας, καθώς και επί του αποτελέσματος της, δηλ. επί του έτοιμου τεμαχίου.

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

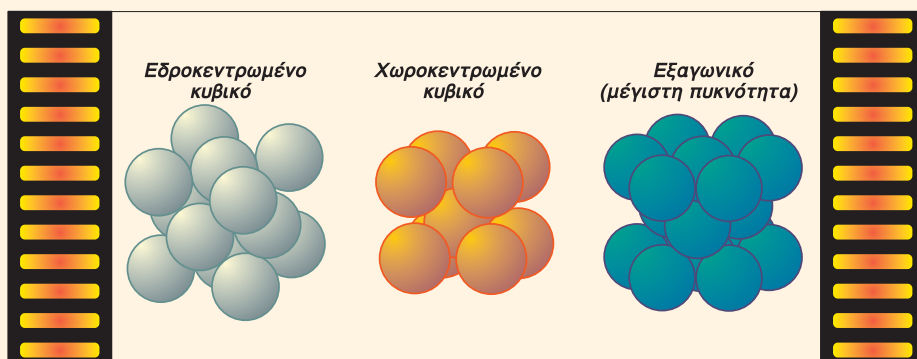
Στις κατεργασίες με αφαίρεση υλικού συγκαταλέγονται και αυτές κατά τις οποίες το υλικό μέσω παραγωγής ενέργειας υπό τη μορφή ηλεκτρικών εκκενώσεων (ηλεκτροδιάβρωση), ακτίνων (π.χ. laser) κ.ά. μετατρέπεται σε απόβλιπτο διαφορετικής δομής (φυσική κατάσταση, χημική σύσταση) σε σχέση με το κατεργαζόμενο υλικό. Λόγω της αυξημένης πρακτικής σπουδαιότητας των κατεργασιών αυτών και ειδικά της ηλεκτροδιάβρωσης καθώς και της κοπής με χρησιμοποίηση ακτίνων laser, δύο κεφάλαια του βιβλίου είναι αφιερωμένα σε αυτές.

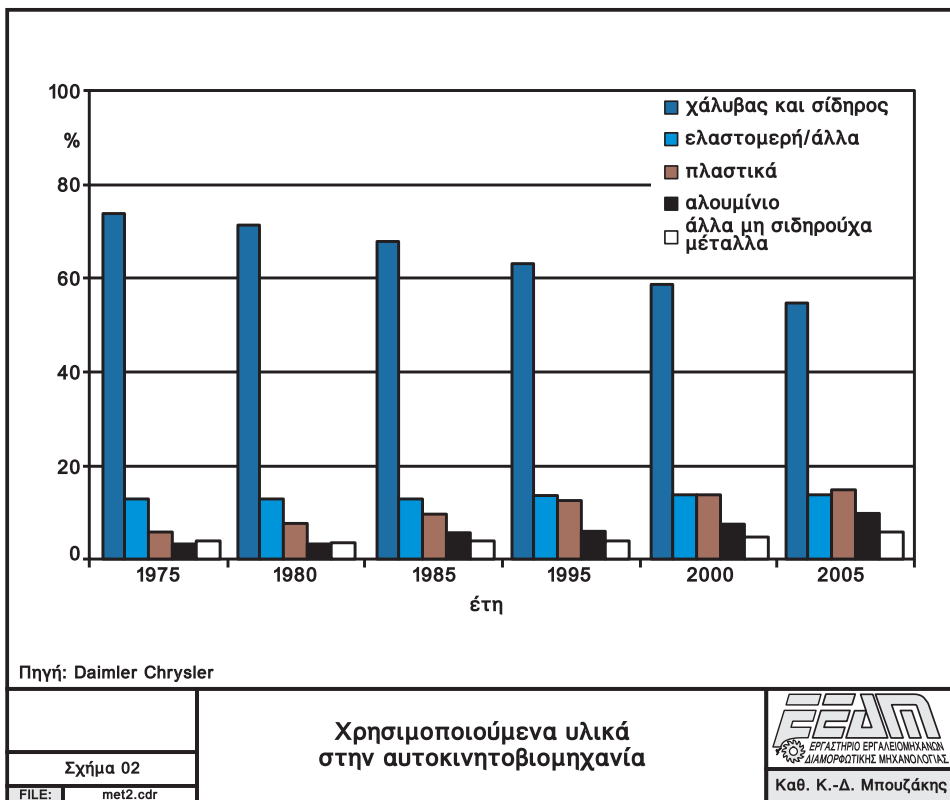
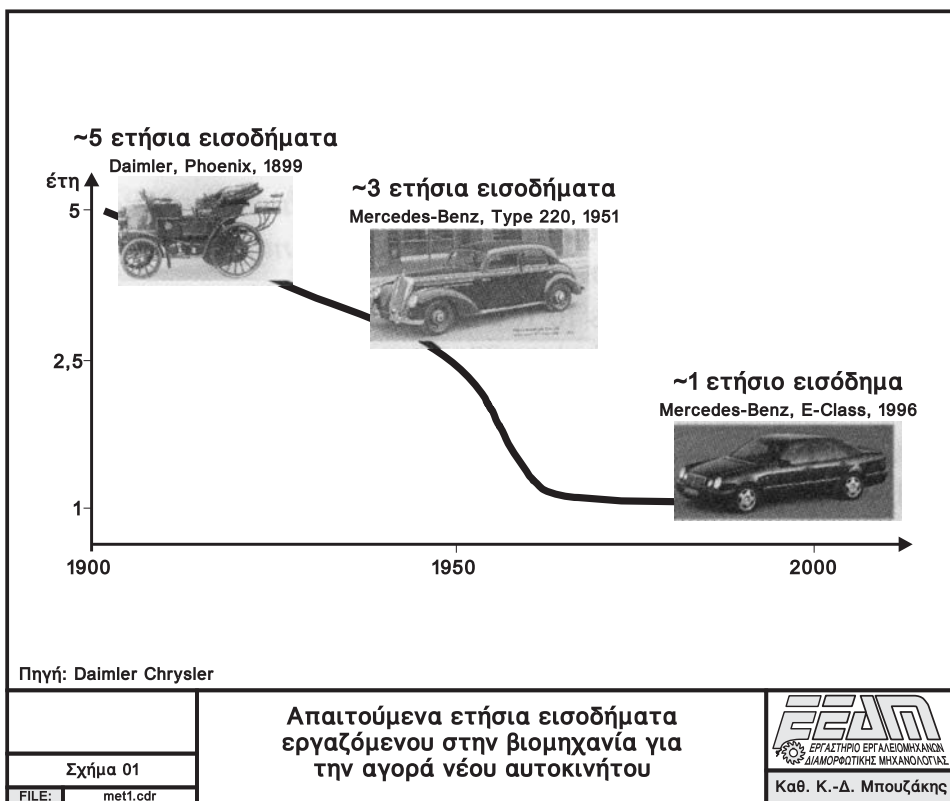
Μέσω των επιλεγμένων ασκήσεων, που συνοδεύουν το παρόν βοήθημα, επιδιώκεται η εμπέδωση βασικών μεθοδολογιών και η καλύτερη κατανόηση των σχετικών γνώσεων.

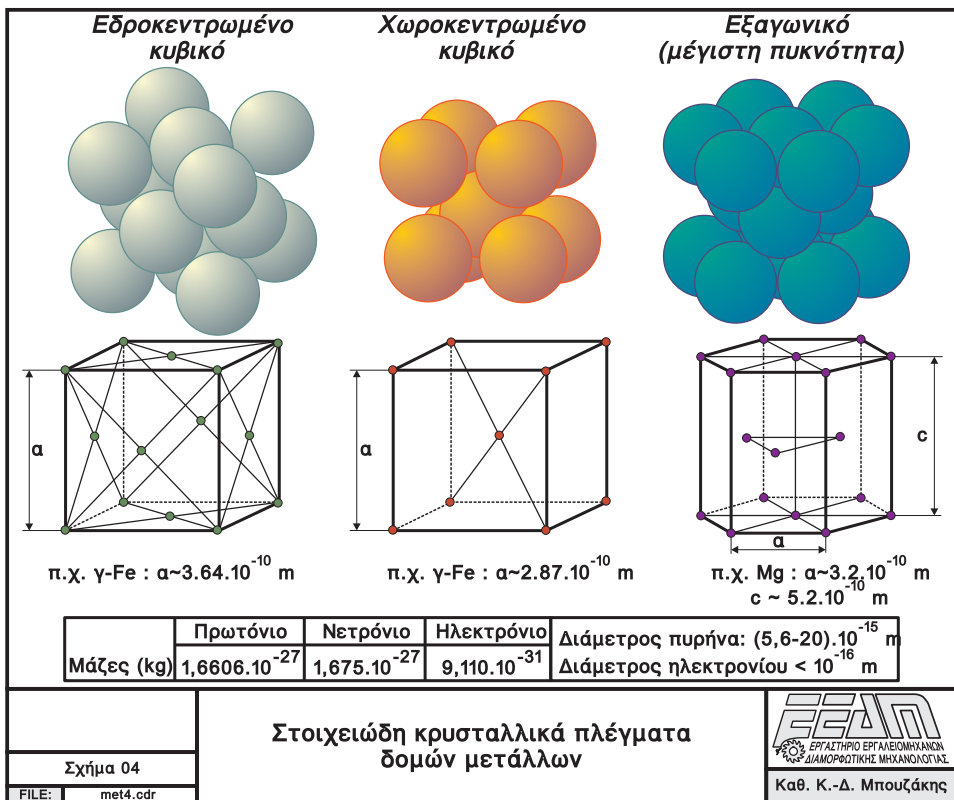
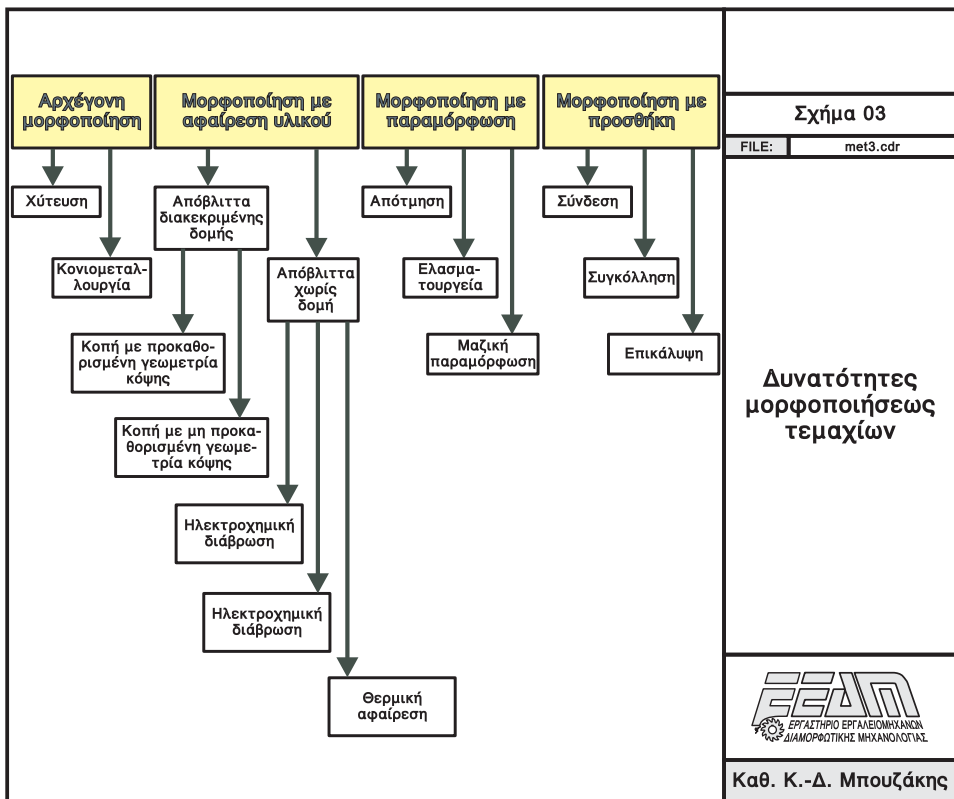
*Θεσσαλονίκη, Ιανουάριος 2001*

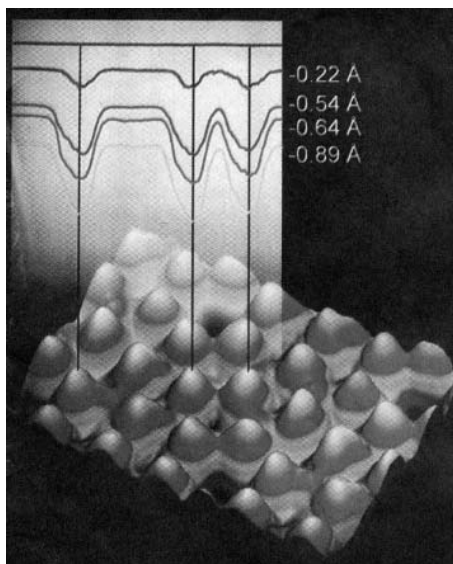
## *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1*

# Μηχανισμοί παραμόρφωσης- εντατικής κατάστασης του υλικού κατά τις μηχανουργικές κατεργασίες μορφοποιήσεων









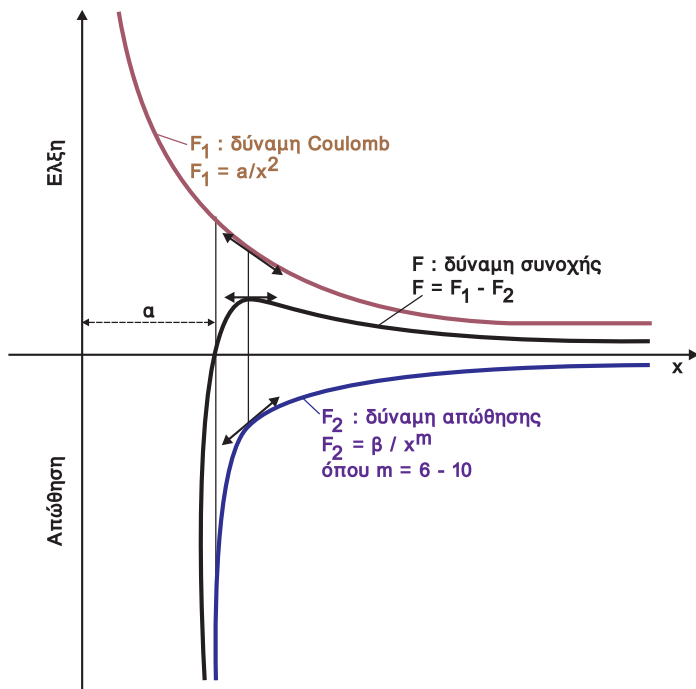
Σχήμα 05

FILE: met5.cdr

Διάταξη ατόμων  
πυριτίου σε  
θερμοκρασία  
περίπου  $-270^{\circ}\text{C}$   
καταγραμμένη  
μέσω ειδικού  
σαρωτικού ατομικού  
μικροσκοπίου



Καθ. Κ.-Δ. Μπουζάκης



Σχήμα 06

FILE: met6.cdr

Δύναμη συνοχής  
μεταξύ ατόμων  
σαν συνάρτηση  
της μεταξύ τους  
απόστασης




Καθ. Κ.-Δ. Μπουζάκης

	ΟΜΑΔΑ I	ΟΜΑΔΑ II	ΟΜΑΔΑ III	ΟΜΑΔΑ IV	ΟΜΑΔΑ V	ΟΜΑΔΑ VI	ΟΜΑΔΑ VII	ΟΜΑΔΑ VIII	ΟΜΑΔΑ 0
1	1H								2He
2	3Li	4Be	5B	6C	7N	8O	9F		10Ne
3	11Na	12Mg	13Al	14Si	15P	16S	17Cl		18Ar
4	19K 29Cu	20Ca 30Zn	21Sc 31Ga	22Ti 32Ge	23V 33As	24Cr 34Se	25Mn 35Br	26Fe 27Co 28Ni	36Kr
5	37Rb 47Ag	38Sr 48Cd	39Y 49In	40Zr 50Sn	41Nb 51Sb	42Mo 52Te	43Ma 53J	44Ru 45Rh 46Pd	54X
6	55Cs 79Au	56Ba 80Hg	57La* 81Tl	72Hf 82Pb	73Ta 83Bi	74W 84Po	75Re 85-	76Os 77Ir 78Pt	86Rn
7	87- 88Ra	89Ac	90Th	91Pa	92U	1)			

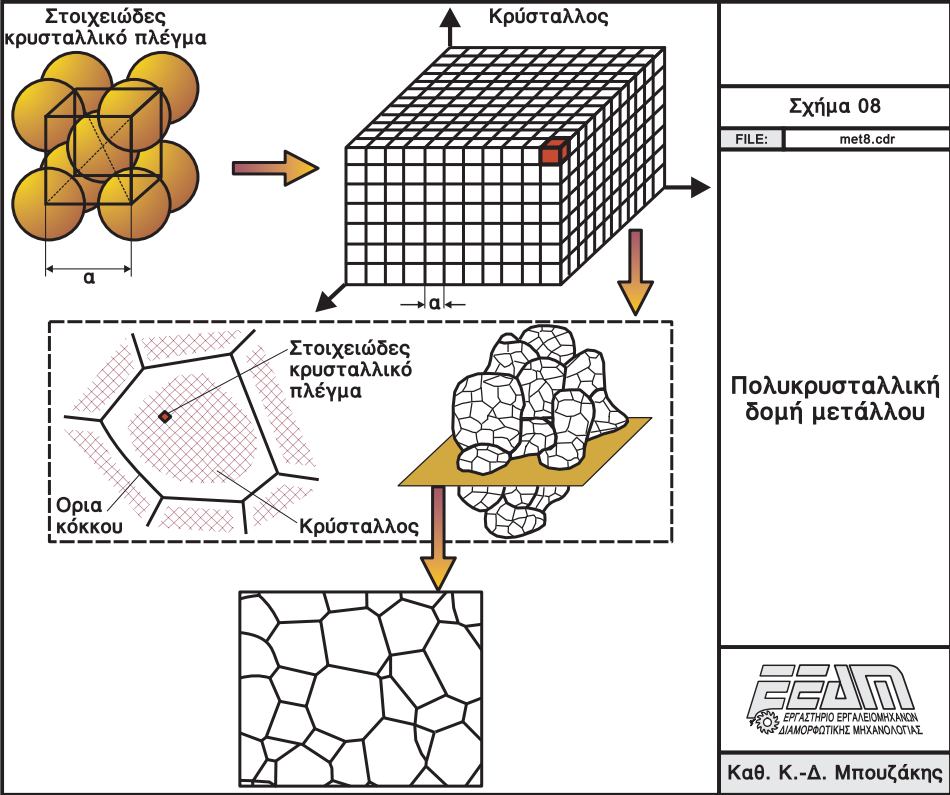
(\*) Σπάνιες γαίες 58 έως 71:  
**58**Ce, **59**Pr, **60**Nd, **61**-, **62**Sm, **63**Su, **64**Gd, **65**Tb, **66**Dy, **67**Ho,  
**68**Er, **69**Tm, **70**Yb, **71**Cp

	Μάζα	Ατομικό βάρος	Φορτίο
Πρωτόνιο p <sub>i</sub>	M <sub>1</sub>	1,00757	+e
Νετρόνιο n <sub>0</sub>	M <sub>2</sub>	1,0089	0
Ποσιτρόνιο e <sup>+</sup>	m	0,000547	+e
Ηλεκτρόνιο e <sup>-</sup>	m	0,000548	-e
Νετρίνιο	0	-	0








$m = 0,910 \cdot 10^{-27} \text{ [g+]}$   
 $M_1 \sim M_2 \sim 1,6715 \cdot 10^{-24} \text{ [g+]}$   
 $e = 4,80 \cdot 10^{-10} =$   
 $1,591 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$





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  Χωρο- κεντρωμένο κυβικό α-Fe, W, Mo β - κρατέ- ρωμα		4	3	12	Εξαγωνικό Cd, Zn, Mg Ti, Be		1	3	3
		6	2	12			3	1	3
		12	1	12			6	1	6
		24	1	24					

 Επίπεδο ολίσθησης    
 Διεύθυνση ολίσθησης

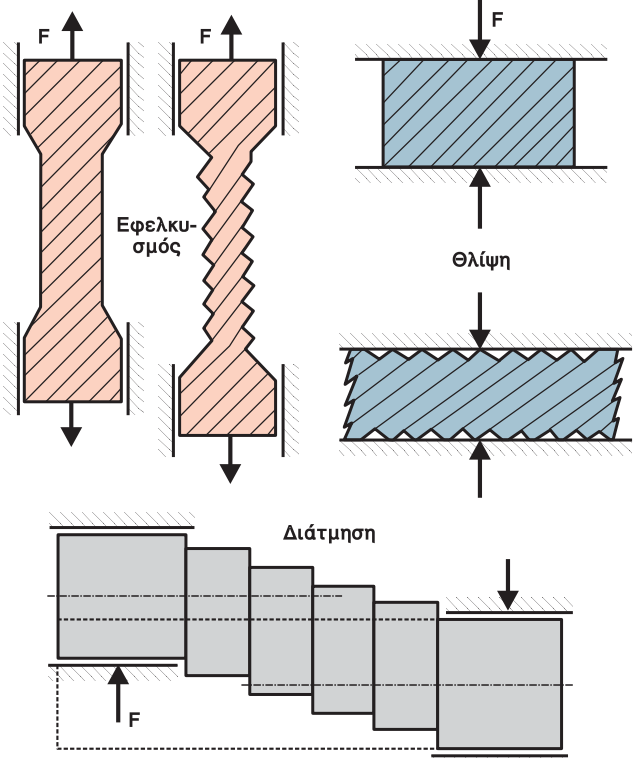
Σχήμα 09

FILE: met9.cdr

Παραδείγματα συστημάτων ολίσθησης  
διαφόρων μετάλλων




Καθ. Κ.-Δ. Μπουζάκης



**Σχήμα 10**

FILE: met10.cdr

Πλαστική  
παραμόρφωση  
(σχηματικά)  
κρυσταλλικού  
πλέγματος  
μονοκρυσταλλικού  
υλικού σε διάφο-  
ρες περιπτώσεις  
καταπονήσεων



Καθ. Κ.-Δ. Μπουζάκης

- Θεωρητικά μέγιστη εφελκυστική τάση (= αντοχή σε εφελκυσμό)

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

- 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

$\bar{\gamma}$  = ανηγμένη ενέργεια διάτμησης

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Για σίδηρο E = 200.000 N/mm<sup>2</sup>

G = 83.000 N/mm<sup>2</sup>

$\gamma = 2 \cdot 10^{-6}$  Nm/mm<sup>2</sup>

a  $\approx$  3 · 10<sup>-10</sup> m

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{\text{θεωρ, max}} \approx 40.000 \text{ N/mm}^2 \\ \tau_{\text{θεωρ, max}} \approx 2.760 \text{ N/mm}^2 \end{array} \right\} \text{για ιδανικό μονοκρυσταλλικό (ινώδες) υλικό (whiskers)}$$

$\sigma_{\text{max}}$  όχι τέλειου πλέγματος μονοκρυσταλλικού υλικού  $\sigma_{\text{θεωρ, max}} / 1000$

$\tau_{\text{max}}$  όχι τέλειου πλέγματος μονοκρυσταλλικού υλικού  $\tau_{\text{θεωρ, max}} / 150$

$\sigma_{\text{max}}$  πολυκρυσταλλικού υλικού  $\approx \sigma_{\text{θεωρ, max}} / 100$

$\tau_{\text{max}}$  πολυκρυσταλλικού υλικού  $\approx \tau_{\text{θεωρ, max}} / 15$

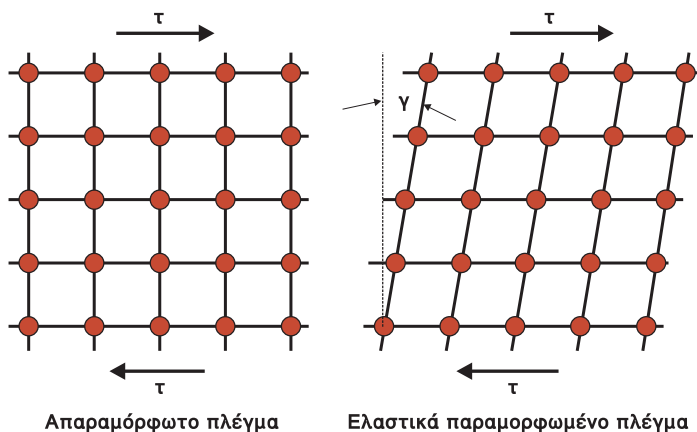
Σχήμα 11

FILE: met11.cdr

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



Καθ. Κ.-Δ. Μπουζάκης



Απαρμόρφωτο πλέγμα

Ελαστικά παραμορφωμένο πλέγμα

$\tau$  : διατμητική τάση

G : μέτρο διάτμησης

$$\tau = G \cdot \gamma$$

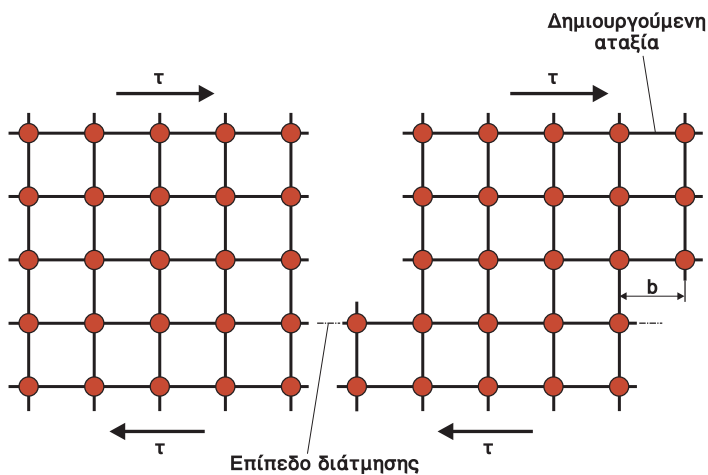
Σχήμα 12

FILE: met12.cdr

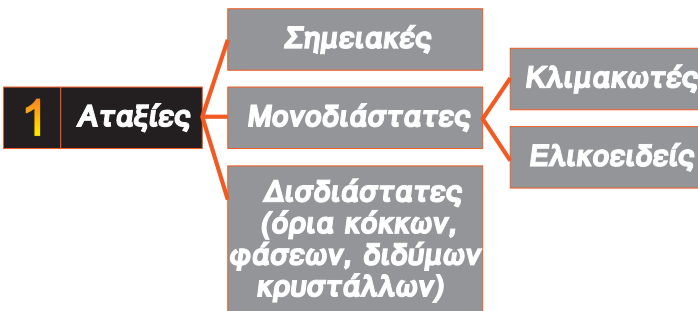
Ελαστική παραμόρφωση κρυσταλλικού πλέγματος



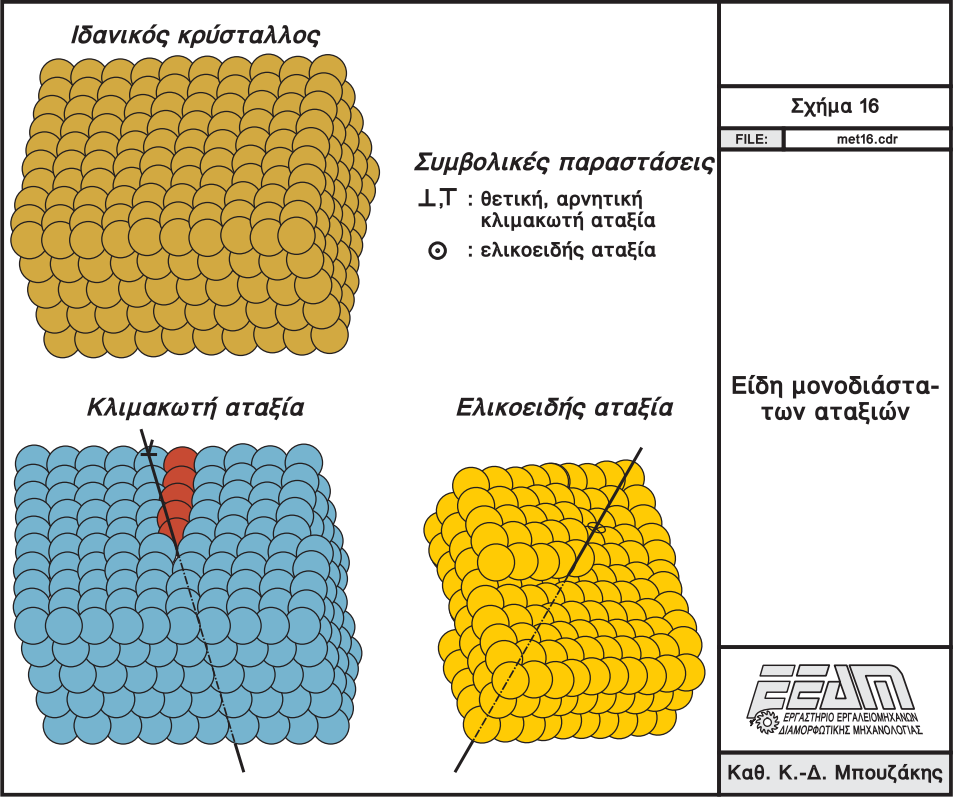
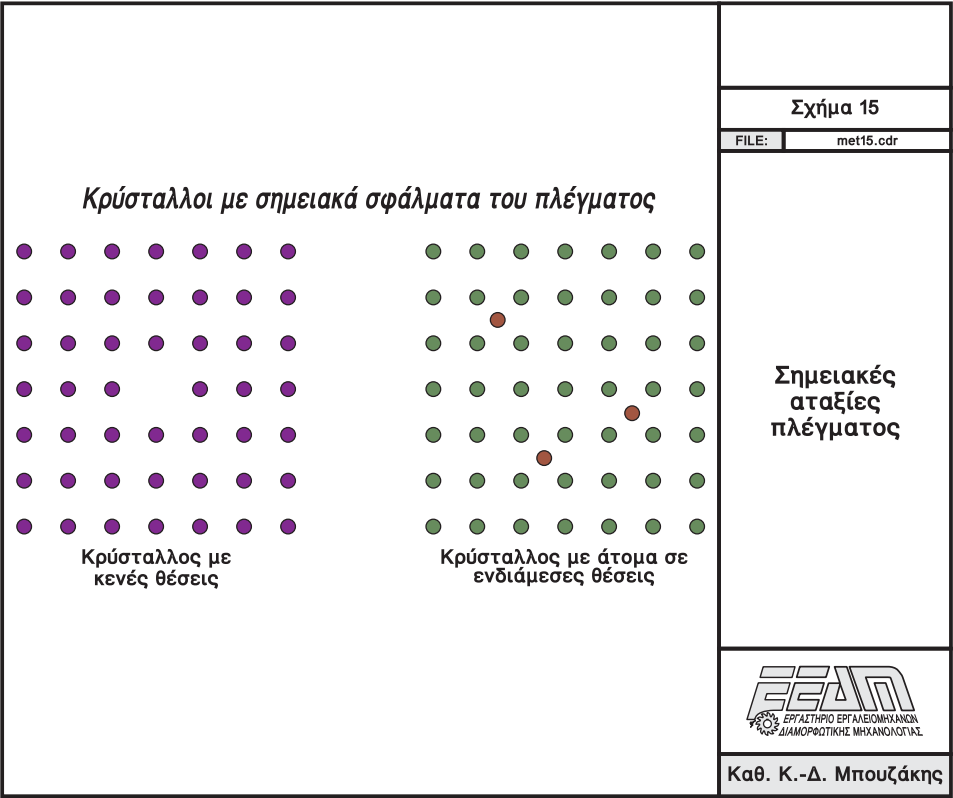
Καθ. Κ.-Δ. Μπουζάκης

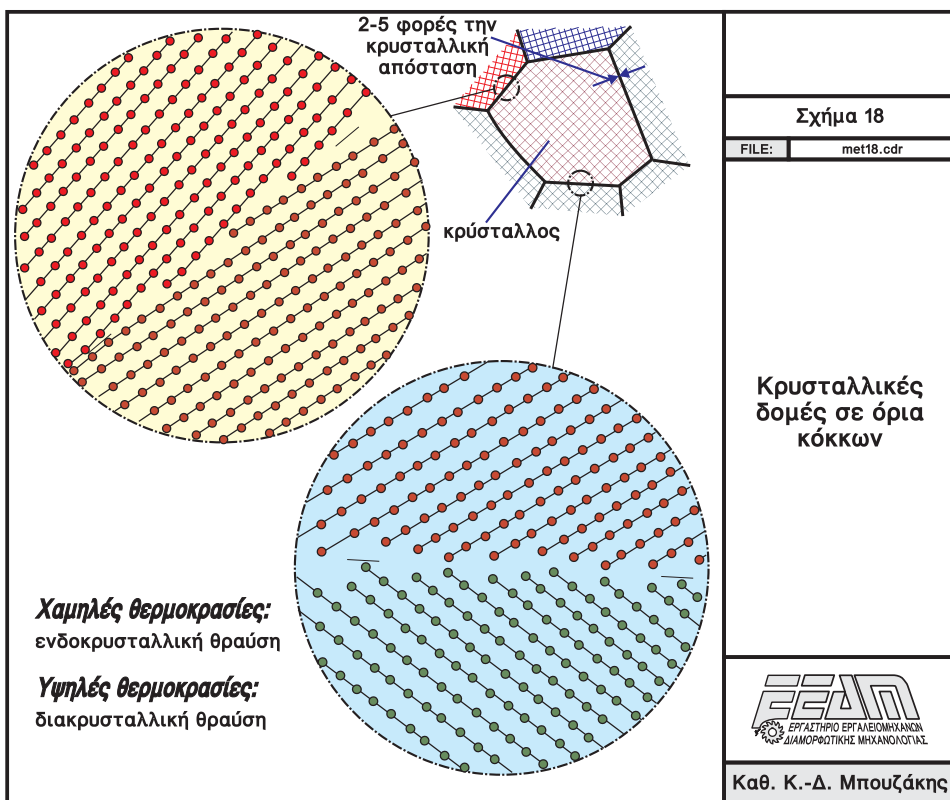
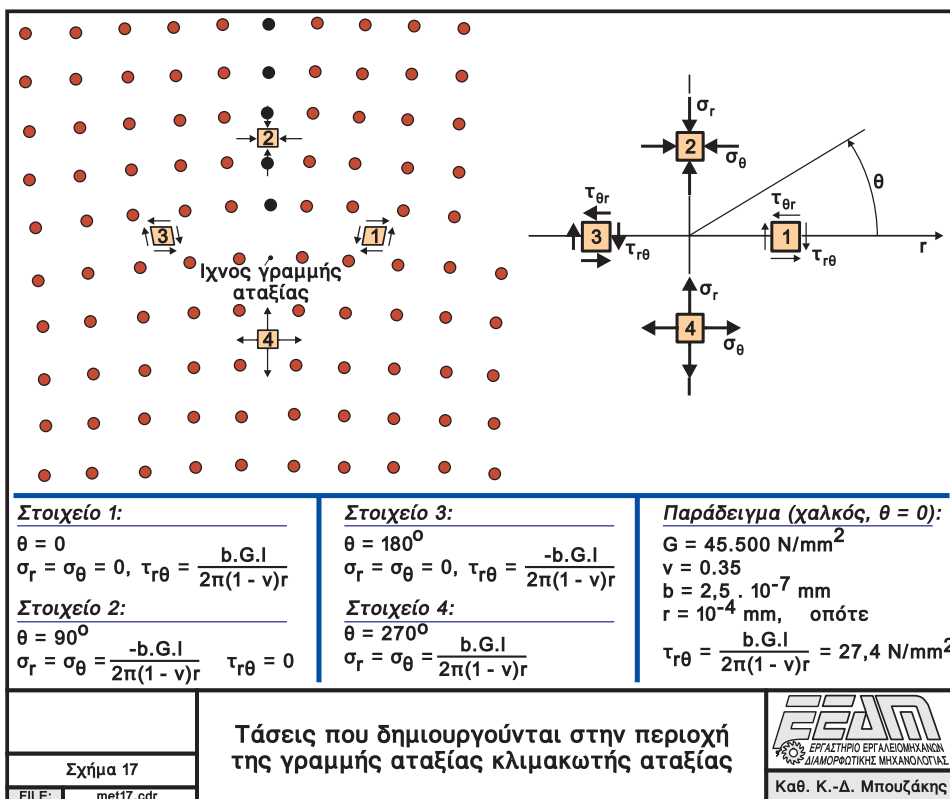


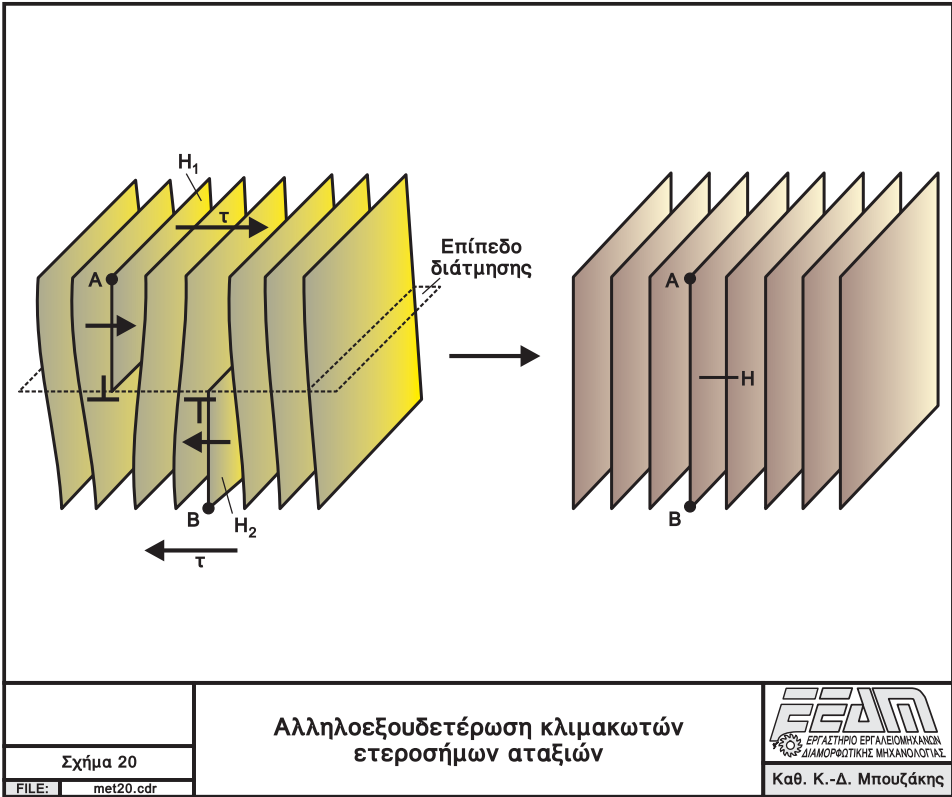
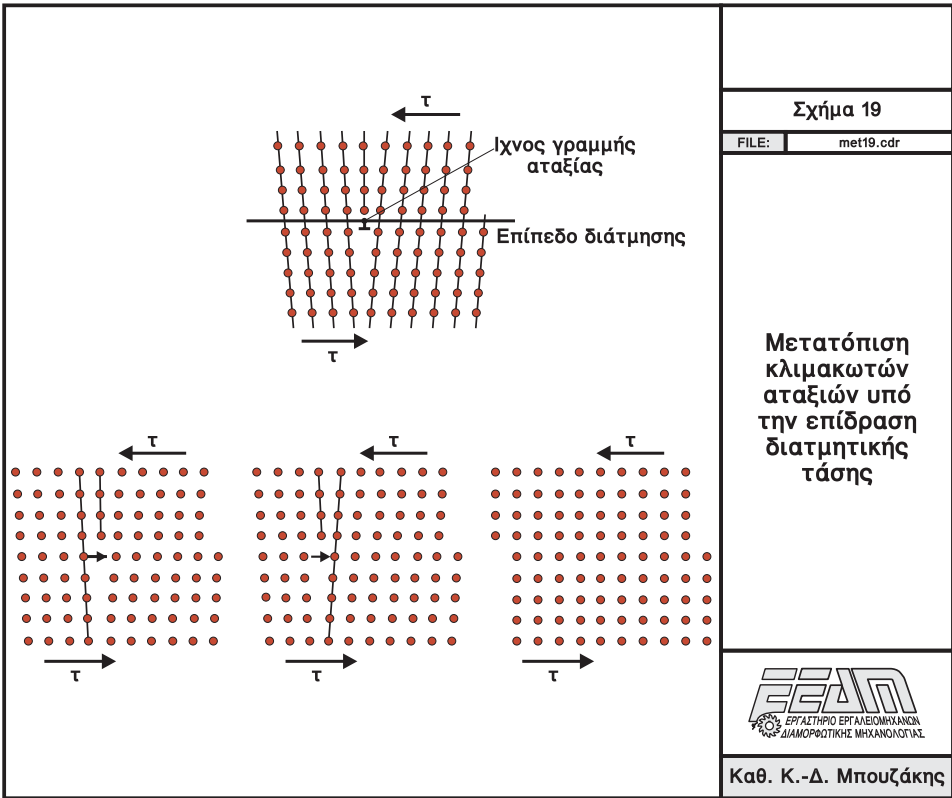
$b$  : μετατόπιση κρυσταλλικού πλέγματος  
 $b = n \cdot a$   
 όπου :  $n = 1, 2, \dots, k$   
 $a$  : πλευρά κρυσταλλικού πλέγματος

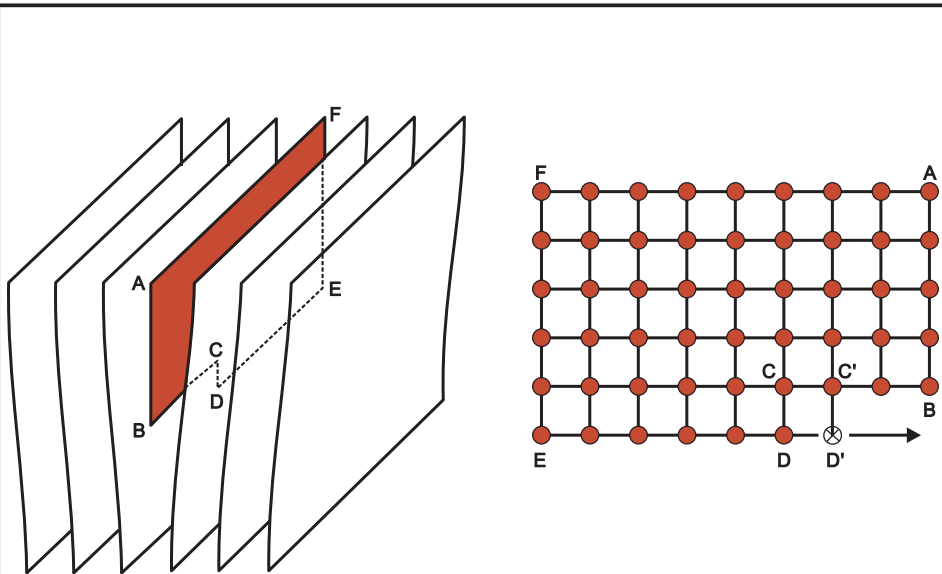


## 2 Στερεά διαλύματα







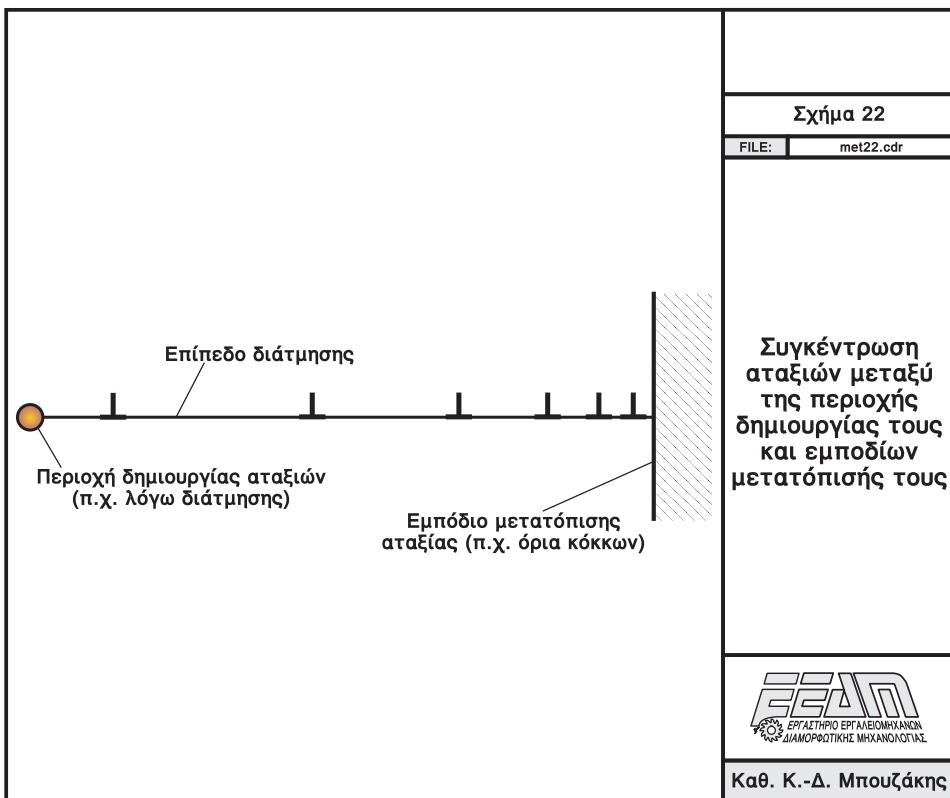


BC : γραμμή αταξίας  
DE : γραμμή αταξίας

Σχήμα 21  
FILE: met21.cdr

Μετατόπιση κλιμακωτής αταξίας με  
ασυνέχεια στην γραμμή αταξίας μέσω  
διάχυσης ατόμων

**ΕΕΔΜ**  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΡΓΑΛΕΙΩΜΑΧΑΝΩΝ  
ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ  
Καθ. Κ.-Δ. Μπουζάκης

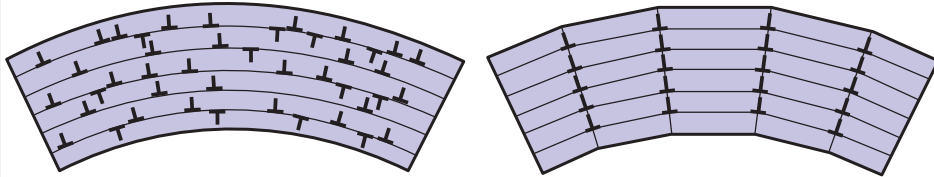


Σχήμα 22  
FILE: met22.cdr

Συγκέντρωση  
αταξιών μεταξύ  
της περιοχής  
δημιουργίας τους  
και εμποδίων  
μετατόπισής τους

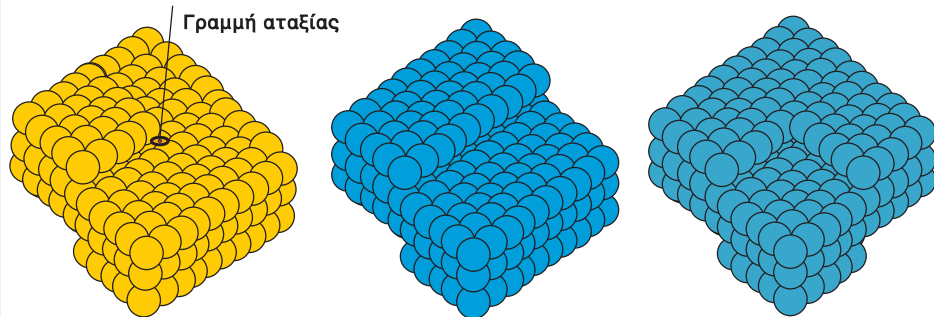
**ΕΕΔΜ**  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΡΓΑΛΕΙΩΜΑΧΑΝΩΝ  
ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

Καθ. Κ.-Δ. Μπουζάκης



Σχήμα 23  
FILE: met23.cdr

Δημιουργία αταξιών σε κεκαμένο  
μονοκρυσταλλικό υλικό και πολυγωνική  
διάταξή τους



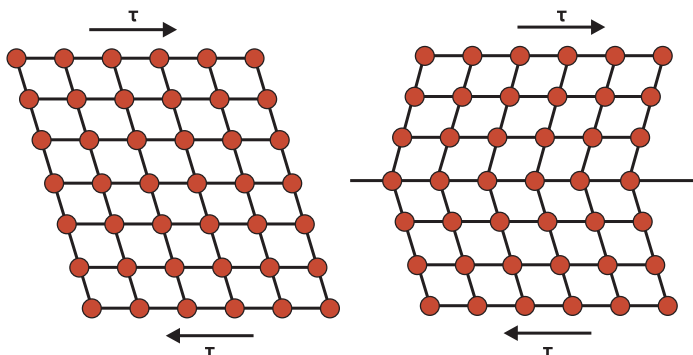
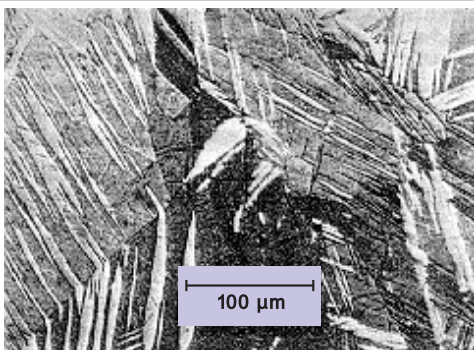
Μετατόπιση κάθετη  
στην γραμμή αταξίας

Μετατόπιση παράλληλη  
στην γραμμή αταξίας

Σχήμα 24  
FILE: met24.cdr

Τρόποι μετατόπισης ελικοειδών αταξιών





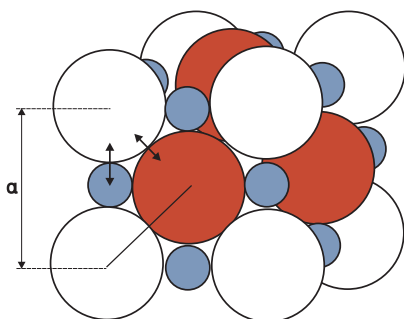
Σχήμα 25

FILE: met25.cdr

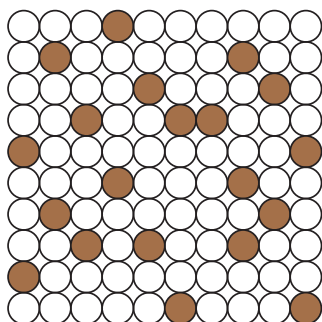
Δημιουργία  
διδύμων  
κρυσταλλικών  
δομών



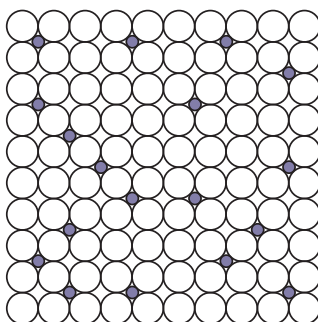
Καθ. Κ.-Δ. Μπουζάκης



Μικτοί κρύσταλλοι



Κρύσταλλος με υποκατάσταση  
ατόμων



Κρύσταλλος με άτομα σε ενδιά-  
μεσες θέσεις του πλέγματος

Σχήμα 26

FILE: met26.cdr

Στερεά διαλύματα  
υποκατάστασης  
και ένθεσης σε  
ενδιάμεσες θέσεις



Καθ. Κ.-Δ. Μπουζάκης

