

3. Μηχανισμοί Παραμόρφωσης

3.1 Εισαγωγή

Η παραμόρφωση των πετρωμάτων καθορίζεται από πολλές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε επίπεδο ορυκτού δηλαδή σε επίπεδο κρυστάλλων και κόκκων. Οι διαδικασίες αυτές εξαρτώνται τόσο από λιθολογικούς παράγοντες, όσο και από εξωτερικούς, από τις επικρατούσες δηλαδή συνθήκες.

Οι λιθολογικοί παράγοντες είναι οι ακόλουθοι:

- i) Η ορυκτολογική σύσταση.
- ii) Η σύσταση των ρευστών των πόρων.
- iii) Το μέγεθος των κόκκων.
- iv) Ο προτιμητέος προσανατολισμός σε επίπεδο πλέγματος.
- v) Το πορώδες.
- vi) Η περατότητα.

Οι εξωτερικοί παράγοντες είναι:

- i) Η θερμοκρασία.
- ii) Η λιθοστατική πίεση.
- iii) Οι προκύπτουσες διαφορικές τάσεις.
- iv) Η πίεση των ρευστών των πόρων.
- v) Ο εξωτερικά ασκούμενος ρυθμός καταπόνησης.

Στη συνέχεια θα περιγραφούν οι κυριότεροι μηχανισμοί παραμόρφωσης, αρχίζοντας από εκείνους που χαρακτηρίζουν συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών και υψηλού ρυθμού καταπόνησης και μεταβαίνοντας στους μηχανισμούς σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και χαμηλού ρυθμού καταπόνησης.

Οι μηχανισμοί αυτοί είναι οι ακόλουθοι:

- 1) Κατακλαστική ροή (Cataclastic flow)
- 2) Διάλυση υπό πίεση (Pressure solution)
- 3) Ενδοκρυσταλλική παραμόρφωση (Intracrystalline deformation)
- 4) Ανάπτυξη διδυμίων (Twinning)
- 5) Ανάκτηση ή Ανάπλαση (Recovery)

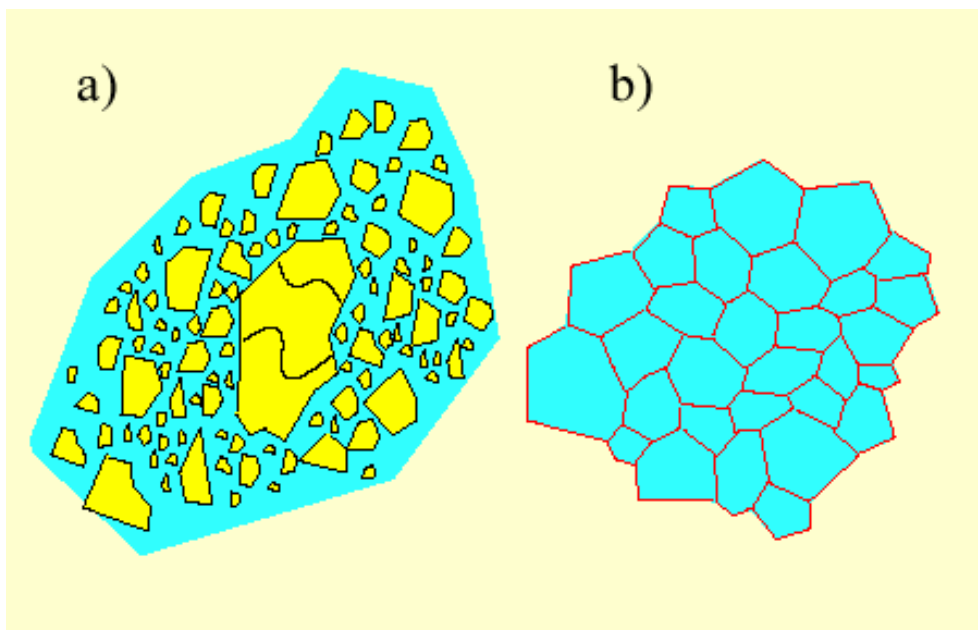
- 6) Ανακρυστάλλωση (Recrystallisation)
- 7) Διάχυση σε στερεά κατάσταση από ολισθήσεις σε επίπεδο πλέγματος (Solid-state diffusion creep)
- 8) Ολίσθηση ορίων κρυστάλλων και "Υπερπλαστικότητα" (Grain boundary sliding and Superplasticity)
- 9) Μείωση ορίων κρυστάλλων (Grain boundary area reduction – GBAR)
- 10) Στατική ανακρυστάλλωση (Static recrystallisation)

Για την μελέτη και κατανόηση των μηχανισμών παραμόρφωσης θα γίνει χρήση των μικροδομών σε επίπεδο ορυκτών και κόκκων (grain scale microstructures), που είναι γνωστές με το όνομα ενδοκρυσταλλικές δομές παραμόρφωσης (*intracrystalline deformation structures*).

3.2 Μηχανισμοί παραμόρφωσης

3.2.1 ΚΑΤΑΚΛΑΣΤΙΚΗ ΡΟΗ (CATACLASTIC FLOW)

Συνιστά μια θραυσιγενή διαδικασία από μηχανικό θρυμματισμό των πετρωμάτων που συνοδεύεται από ολισθήσεις και περιστροφές των θραυσμάτων. Ο θρυμματισμός λαμβάνει χώρα σε επίπεδο ορυκτών και κόκκων ή σε αθροίσματα κόκκων. Σχετίζεται άμεσα με τα πετρώματα (τεκτονικά λατυποπαγή, κατακλασίτες κλπ.) που αναπτύσσονται σε *θραυσιγενείς ρηξιγενείς ζώνες (brittle type fault related rocks)*. Χαρακτηρίζει συνθήκες μη-μεταμόρφωσης ή χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης και υψηλού ρυθμού παραμόρφωσης. Παράγοντες που καθορίζουν το μηχανισμό αυτό είναι η ορυκτολογική σύσταση και η πίεση των ρευστών των πόρων. Π.χ. η υψηλή πίεση οδηγεί σε κατακλαστική ροή αλλά και σε δημιουργία φλεβιδίων που εντοπίζονται στα ειδικού τύπου αυτά πετρώματα.



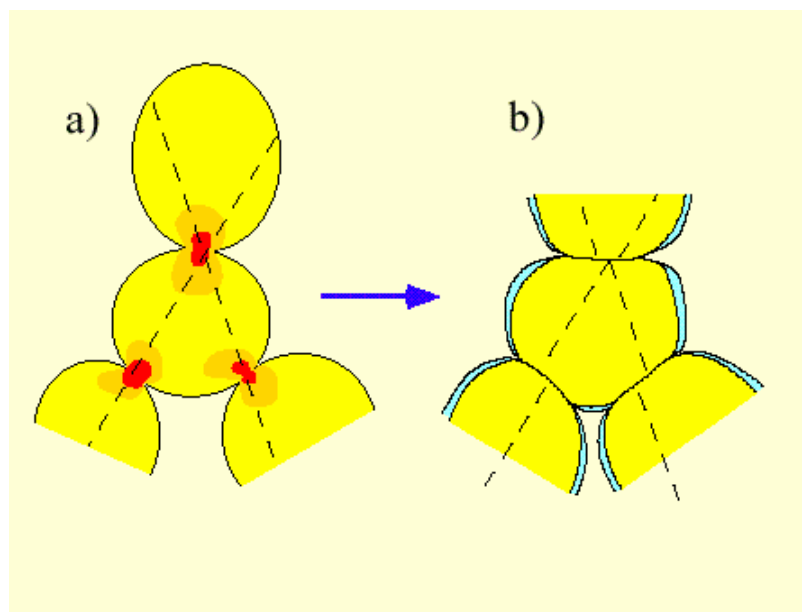
Εικ. 3.1. Τυπικές εικόνες κατακλαστικής ροής (a) και δυναμικής ανακρυστάλλωσης (b).

Πολύ συχνά οι τεκτονικές ζώνες που χαρακτηρίζονται από κατακλαστική ροή συγγέονται με ζώνες διάτμησης που αποτελούνται από δυναμικά ανακρυσταλλωμένα ορυκτά (Εικ. 3.1). Οι διαφορές τους από αυτές εντοπίζονται στα ακόλουθα:

- Παρουσιάζουν μεγαλύτερες διακυμάνσεις στο μέγεθος των κόκκων.
- Χαρακτηρίζονται από κόκκους με γωνιώδες περίγραμμα και ευθύγραμμα και οξυλήκτα όρια.
- Αποτελούνται από πολυκρυσταλλικά θραύσματα (εξαίρεση αποτελούν παραμορφωμένοι ψαμμίτες, κροκαλοπαγή κλπ.).
- Δεν εμφανίζουν προτιμητέο προσανατολισμό.

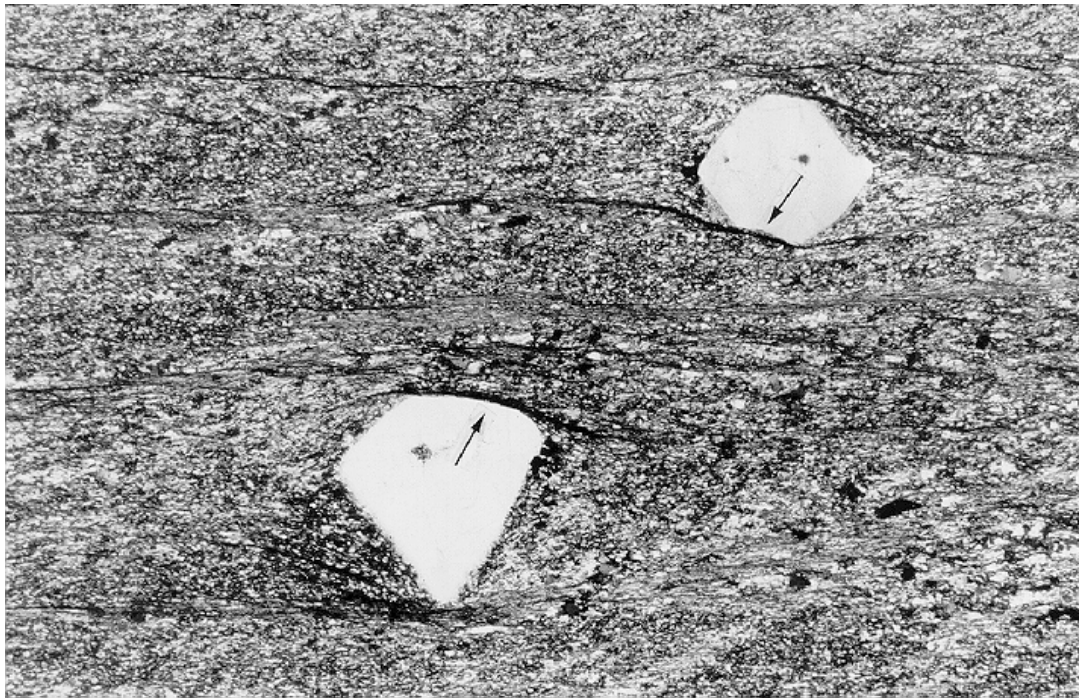
3.2.2 ΔΙΑΛΥΣΗ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ (PRESSURE SOLUTION)

Αποτελεί σημαντικό μηχανισμό σε πετρώματα με *ρευστά των πόρων* (*pore fluid* ή *intergranular fluid*). Παρατηρείται μια τοπική διάλυση των κόκκων στα όρια που βρίσκονται κάτω από υψηλές διαφορικές τάσεις και σχηματίζουν μεγάλη γωνία με τη διεύθυνση της *βράχυνσης* (*shortening*). Ταυτόχρονα γίνεται επανατοποθέτηση του υλικού στις περιοχές με χαμηλές διαφορικές τάσεις. Πραγματοποιείται έτσι μια αλλαγή του σχήματος των κόκκων χωρίς εσωτερική παραμόρφωση. Στην ουσία παρατηρείται μια αύξηση της διαλυτότητας όταν το κρυσταλλικό πλέγμα βρίσκεται υπό πίεση. Η διαδικασία της μεταφοράς από περιοχές υψηλής διαλυτότητας σε χαμηλής καλείται *solution transfer*.

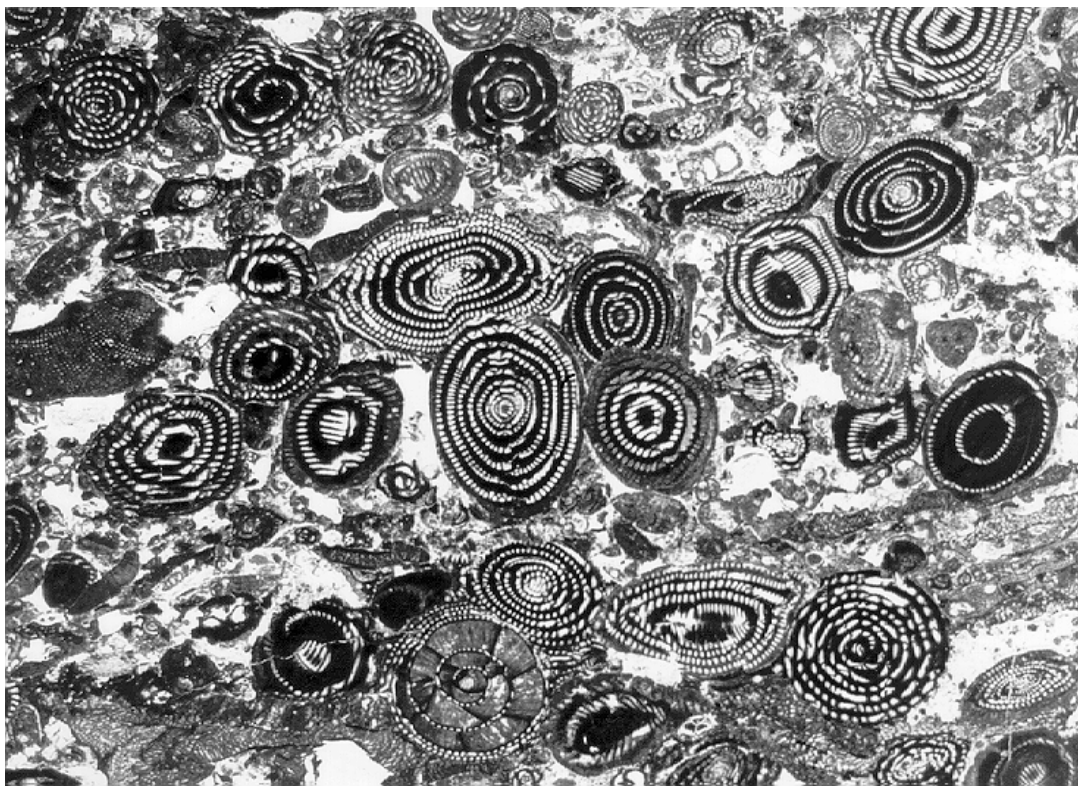


Εικ. 3.2. Ο μηχανισμός της διάλυσης υπό πίεση με τοπική διάλυση των κόκκων στα όρια που βρίσκονται κάτω από υψηλές διαφορικές τάσεις και επανατοποθέτηση του υλικού στις περιοχές με χαμηλές.

Αποτελεί κυρίαρχο μηχανισμό στη διαγένεση και σε πετρώματα χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης, όπου υπάρχουν άφθονα ρευστά.



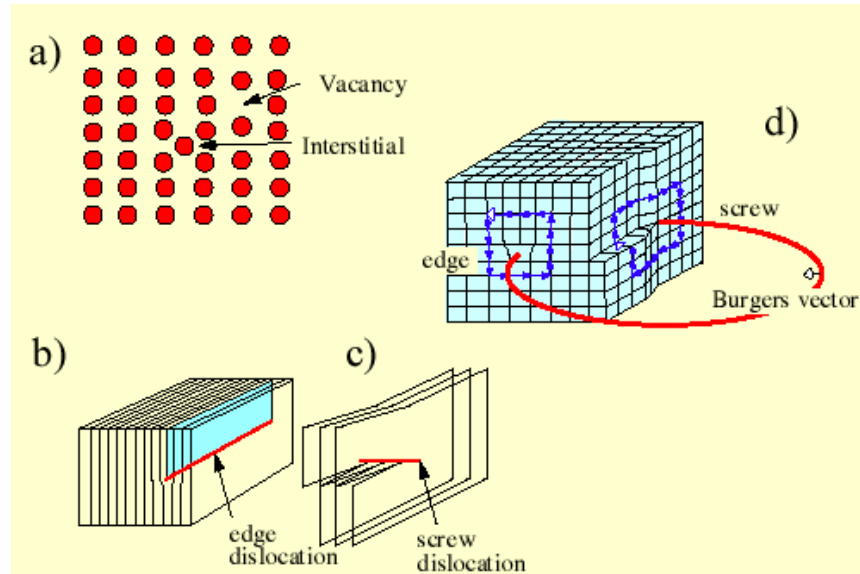
Εικ. 3.3 Διάλυση υπό πίεση σε ιδιόμορφους κρυστάλλους χαλαζία.



Εικ. 3.4 Νουμουλιτοφόρος ασβεστόλιθος με ενδείξεις solution transfer κατά τη διάρκεια της διαγένεσης.

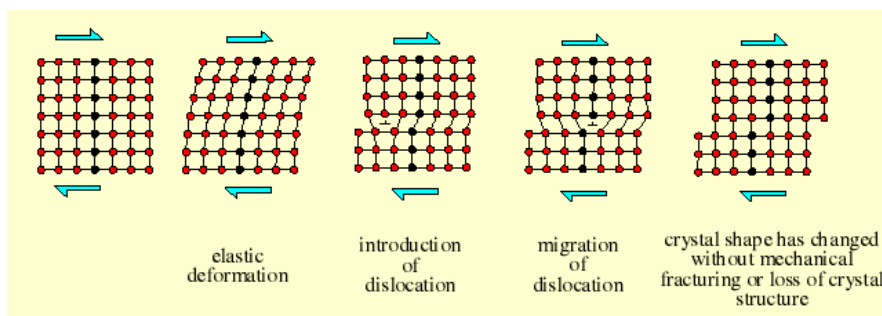
3.2.3 ΕΝΔΟΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (INTRACRYSTALLINE DEFORMATION)

Οι κρύσταλλοι συνήθως εμφανίζουν ατέλειες στο κρυσταλλικό τους πλέγμα, είτε σημειακές, είτε γραμμικές, αφορώντας είτε έλλειψη, κενό (vacancy), είτε προσθήκη, παρεμβολή (interstitial) κάποιων στοιχείων του πλέγματος, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται εκτοπίσεις (dislocations) των στοιχείων του πλέγματος, είτε λόγω παρεμβολής (edge dislocations) είτε λόγω μετάθεσης (screw dislocations).



Εικ. 3.5. Ατέλειες σε επίπεδο κρυσταλλικού πλέγματος, εκτοπίσεις (dislocations) και ενδοκρυσταλλική παραμόρφωση.

Το σχήμα του κρυστάλλου και άρα η απόσταση ανάμεσα στα στοιχεία που απαρτίζουν το πλέγμα, μπορεί να μεταβληθεί μόνο σε ένα πολύ μικρό βαθμό, σε συνθήκες ελαστικής παραμόρφωσης, και μόλις το αίτιο (τάση) σταματήσει να επιδρά, το αρχικό σχήμα αποκαθίσταται. Μια μόνιμη αλλαγή στο σχήμα του κρυστάλλου, χωρίς όμως να υπάρξει μηχανική θραύση ή απώλεια της συνοχής του κρυσταλλικού πλέγματος, μπορεί να δημιουργηθεί μόνο όταν υπάρξει μεταβολή στη σχετική θέση των μορίων και των ατόμων (εκτόπιση). Αυτό μπορεί να συμβεί μόνο με τη μετακίνηση των ατελειών του πλέγματος μέσα στον κρύσταλλο, δηλαδή με τη δημιουργία και τη μετανάστευση μιας εκτόπισης μέσα στον κρύσταλλο, διαδικασία που είναι γνωστή με το όνομα ενδοκρυσταλλική παραμόρφωση (intragrystalline deformation).



Εικ. 3.6. Παραμόρφωση κρυστάλλου με τη δημιουργία και μετανάστευση μιας εκτόπισης (dislocation).

Οι εκτοπίσεις αυτές παρουσιάζουν συγκεκριμένο προσανατολισμό μέσα στο πλέγμα και η ολίσθησή τους (*dislocation glide*) γίνεται μόνο σε συγκεκριμένα κρυσταλλογραφικά επίπεδα και διευθύνσεις, γνωστά σαν *συστήματα ολίσθησης πλέγματος* (*slip systems*).

Μπορεί να είναι ενεργά slip systems με διαφορετικές διευθύνσεις και αυτό εξαρτάται από τις συνθήκες μεταμόρφωσης και παραμόρφωσης και πιο συγκεκριμένα από: α) τον προσανατολισμό και την ένταση του εντατικού πεδίου σε επίπεδο κρυστάλλου και β) την κρίσιμη τιμή της διατμητικής τάσης, που με τη σειρά της εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία και σε μικρότερο βαθμό από το ρυθμό καταπόνησης (*strain rate*), τις διαφορικές τάσεις και τη χημική δράση των συστατικών.

Ένα σημαντικό αποτέλεσμα της ενδοκρυσταλλικής παραμόρφωσης αποτελεί και η δημιουργία του *προτιμητέου προσανατολισμού σε επίπεδο πλέγματος* (*lattice preferred orientation – LPO*), δεδομένου ότι οι εκτοπίσεις μετακινούνται μόνο σε συγκεκριμένα επίπεδα, με αποτέλεσμα η επακόλουθη μεταβολή του σχήματος των κόκκων να έχει συγκεκριμένο προσανατολισμό.

Σε ότι αφορά τις ενδείξεις για ενδοκρυσταλλική παραμόρφωση σημειώνεται ότι μεμονωμένες εκτοπίσεις δεν μπορούν να προσδιορισθούν στο μικροσκόπιο. Προσδιορίζονται όμως τα αποτελέσματα ενός αριθμού ομοειδών εκτοπίσεων, που δημιουργούν δομές όπως:

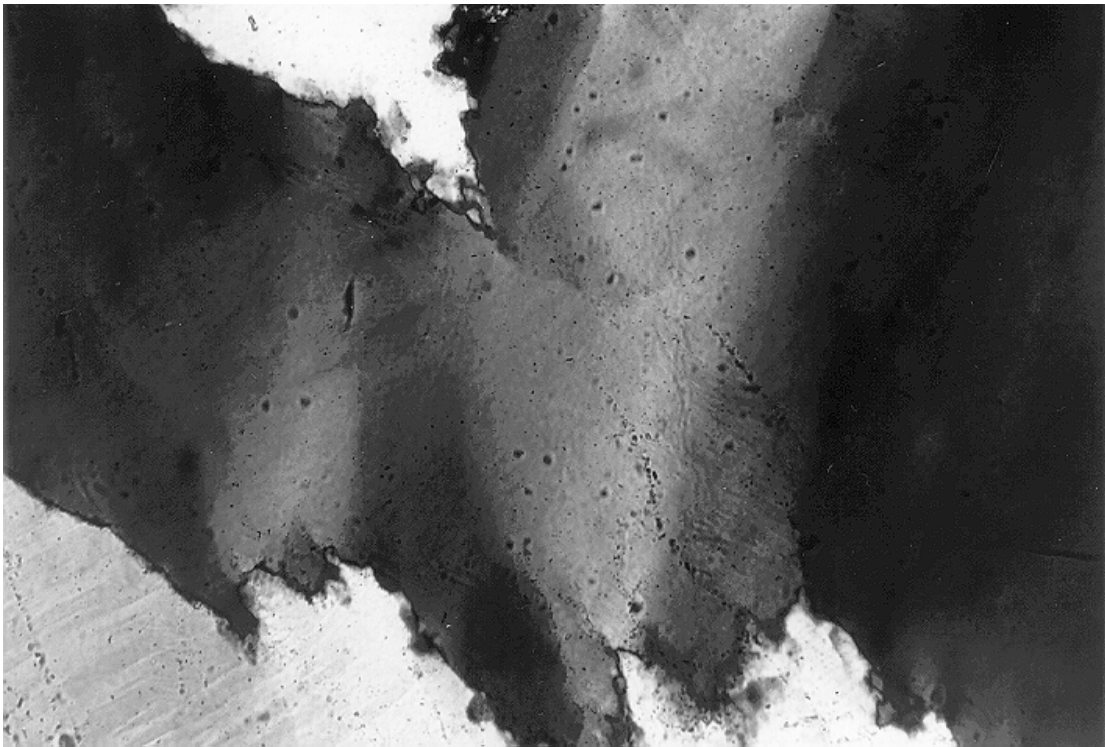
- Κυματοειδής κατάσβεση (*Undulose extinction*)
- Microkinks (Qtz, Flp)
- Ελασματοειδής παραμόρφωση (*Deformation lamellae*)
- Προτιμητέος προσανατολισμός σε επίπεδο πλέγματος (*Lattice-preferred orientation*)

Ο μηχανισμός αυτός λαμβάνει χώρα σε συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών, δεδομένου ότι με την άνοδο της θερμοκρασίας επικρατούν οι μηχανισμοί της ανακρυστάλλωσης και ανάκτησης (βλπ. στα επόμενα).

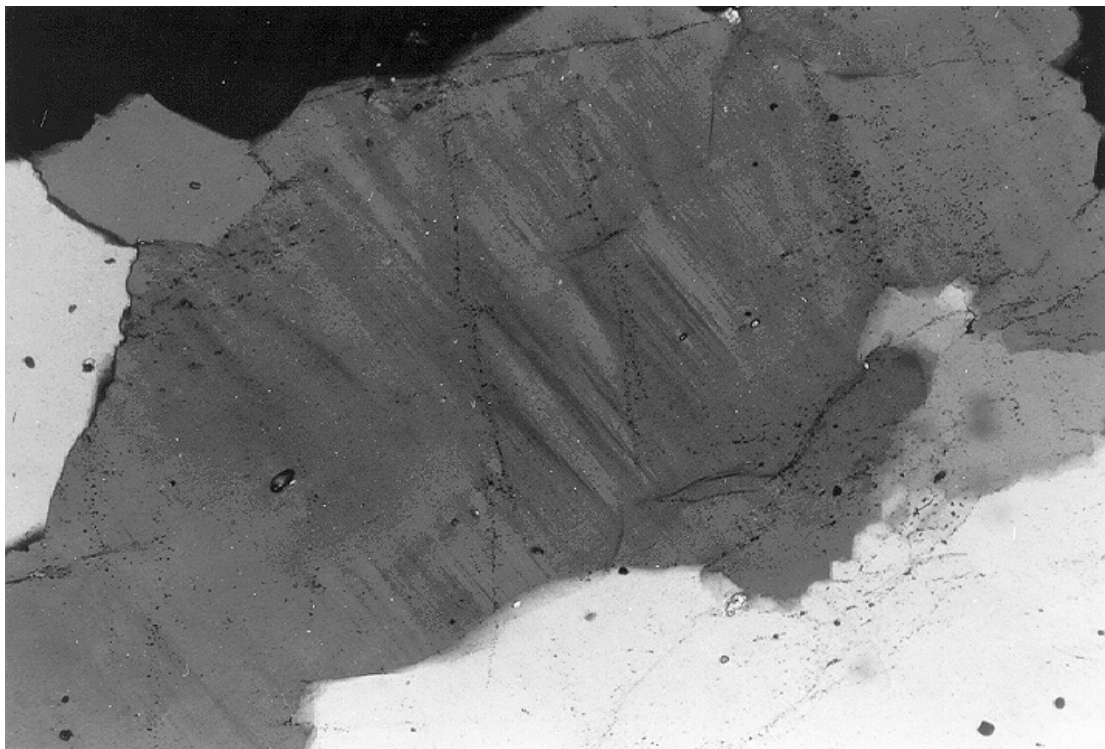
3.2.4 ΔΙΔΥΜΙΑ (TWINNING)

Ορισμένα ορυκτά αντιδρούν στην παραμόρφωση με την ανάπτυξη *διδυμιών* (*deformation twinning*, ή *μηχανικές διδυμίες – mechanical twinning*), επιπρόσθετα από τους μηχανισμούς της ενδοκρυσταλλικής παραμόρφωσης. Οι διδυμίες μπορούν να απορροφήσουν ένα περιορισμένο ποσοστό της καταπόνησης και πάντα δημιουργούνται σε συγκεκριμένες κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις.

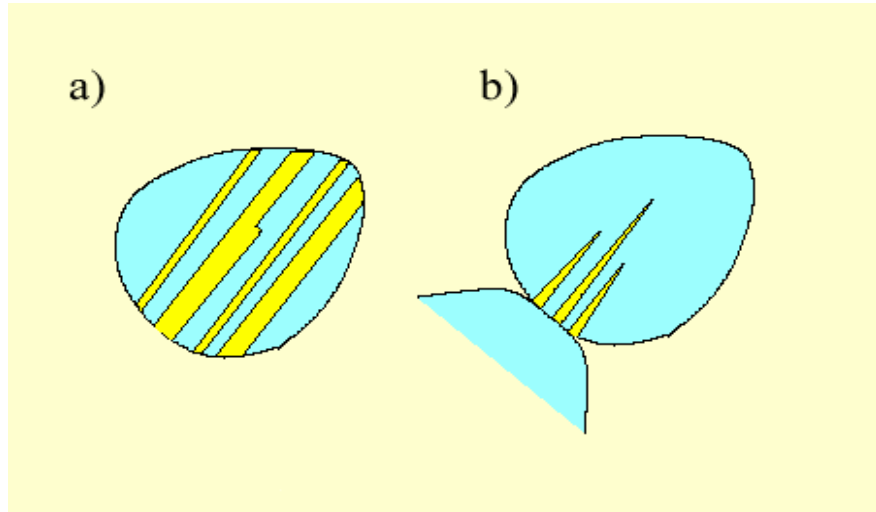
Για την απορρόφηση μεγαλύτερου ποσοστού καταπόνησης χρειάζονται επιπρόσθετα μηχανισμοί όπως διάλυση υπό πίεση, ενδοκρυσταλλική παραμόρφωση, ανακρυστάλλωση κλπ. Ο μηχανισμός αυτός λοιπόν παρατηρείται σε συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών κατά την παραμόρφωση και κυρίως σε πλαγιόκλαστα και ασβεστίτη, αν και έχει αναφερθεί και σε άλλα ορυκτά, όπως ο μικροκλινής.



Εικ. 3.7. Κοματοειδής κατάσβεση σε κρυστάλλους χαλαζία.



Εικ. 3.8. Ελασματοειδής παραμόρφωση σε κρυστάλλους χαλαζία.



Εικ. 3.9. Διδυμίες ανάπτυξης (a) και διδυμίες από παραμόρφωση (μηχανικές διδυμίες) (b).

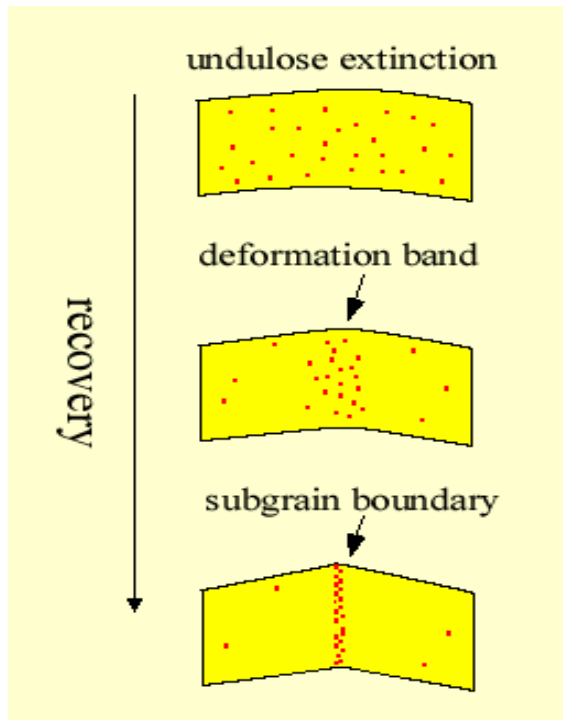
Οι διδυμίες από παραμόρφωση (deformation twins) διακρίνονται από τις διδυμίες ανάπτυξης (growth twins) από το κωνικό σχήμα σε αντίθεση με τις δεύτερες που είναι ευθύγραμμες και σε κλιμακωτή διάταξη. Εντοπίζονται σε συγκεκριμένες περιοχές του κρυστάλλου, που συνήθως χαρακτηρίζονται από υψηλή καταπόνηση (π.χ. σημεία επαφής). Στα πλαγιόκλαστα παρατηρούνται και διδυμίες ανάπτυξης και διδυμίες παραμόρφωσης. Αντίθετα στον ασβεστίτη οι περισσότερες διδυμίες είναι από παραμόρφωση.

3.2.5 ΑΝΑΚΤΗΣΗ (RECOVERY)

Η εσωτερική ενέργεια ενός κρυστάλλου (*internal strain energy*) είναι ελάχιστη όταν δεν υπάρχουν εκτοπίσεις (dislocations). Όταν ο κρύσταλλος καταπονείται αντιδρά με αύξηση των εκτοπίσεων και της εσωτερικής ενέργειας, με τοπικές αλλαγές στην απόσταση των ατόμων. Με άλλα λόγια δηλαδή οι εκτοπίσεις είναι η αντίδραση στην ανάπτυξη διαφορικών τάσεων. Υπάρχουν όμως και άλλοι μηχανισμοί, γνωστοί με το όνομα *ανάκτηση* (*recovery*), που τείνουν να ταξινομήσουν, να ελαχιστοποιήσουν, ή να καταστρέψουν τις εκτοπίσεις μέσα από τη μείωση του συνολικού μήκους των εκτοπίσεων και τη μείωση της εσωτερικής ενέργειας.

Η οργάνωση των εκτοπίσεων λόγω μηχανισμών ανάκτησης γίνεται σε δίκτυα επιπέδων που καλούνται *subgrain walls* ή *subgrain boundaries* και χωρίζουν τον κρύσταλλο σε επιμέρους τμήματα (*crystal fragments* ή *subgrains*) με ελαφρά περιστροφή των επιμέρους τμημάτων και προσανατολισμό που εξαρτάται από αυτόν των επιπέδων ολίσθησης (*slip systems*) των εκτοπίσεων.

Τα subgrains (υποκόκκοι;) αποτελούν τμήματα του κρυστάλλου με μικρή αλλαγή στον προσανατολισμό του πλέγματος, όχι μεγαλύτερη από 5° . Σε πολλές περιπτώσεις τα subgrain walls πλευρικά συγχωνεύονται σε deformation bands ή high-angle grain boundaries.



Εικ. 3.10. Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού της ανάκτησης.

Λόγω του μηχανισμού της ανάκτησης οι εκτοπίσεις συγκεντρώνονται σε συγκεκριμένα επίπεδα και έτσι η συχνότητά τους μειώνεται σε άλλες περιοχές. Στις λεπτές τομές αυτό φαίνεται σαν ζώνες με μη ομοιόμορφη κατάσβεση ή με μικρή διαφορά στον προσανατολισμό. Οι ζώνες αυτές είναι γνωστές σαν deformation bands.

Η ανάκτηση δεν είναι ο μόνος μηχανισμός δημιουργίας subgrains, αλλά υπάρχουν και άλλοι συνηθείς μηχανισμοί. Subgrains με έντονα κυματοειδείς δομές, μικρή διαφορά στον προσανατολισμό, ασαφή όρια και μικρορωγμές σε επίπεδο κρυστάλλου, φανερώνουν υπο-μικροσκοπική κατάκλαση των κόκκων.



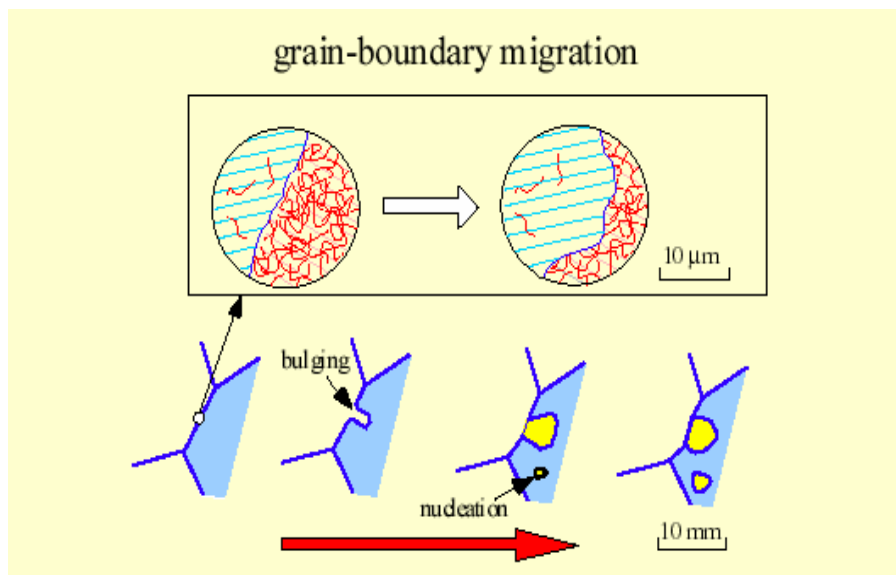
Εικ. 3.11.
Subgrains
(υποκόκκοι?)
σε χαλαζία.

3.2.6 ΑΝΑΚΡΥΣΤΑΛΛΩΣΗ (RECRYSTALLISATION)

Στο μηχανισμό αυτό αντιστοιχούν δύο διαδικασίες. Η *μετανάστευση των ορίων των κόκκων* (*grain boundary migration – GBAR recrystallisation*) και *περιστροφή επιμέρους τμημάτων των κόκκων* (*subgrain rotation – SR recrystallisation*).

1. Μετανάστευση των ορίων των κόκκων (*Grain boundary migration – GBAR recrystallisation*)

Ο μηχανισμός αυτός (όπως και η ανάκτηση – recovery) οδηγεί σε μείωση της πυκνότητας των εκτοπίσεων στους παραμορφωμένους κρυστάλλους. Σε δύο γειτονικούς κρυστάλλους με υψηλή και χαμηλή πυκνότητα εκτοπίσεων, παρατηρείται μεταφορά ατόμων από το ένα πλέγμα στο άλλο (υψηλή \rightarrow χαμηλή) και άρα μετατόπιση των ορίων των κρυστάλλων σε τοπικό επίπεδο και ανάπτυξη του λιγότερο παραμορφωμένου κρυστάλλου. Επιτυγχάνεται ταυτόχρονα μείωση της ελεύθερης εσωτερικής ενέργειας στο άθροισμα των κρυστάλλων (internal free energy).



Εικ. 3.12. Ανακρυστάλλωση με μετανάστευση των ορίων των κόκκων (*grain boundary migration – GBAR recrystallisation*).

Ανάλογα με το μηχανισμό επέκτασης των ορίων του κρυστάλλου διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

- i) *Bulging*. Επέκταση προς την μεριά του κρυστάλλου με υψηλή πυκνότητα dislocations και δημιουργία ανεξάρτητων κρυστάλλων.
- ii) *Nucleation*. Δημιουργία ανεξάρτητων κρυστάλλων από την ύπαρξη ενός μικρού πυρήνα χωρίς dislocations μέσα σε ένα κρύσταλλο με υψηλή πυκνότητα dislocations.

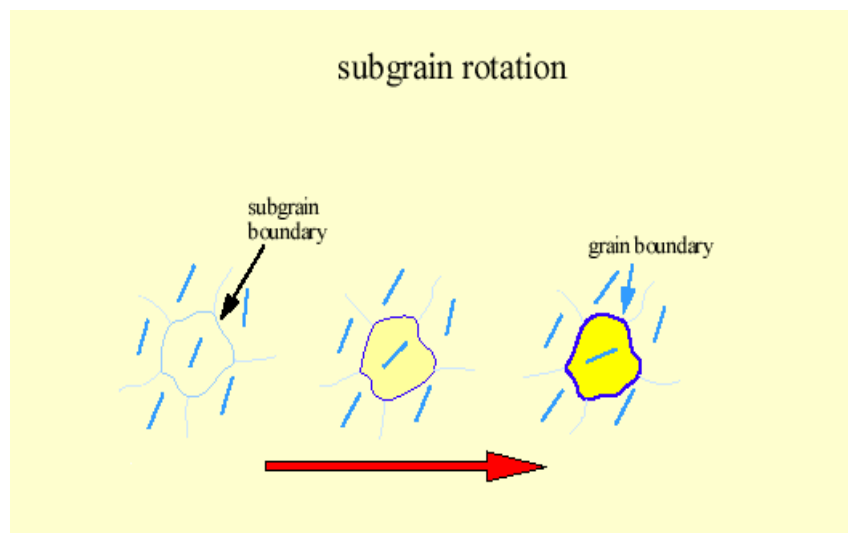
Σημειώνεται ότι ο μηχανισμός αυτός δεν απαιτεί αλλαγές στη χημική σύσταση αν και στην περίπτωση των αστρίων παρατηρούνται πολύ μικρές τέτοιες μεταβολές.

1. Περιστροφή επιμέρους τμημάτων των κόκκων (Subgrain rotation – SR recrystallisation)

Ειδικού τύπου ανακρυστάλλωση με συνεχή προσθήκη εκτοπίσεων στα όρια των επιμέρους τμημάτων των κόκκων. Η διαδικασία αυτή, γνωστή με το όνομα *climb-accommodated dislocation creep*, λαμβάνει χώρα μόνο όταν οι εκτοπίσεις είναι ελεύθερες να "αναρριχώνται» από το ένα επίπεδο του πλέγματος στο άλλο.

Ο μηχανισμός αυτός προϋποθέτει προοδευτική αύξηση της γωνίας του κρυσταλλικού πλέγματος και στις δύο πλευρές των ορίων των επιμέρους τμημάτων των κόκκων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το επιμέρους αυτό τμήμα (subgrain) να μην μπορεί πλέον να θεωρηθεί σαν τμήμα του ίδιου κόκκου. Παρατηρείται δηλαδή μια προοδευτική περιστροφή των επιμέρους τμημάτων των κόκκων (subgrain rotation) που τελικά οδηγεί σε δημιουργία, ανακρυστάλλωση (recrystallisation) ανεξάρτητων κόκκων.

Οι δύο μηχανισμοί που περιγράψαμε για την ανακρυστάλλωση (GBAR & SR) αντιστοιχούν σε αυτό που ονομάζουμε *δυναμική ανακρυστάλλωση (dynamic recrystallisation)* λόγω παραμόρφωσης.



Εικ. 3.13. Ανακρυστάλλωση με περιστροφή των επιμέρους τμημάτων των κόκκων (subgrain rotation – SR recrystallisation).

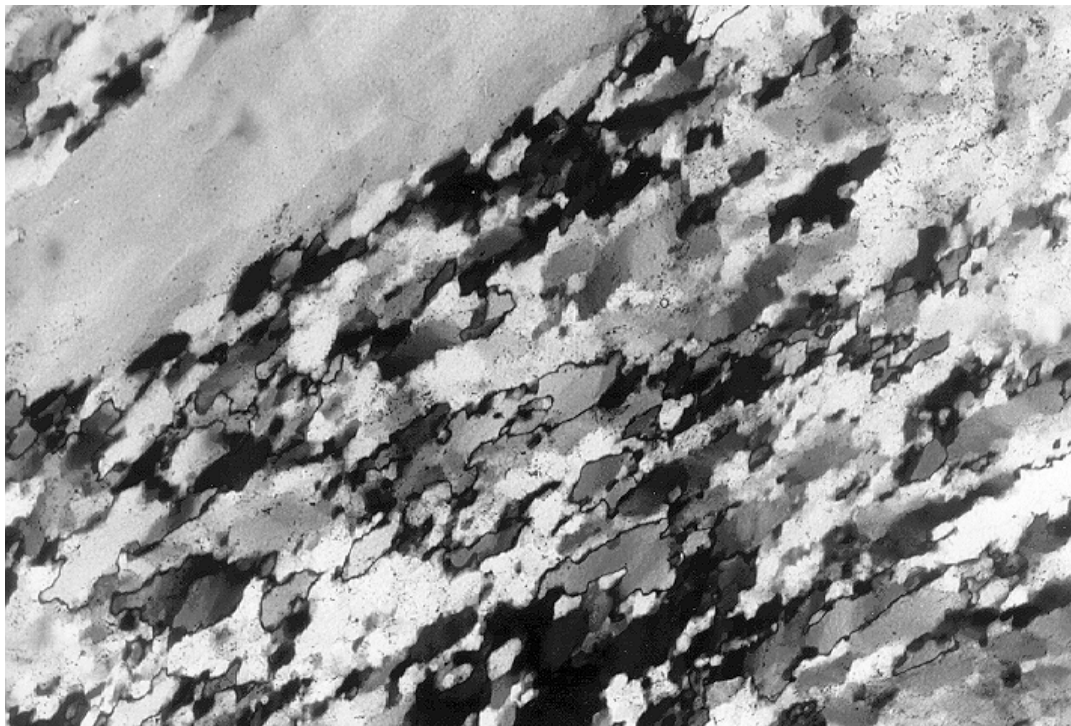
Η "πιστοποίηση» της δυναμικής ανακρυστάλλωσης είναι πιο δύσκολη απ' ό,τι στην παραμόρφωση (deformation) και την ανάκτηση (recovery). Διακρίνονται δύο περιπτώσεις χαρακτηριστικών μικροδομών που σχετίζονται με τη δυναμική ανακρυστάλλωση.

- α) τεκτονικός ιστός από μερική δυναμική ανακρυστάλλωση και
- β) τεκτονικός ιστός από ολική ανακρυστάλλωση.

Στον τεκτονικό ιστό της μερικής ανακρυστάλλωσης οι κόκκοι παρουσιάζουν ένα διττό χαρακτήρα σε σχέση με το μέγεθος. Παρατηρούνται συγκεντρώσεις μικρών κρυστάλλων ή κόκκων με ομοιόμορφο μέγεθος ανάμεσα σε μεγάλους κρυστάλλους με κυματοειδή κατάσβεση και επιμέρους τμήματα (subgrains) με το ίδιο μέγεθος όπως οι μικροί κρύσταλλοι.



Εικ. 3.14. Δυναμική ανακρυστάλλωση από μετανάστευση των ορίων των κόκκων.



Εικ. 3.15. Δυναμική ανακρυστάλλωση από περιστροφή των επιμέρους τμημάτων των κόκκων.

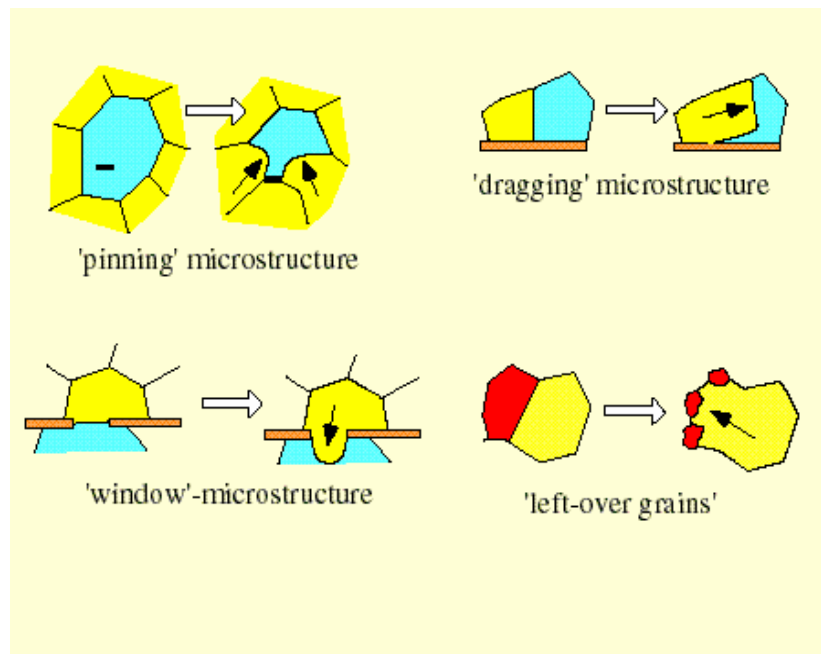
Το ομοιόμορφο μέγεθος είναι το αποτέλεσμα της παραμόρφωσης και ανακρυστάλλωσης κάτω από την επίδραση συγκεκριμένης διαφορικής τάσης.

Οι ιστοί από ολική ανακρυστάλλωση είναι δύσκολο να διακριθούν από τους μη-ανακρυσταλλωμένους ιστούς που απλά χαρακτηρίζονται από σχετικά ομοιόμορφο μέγεθος κόκκων. Ενδείξεις αποτελούν:

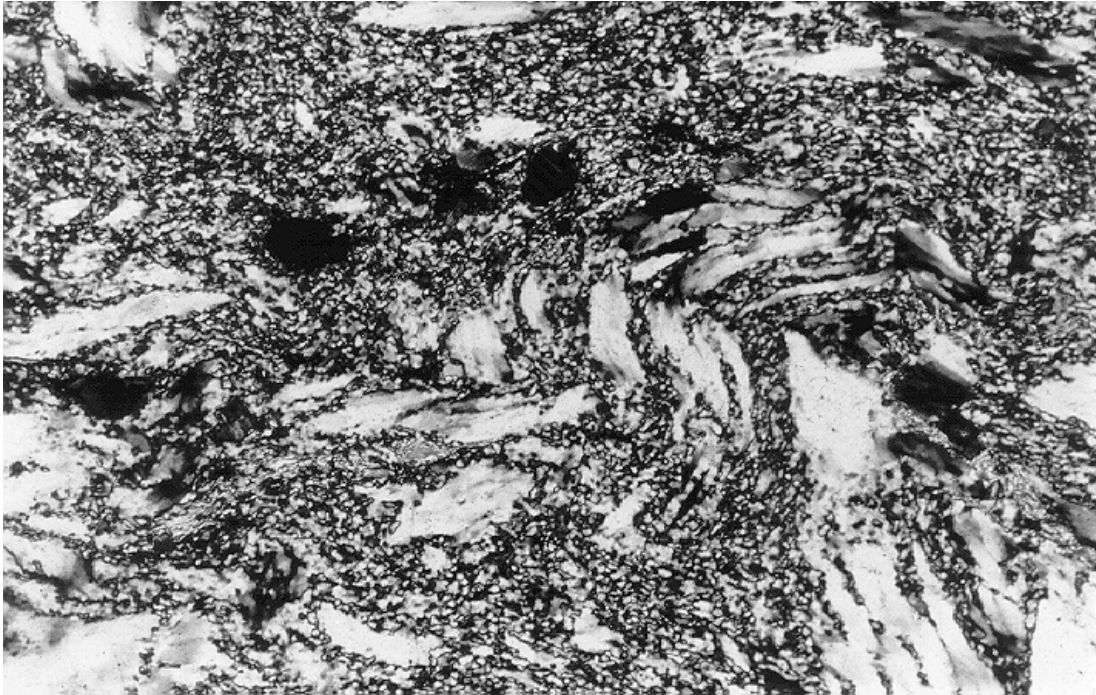
- i) η εσωτερική παραμόρφωση,
- ii) ο προτιμητέος προσανατολισμός του πλέγματος (Lattice Preferred Orientation – LPO) και
- iii) το ομοιόμορφο μέγεθος.

Ένδειξη για GBM ανακρυστάλλωση αποτελεί η ύπαρξη κόκκων με εντελώς ακανόνιστα όρια. Ένδειξη για SR ανακρυστάλλωση αποτελεί η προοδευτική μετάβαση από τα επιμέρους τμήματα των κόκκων (subgrains) σε συγκεντρώσεις νέων ανεξάρτητων (ανακρυσταλλωμένων) κόκκων με ομοιόμορφο μέγεθος, αλλά και η προοδευτική μετάβαση των ορίων των επιμέρους τμημάτων (subgrain boundaries) σε όρια ανεξάρτητων κόκκων (grain boundaries).

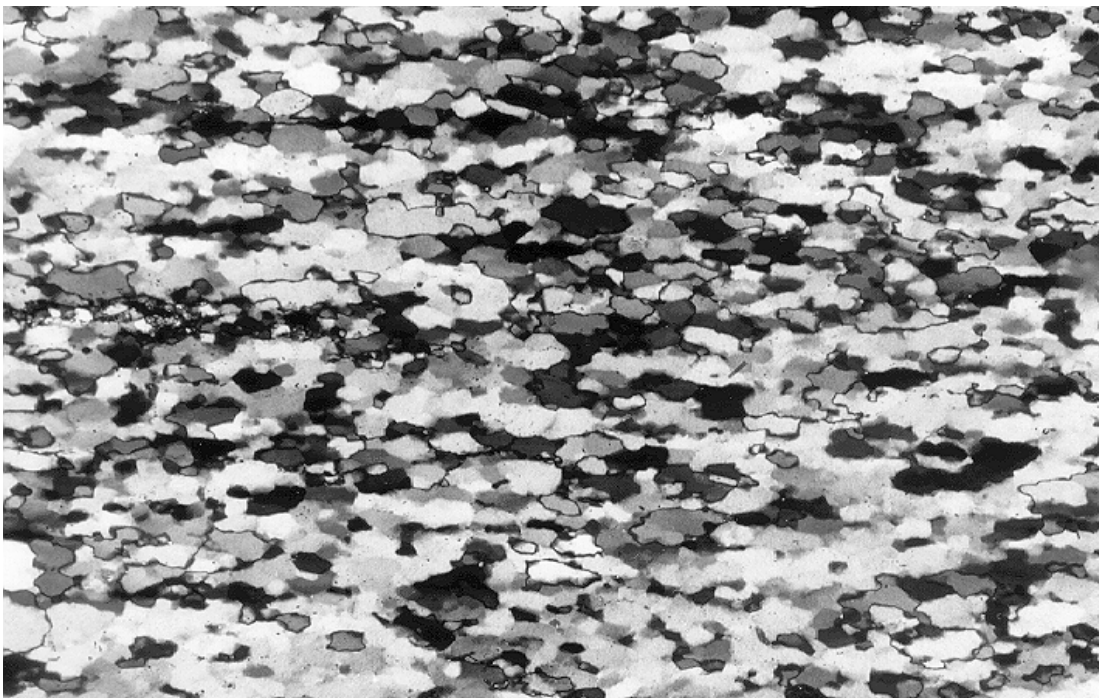
Στην SR ανακρυστάλλωση είναι επίσης χαρακτηριστική η παρουσία ενός ειδικού τύπου προτιμητέου προσανατολισμού του πλέγματος. Στις περιπτώσεις αυτές παρατηρείται μια "οικογένεια» προσανατολισμένων κόκκων (*orientation family of grains*) που είναι το αποτέλεσμα της δυναμικής SR ανακρυστάλλωσης ενός μεγάλου "γονικού» κρυστάλλου. Στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο η GBM ανακρυστάλλωση χαρακτηρίζεται από κόκκους με μεγάλες διαφορές στην πυκνότητα των εκτοπίσεων, σε αντίθεση με την SR ανακρυστάλλωση όπου το σύνολο των κόκκων παρουσιάζει την ίδια πυκνότητα εκτοπίσεων.



Εικ. 3.16. Μικροδομές που δείχνουν μετανάστευση ορίων κόκκων κατά τη διάρκεια δυναμικής ανακρυστάλλωσης.



Εικ. 3.17. Υπολείμματα από παλαιούς πτυχωμένους κρυστάλλους χαλαζία που έχουν αντικατασταθεί από νέους κρυστάλλους κατά τη διάρκεια δυναμικής ανακρυστάλλωσης.



Εικ. 3.18. Τυπικός ιστός από δυναμικά ανακρυσταλλωμένο χαλαζία.

Χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες μικροδομές για να αναγνωρισθούν μεταναστεύσεις ορίων κρυστάλλων αλλά και η διεύθυνση και φορά της μετανάστευσης στις περιπτώσεις της δυναμικής ανακρυστάλλωσης. Οι μικροδομές αυτές έχουν διάφορα ονόματα στη βιβλιογραφία, βλπ. σχήμα, όπου το βέλος δείχνει τη φορά ανάπτυξης του ενός κρυστάλλου (κίτρινου στο σχήμα) εις βάρος του άλλου (κυανού στο σχήμα).

Μια συγκέντρωση από μικρούς δυναμικά ανακρυσταλλωμένους κόκκους γύρω από έναν κρυσταλλικό πυρήνα με την ίδια χημική σύσταση, είναι γνωστή με το όνομα "δομή πυρήνα-και-μανδύα» (*core-and-mantle structure*). Αν ο μανδύας αυτός των ανακρυσταλλωμένων κόκκων είναι εξαιρετικά λεπτόκοκκος και ο μηχανισμός κάτω από τον οποίο έχει λάβει χώρα είναι αβέβαιος, χρησιμοποιείται ο όρος "δομή κονιάματος?"» (*mortar structure*). Ο όρος αυτός θεωρείται από πολλούς ως ανεπιτυχής, διότι γενετικά σημαίνει μηχανικά θρυμματισμένο πέτρωμα, που δεν αληθεύει στις περισσότερες περιπτώσεις.

3.2.7 ΔΙΑΧΥΣΗ ΑΠΟ ΕΡΠΥΣΜΟ ΣΕ ΣΤΕΡΕΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (SOLID STATE DIFFUSION CREEP)

Όταν η θερμοκρασία σε ένα παραμορφωμένο πέτρωμα είναι υψηλή, οι κρύσταλλοι μπορεί να παραμορφώνονται αποκλειστικά με τη μετανάστευση των κενών θέσεων (*vacancies*) διαμέσου του πλέγματος. Ο μηχανισμός αυτός είναι γνωστός με το όνομα *solid state diffusion creep* (διάχυση από ερπυσμό σε στερεά κατάσταση ?) και υπάρχουν δύο βασικοί τύποι:

- 1) *Coble creep*. Διάχυση των κενών θέσεων (*vacancies*) στο κρυσταλλικό πλέγμα κατά μήκος των ορίων των κόκκων.
- 2) *Nabarro-Herring creep*. Διάχυση των κενών θέσεων διαμέσου (από άκρη σε άκρη) του πλέγματος.

Συχνά χρησιμοποιείται και ο όρος *crystalplastic deformation*, που αναφέρεται στην παραμόρφωση από *dislocation creep* ή *diffusion creep*, όταν δεν μπορεί να γίνει διάκριση ανάμεσα στους δύο τύπους.

3.2.8 ΟΛΙΣΘΗΣΗ ΟΡΙΩΝ ΚΟΚΚΩΝ ΚΑΙ ΥΠΕΡΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ (GRAIN BOUNDARY SLIDING AND SUPERPLASTICITY)

Στα πολύ λεπτόκοκκα αθροίσματα κρυστάλλων, οι κρύσταλλοι μπορούν να ολισθαίνουν μεταξύ τους, δεδομένου ότι η ανάπτυξη κενών ανάμεσά τους αποτρέπεται από μηχανισμούς όπως το *solid state diffusion creep* ή διάλυση και καθίζηση μέσω των ρευστών στα όρια των κόκκων. Ο μηχανισμός αυτός καλείται *ολίσθηση ορίων κόκκων* (*grain boundary sliding*). Στη Γεωλογία ο όρος *υπερπλαστικότητα* (*superplasticity*) αναφέρεται σε εξαιρετικά λεπτόκοκκα αθροίσματα ισομεγέθων κόκκων (1-10 μm) που σε πολύ υψηλή καταπόνηση παραμορφώνονται χωρίς να αναπτύσσουν κάποιον προσανατολισμένο ιστό ή προτιμητέο προσανατολισμό στο πλέγμα (LPO).

Ο μηχανισμός της ολίσθησης ορίων κόκκων, φαίνεται ότι παίζει καθοριστικό ρόλο στην περίπτωση αυτή. Το μέγεθος των κόκκων τελικά είναι η κύρια παράμετρος που καθορίζει αν ένα άθροισμα κρυστάλλων ή κόκκων θα παραμορφωθεί με *dislocation creep* ή *solid state diffusion creep* και *grain boundary sliding*.

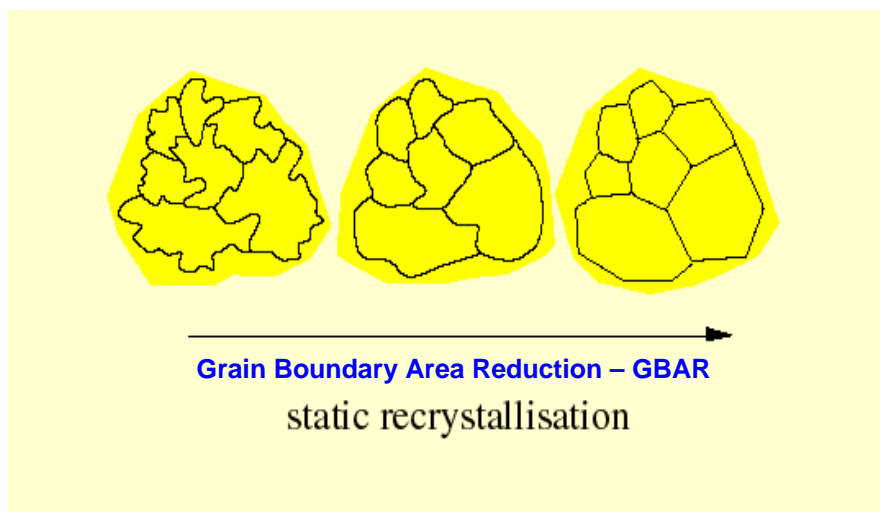
Πολύ λίγες είναι οι δομές που πιστοποιούν το diffusion creep. Συνήθως είναι τα πολύ καμπύλα και με λοβώδες σχήμα όρια των κόκκων, ανάμεσα σε δύο διαφορετικά ορυκτά, σε υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης πετρώματα. Και οι δύο μηχανισμοί συνδυαζόμενοι απαγορεύουν ή και καταστρέφουν την ανάπτυξη LPO. Άρα η παρουσία πολύ λεπτόκοκκων και ισομεγέθων κόκκων χωρίς καθαρό LPO σε συνθήκες υψηλής καταπόνησης αποτελεί μια έμμεση απόδειξη της λειτουργίας των μηχανισμών αυτών.

Επισημαίνεται ότι η παρουσία LPO δεν αποτελεί απόδειξη για την μη ύπαρξη grain boundary sliding. Ευθύγραμμα και παράλληλα τμήματα των ορίων των κόκκων, συχνά παρατηρούμενα σε δύο διευθύνσεις στο δείγμα, μπορεί να οφείλονται στο μηχανισμό αυτό. Τα όρια αυτά διακρίνονται καλά σε μονο-ορυκτολογικά αθροίσματα χαλαζία ή ασβεστίτη, στα οποία η δομή αυτή δεν είναι συνήθης.

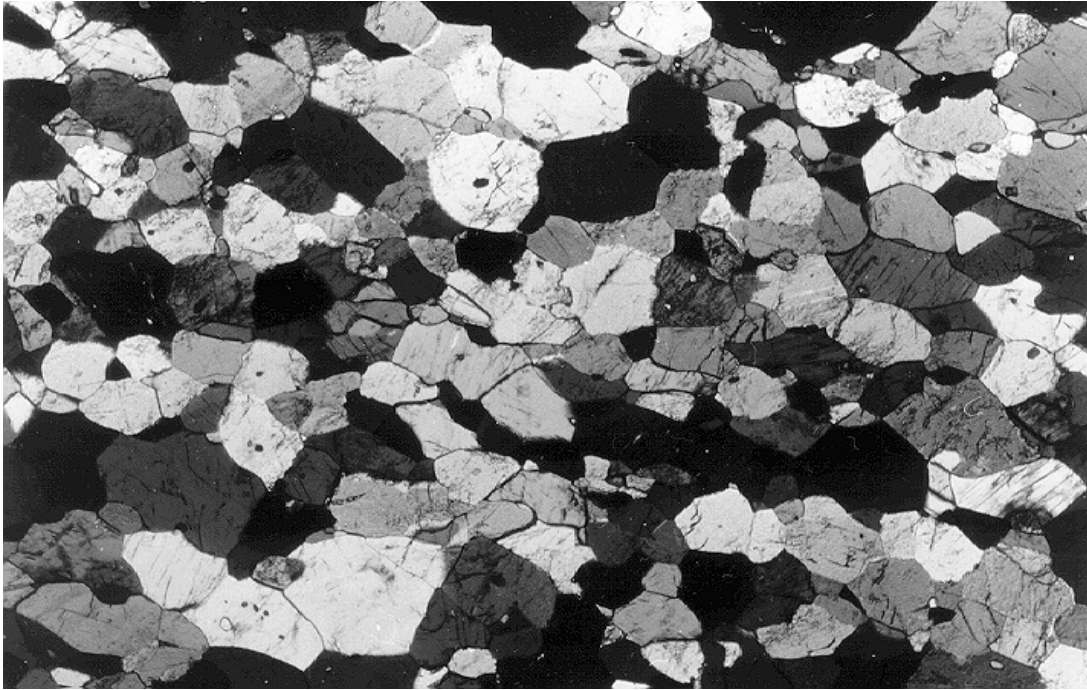
Η παρουσία ασαφών ορίων, ανάμεσα σε ισχυρά πεπλατυσμένα λεπτόκοκκα μονοικρυσταλλικά αθροίσματα από δύο ορυκτά, μπορεί να είναι ένα επακόλουθο ανάμιξης λόγω grain boundary sliding. Στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο πιθανοί δείκτες για το μηχανισμό αυτό είναι η μικρή πυκνότητα dislocations, το παραλληλόγραμμο σχήμα των κόκκων και η παρουσία κενών ανάμεσα στα όρια των κόκκων.

3.2.9 ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΟΡΙΩΝ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ (GRAIN BOUNDARY AREA REDUCTION)

Εκτός από τις εκτοπίσεις και τα όρια των κόκκων είναι δομές με υψηλή ελεύθερη εσωτερική ενέργεια. Μείωση της επιφάνειας των ορίων επιφέρει και μείωση της ενέργειας αυτής. Αποτέλεσμα η δημιουργία πολυγωνικών κόκκων με ευθύγραμμα όρια (foam structures, Triple junction, Interfacial or Dihedral Angle 120^0).



Εικ. 3.19. Απεικόνιση του μηχανισμού μείωσης των ορίων των κόκκων (grain boundary area reduction).



Εικ. 3.20. Πολυγωνικός ιστός που προήλθε από το μηχανισμό *grain boundary area reduction* (μείωση ορίων των κόκκων).

Ο μηχανισμός αυτός οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση της ενέργειας απ' ότι το GBM & SR. Λαμβάνει χώρα κυρίως μετά το σταμάτημα της παραμόρφωσης και με την αύξηση της θερμοκρασίας.

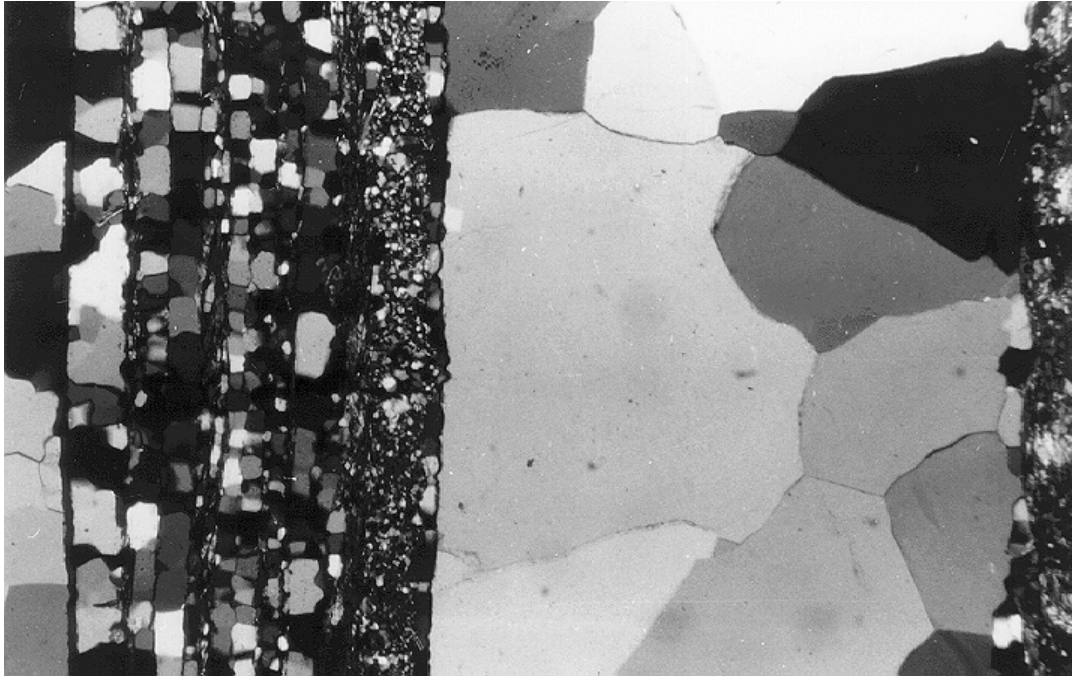
Το μέγεθος των κόκκων βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με την μονο-ορυκτολογική (μεγάλοι κόκκοι) ή πολυ-ορυκτολογική σύσταση (μικροί κόκκοι).

Παρατηρείται επίσης ένας συσχετισμός στη γεωμετρία των ορίων με συγκεκριμένους κρυσταλλογραφικούς άξονες. Αποκλίσεις από την γωνία 120° εντοπίζονται ανάλογα με την ενέργεια των ορίων σε πολυκρυσταλλικά πετρώματα.

3.2.10 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΚΡΥΣΤΑΛΛΩΣΗ (STATIC RECRYSTALLISATION)

Με την επιβράδυνση ή το σταμάτημα της παραμόρφωσης τα ορυκτά δεν έχουν την ελάχιστη εσωτερική ενέργεια, έστω και αν οι μηχανισμοί *recovery* & *recrystallisation* ήταν πολύ σημαντικοί κατά την παραμόρφωση. Υπάρχουν ακόμα *dislocations*, *dislocation tangles* & *subgrain boundaries*. Τα όρια των κόκκων έχουν ένα ακανόνιστο κυματοειδές σχήμα και ορισμένα ορυκτά μπορεί να είναι ακόμα ασταθή.

Αν η θερμοκρασία ήταν υψηλή, όταν σταμάτησε η παραμόρφωση, ή αν υπήρχε αρκετό νερό ανάμεσα στους κόκκους, οι μηχανισμοί *recovery*, *recrystallisation* & *GBAR* συνεχίζουν να λειτουργούν (παρά την απουσία παραμόρφωσης), μέχρι να ελαχιστοποιηθεί η εσωτερική ενέργεια. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται *στατική ανακρυστάλλωση* (*static recrystallisation*).



Εικ. 3.21. Στατική ανακρυστάλλωση χαλαζία σε ένα πέτρωμα που αποτελείται από εναλλαγές χαλαζία (αδρόκοκκες ενδιαστρώσεις) και αστρίων (λεπτόκοκκες ενδιαστρώσεις).

Κατά τη διάρκειά της τα ασταθή ορυκτά αντικαθίστανται από σταθερά, τα dislocation tangles απομακρύνονται, τα όρια των κόκκων γίνονται ευθύγραμμα και οι κόκκοι αυξάνονται σε μέγεθος λόγω GBAR.

Σε ένα πέτρωμα που έχει ήδη ισχυρά παραμορφωθεί, (όπως φανερώνουν η παρουσία πτυχών και τα υπολείμματα μιας φύλλωσης, οφθαλμών ή ισχυρού LPO), ενδείξεις για στατική ανακρυστάλλωση και GBAR (του κύριου μηχανισμού που συνδέεται με αυτή) αποτελούν:

- Η παρουσία κρυστάλλων με ευθύγραμμο ή ελαφρά καμπύλο όριο.
- Η απουσία κυματοειδούς κατάσβεσης.
- Η απουσία subgrain boundaries.

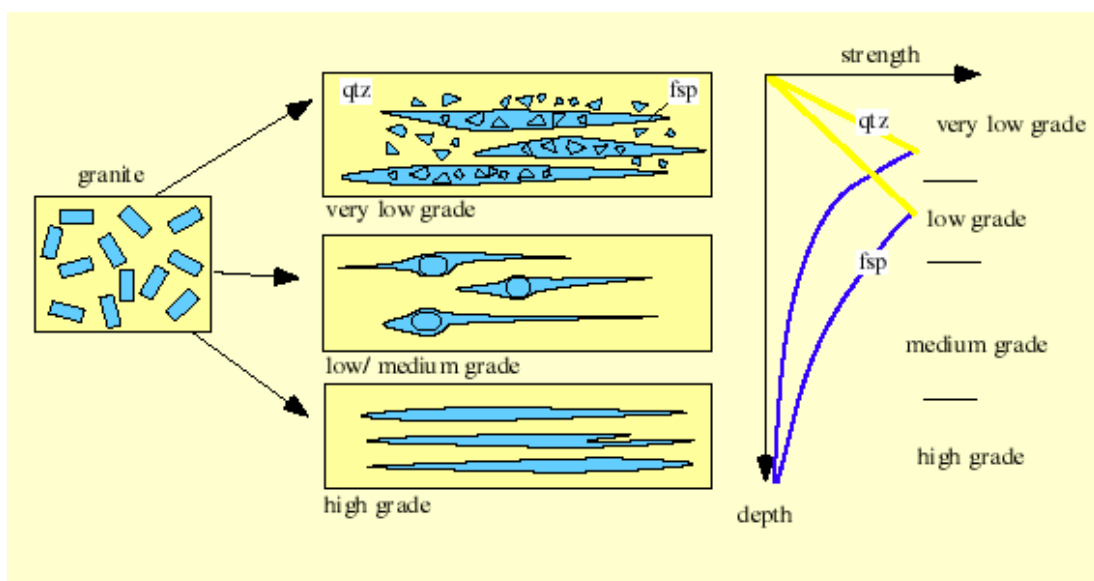
Στατική ανακρυστάλλωση καταδεικνύεται επίσης από την παρουσία μικρών προσανατολισμένων κόκκων ενός δευτερεύοντος ορυκτού που περιέχεται στους κόκκους του κύριου ορυκτού.

3.3 Παραμόρφωση ορυκτών και πετρωμάτων

Μέσα από την περιγραφή των μηχανισμών παραμόρφωσης έγινε κατανοητό ότι η ορυκτολογική σύσταση και οι εκάστοτε συνθήκες στις οποίες βρίσκεται ένα ορυκτό ή ένα πέτρωμα είναι οι πιο καθοριστικοί παράγοντες για το ποιοι μηχανισμοί παραμόρφωσης θα επικρατήσουν και ποιες, ως εκ' τούτου, τεκτονικές δομές θα αναπτυχθούν. Είναι κατανοητό ότι τα διάφορα ορυκτά, ανάλογα με τις φυσικοχημικές ιδιότητές τους, αντιδρούν με εντε-

λώς διαφορετικό τρόπο στις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος και άρα επικρατούν διαφορετικοί μηχανισμοί παραμόρφωσης που οδηγούν στη δημιουργία διαφορετικών τεκτονικών ιστών. Φαίνεται όμως ότι πολύ μεγάλη σημασία διαδραματίζει και το αν το πέτρωμα το οποίο παραμορφώνεται είναι μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό, καθώς επίσης και το ποια ορυκτά επικρατούν αλλά και το μέγεθος το οποίο έχουν. Έχει παρατηρηθεί ότι τα διάφορα ορυκτά παρουσιάζουν στις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και ρυθμού καταπόνησης-διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με το αν συμμετέχουν σε ένα μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό πέτρωμα.

Σε γενικές γραμμές η συμπεριφορά των πολυκρυσταλλικών πετρωμάτων είναι αρκετά σύνθετη και πολύπλοκη. Αν "σκληρά" και "μαλακά" ορυκτά συνυπάρχουν, η αντοχή δεν αυξάνει γραμμικά με την αύξηση του ποσοστού των "σκληρών" ορυκτών. Αν η παρουσία των "σκληρών" ορυκτών είναι πολύ μικρή, η συμπεριφορά του πετρώματος είναι ανάλογη με αυτή ενός μονοκρυσταλλικού που αποτελείται από "μαλακά" ορυκτά. Τα σκληρά ορυκτά μπορεί να περιστρέφονται μέσα από την τεκτονική ροή που χαρακτηρίζει την παραμόρφωση του "μαλακού" ορυκτού, ή και να δημιουργούν δομές "πυρήνα-και-μανδύα" (*core-and-mantle structures*, βλπ. στα επόμενα) αν μπορούν να ανακρυσταλλωθούν εξωτερικά. Η αντοχή του πετρώματος αυξάνει όσο αυξάνει το ποσοστό και το μέγεθος των "σκληρών" ορυκτών. Όταν τα "σκληρά" ορυκτά γίνουν κυρίαρχα στη σύνθεση του πετρώματος, η αντοχή θα πλησιάσει αυτή ενός μονοκρυσταλλικού "σκληρού" πετρώματος, αν και σε συνθήκες υψηλού ρυθμού καταπόνησης μπορεί οι συγκεντρώσεις των "μαλακών" ορυκτών να διασυνδεθούν μεταξύ τους σχηματίζοντας ζώνες διάτμησης.



Εικ. 3.22. Μεταβολές στην παραμόρφωση ενός χαλαζιο-αστριούχου πετρώματος σε σχέση με το βάθος..

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα παραμόρφωσης πολυορυκτολογικών αθροισμάτων αποτελούν τα χαλαζιο-αστριούχα πετρώματα (quartzo-feldspatic rocks), που παρουσιάζουν μια αξιοσημείωτη συσχέτιση της παραμόρφωσης και των τεκτονικών δομών με το βαθμό μεταμόρφωσης (Εικ. 3.22). Σε συνθήκες πολύ χαμηλής μεταμόρφωσης και τα δύο ορυκτά αντιδρούν με θραύση. Στις συνθήκες αυτές οι άστριοι είναι το πιο ασθενές ορυκτό επειδή παρουσιάζουν σχισμό που μειώνει την αντοχή τους. Σε συνθήκες χαμηλού βαθμού μετα-

μόρφωσης οι άστριοι συνεχίζουν να αντιδρούν θραυσigenώς, σε αντίθεση με το χαλαζία που παραμορφώνεται με όλκιμο τρόπο με κύριο μηχανισμό τον dislocation creep. Στις συνθήκες αυτές ο χαλαζίας είναι πια το ασθενέστερο ορυκτό. Οι άστριοι δημιουργούν δομές "πυρήνα-και-μανδύα", με τον πυρήνα (άστρο) να χαρακτηρίζεται από θραυσigenείς δομές και μερικά από κυματοειδή κατάσβεση.

Σε συνθήκες μέσου-υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης και τα δύο ορυκτά παραμορφώνονται με dislocation creep και δυναμική ανακρυστάλλωση. Δημιουργούν μονοκρυσταλλικές ή πολυκρυσταλλικές ταινίες που δίνουν στο πέτρωμα μια χαρακτηριστική ταινιωτή δομή.

Σε συνθήκες υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης τα όρια των κόκκων γίνονται λοβώδη και επικρατούν μηχανισμοί όπως οι "solid-state diffusion creep" ή "solution precipitation creep".