



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων- Μεταλλουργών  
Κατεύθυνση Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών  
Εργαστήριο Φυσικής Μεταλλουργίας

Διπλωματική εργασία

Πολυκυκλική κόπωση χάλυβα ελατηρίων 51CrV4 με  
επαναφερμένη μαρτενσιτική μικροδομή

Φίλιππος Μπούκης

Επιβλέποντες : Dr. -Ing. Σ. Παπαευθυμίου,  
Επίκουρος καθηγητής

10/2016

## Ευχαριστίες

Στον παππού μου

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, καθώς και το τμήμα της επιστήμης και τεχνολογίας υλικών για τα εφόδια και τις γνώσεις που μου έδωσαν τα χρόνια φοίτησής μου.

Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω του καθηγητές μου. Η συμβολή του κυρίου Γ. Φούρλαρη και των διαλέξεών του ήταν καθοριστική στο να επιλέξω το αντικείμενο της επιστήμης και τεχνολογίας υλικών. Ευχαριστώ επίσης θερμά τον κύριο Σ. Παπαευθυμίου για τις γνώσεις που έλαβα, την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής, καθώς και την πολύ σημαντική καθοδήγησή του στην διάρκεια συγγραφής της.

Ευχαριστώ ακόμα τους υπεύθυνους και διδακτορικούς φοιτητές του εργαστηρίου μεταλλογνωσίας της σχολής για την σημαντική βοήθειά τους στις πειραματικές εργασίες που μου παρείχαν.

Ευχαριστώ ακόμα τον συμφοιτητή μου, Γιώργο Μανωλιό, για την συνεργασία που είχαμε.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια και τους φίλους μου για την αγάπη και την στήριξη που μου δείχνουν όλα αυτά τα χρόνια.

<b>Περιεχόμενα</b>	<b>σελ</b>
Περίληψη	iv
<b>Κεφάλαιο 1</b>	<b>1</b>
1.1 Σίδηρος και Χάλυβες	
1.1.1 Σίδηρος και Χάλυβες	
1.1.2 Διάγραμμα σιδήρου-άνθρακα	2
1.1.3 Μπαινίτης	5
1.1.4 Μαρτενσίτης	6
1.1.5 Επίδραση των κραματικών στοιχείων	10
1.2 Κόπωση	13
1.2.1 Ορισμός της κόπωσης στα υλικά	
1.2.2 Τα τρία στάδια της αστοχίας σε κόπωση	
1.2.2.1 Έναρξη	
1.2.2.2 Διάδοση	
1.2.2.3 Τελική Θραύση	16
1.2.3 Διαγράμματα S-N	17
1.2.4 Διαγράμματα Goodman	20
1.2.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την έναρξη της ρωγμής	21
1.2.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τη ζωή κόπωση	23
1.3 Ελατήρια φύλλων	24
1.3.1 Βασικές αρχές και διάταξη των ελατηρίων φύλλων	
1.3.2 Διαδικασία κατασκευής ελατηρίου φύλλων	27
1.3.3 FEM (Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων)	28
1.4 Shot peening	30
<b>Κεφάλαιο 2</b>	<b>37</b>
2.1 Πειραματικά αποτελέσματα του πανεπιστημίου TU Delft	
2.1.1 Επαναφερμένα μαρτενσιτικά και μπαινιτικά δοκίμια χωρίς shot peening	
2.1.2 Επαναφερμένα μαρτενσιτικά και μπαινιτικά δοκίμια με shot peening	40
<b>Κεφάλαιο 3</b>	

3.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	
3.2 Συμπεριφορά του Shot peening	
3.2.1. Συμπεριφορά του single shot peening	
3.2.2 Συμπεριφορά με double shot peening	41
3.2.3 Shot peening σε υψηλές θερμοκρασίες	43
3.3 Ιδιότητες κόπωσης των μαρτενσιτικών και μπαινιτικών χαλύβων	
3.3.1 Επίδραση εγκλεισμάτων και νανοσωματιδίων	
3.3.2 Ιδιότητες σε κόπωση διαφόρων μικροδομών σε χάλυβες.	45
3.3.2.1 Ιδιότητες σε κόπωση χαλύβων με επαναφερμένη μαρτενσιτική μικροδομή	46
3.3.2.2 Ιδιότητες σε κόπωση μαρτενσιτικών και μπαινιτικών μικροδομών	
3.3.2.3 Ιδιότητες σε κόπωση μεικτών μικροδομών	47
3.3.2.4 Ιδιότητες σε κόπωση χαλύβων TRIP	52
<b>Κεφάλαιο 4 –Συμπεράσματα</b>	<b>54</b>
Πηγές	55

## Περίληψη

Ο σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η σύγκριση της επαναφερμένης μαρτενσιτικής και της μπαινιτικής μικροδομής χαλύβων, που προορίζονται για χρήση σε ελατήρια φύλλων. Η σύγκριση έγινε με βάση τα αποτελέσματα από δοκιμές κόπωσης. Για τις συγκεκριμένες εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία επιλέγεται συνήθως η επαναφερμένη μαρτενσιτική δομή. Η χρήση μπαινιτικών χαλύβων φαίνεται πολλά υποσχόμενη για την επίτευξη υψηλότερης αντοχής σε κόπωση του τελικού προϊόντος. Η χημική σύσταση των δοκιμίων, που είχαμε στη διάθεσή μας είναι τυπική χάλυβα 51CrV4. Τα κραματικά στοιχεία Mn, Cr, V, Si συμβάλλουν στην επίτευξη ικανοποιητικών μηχανικών ιδιοτήτων μετά την εφαρμογή των κατάλληλων θερμο-μηχανικών κατεργασιών.

Στο **Κεφάλαιο 1** της παρούσας εργασίας περιγράφονται οι μηχανισμοί σχηματισμού και οι ιδιοιαιτερότητες της μαρτενσιτικής και μπαινιτικής μικροδομής. Η σημασία της κόπωσης στη μηχανική και τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης, τα οποία εκφράζονται με S-N διαγράμματα επίσης παρουσιάζονται. Επιπλέον, διαγράμματα Goodman και άλλα εργαλεία για την παρουσίαση ιδιοτήτων κόπωσης και οι βασικές αρχές, που επηρεάζουν τη ζωή της κόπωσης, συζητούνται εδώ. Γίνεται αναφορά στην χρήση μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και του πρόγραμματος ANSYS ως εργαλείο για την προσομοίωση της κατανομής τάσεων σε πραγματικές συθήκες. Ο σκοπός των αρχών των συστημάτων φύλλων και η σημασία της σφαιροβολής (shot peening), μιας ευρέως χρησιμοποιούμενης μέθοδος, που αποσκοπεί στην εισαγωγή εναπομεινουσών τάσεων και οδηγεί στην αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων, συζητείται επίσης.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από δείγματα, που εξετάστηκαν στο TU Delft σε μια περιστρεφόμενη καμπτική μηχανή κόπωσης INSTRON κάτω από μηδενική μέση τάση. Τα αποτελέσματα αναλύονται με S-N διαγράμματα και συγκρίνονται οι μεταξύ τους επιφάνειες θραύσης. Η σύγκριση μεταξύ των δύο μικροδομών χάλυβα χωρίς και με shot peening λαμβάνει επίσης χώρα.

Στο **Κεφάλαιο 3** η επίδραση των μπαινιτικών και επαναφερμένων μαρτενσιτικών μικροδομών στη ζωή ενός δοκιμίου υπο κόπωση συνοψίζεται σε μια εκτεταμένη βιβλιογραφική έρευνα. Έχει αποδειχθεί ότι το shot peening οδηγεί σε αυξημένη διάρκεια ζωής ενός υλικού.

Στο **Κεφάλαιο 4** τα αποτελέσματα της κόπωσης και των επιφανειών θραύσης των μπαινιτικών και μαρτενσιτικών δοκιμίων 51CrV4 του TU Delft με και χωρίς shot peening συγκρίνονται με τα προηγούμενα ευρήματα της βιβλιογραφίας.



## Κεφάλαιο 1

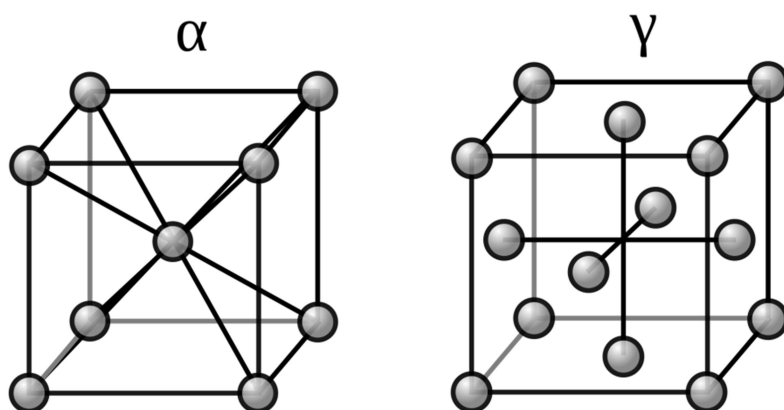
### 1.1 Σίδηρος και Χάλυβες

#### 1.1.1 Σίδηρος και Χάλυβες

Οι Χάλυβες είναι κράματα με σίδηρο ως το κύριο συστατικό. Παρά το γεγονός ότι πολλά διαφορετικά συστατικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν, εκτός από σίδηρο, είναι η ποσότητα του άνθρακα, καθώς και ακαθαρσίες ή επιπρόσθετα χημικά στοιχεία που καθορίζουν τις ιδιότητες και την ποιότητα του κάθε χάλυβα.

Ο σίδηρος (Fe - ατομικός αριθμός 26) είναι το πιο κοινό μεταλλικό στοιχείο στη γη με πυκνότητα  $7,874 \text{ g / cm}^3$ . Αν και ο χάλυβας έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από άλλα κοινά μέταλλα όπως το αλουμίνιο ( $2,7 \text{ g / cm}^3$ ) ή το τιτάνιο ( $4,5 \text{ g / cm}^3$ ) προσφέρει τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες αναλογικά με την τιμή αγοράς του. Το υψηλό σημείο τήξης του ( $\sim 1.500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) τον καθιστά επίσης κατάλληλο για εφαρμογές υπό υψηλές θερμοκρασίες.

Η κρυσταλλική δομή του σιδήρου παρουσιάζει επίσης μεγάλο ενδιαφέρον. Από την θερμοκρασία δωματίου έως τους  $910 \text{ }^\circ\text{C}$  και άνω των  $1390 \text{ }^\circ\text{C}$  παρουσιάζει κυβική χωροκεντρωμένη δομή-α (BCC), ενώ στο ενδιάμεσο ( $910 \text{ }^\circ\text{C}$  έως  $1390 \text{ }^\circ\text{C}$ ) παρουσιάζει κυβική ενδοκεντρομένη δομή- γ (FCC). Σε χάλυβες διαφορετικές μικροδομές είναι δυνατόν να επιτευχθούν ανάλογα με τις ακαθαρσίες και τα χημικά στοιχεία που επιλέγουμε να προσθέσουμε. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την αλλοτροπία των χαλύβων θα αναπτυχθούν στις ενότητες 1.1.2-1.1.4

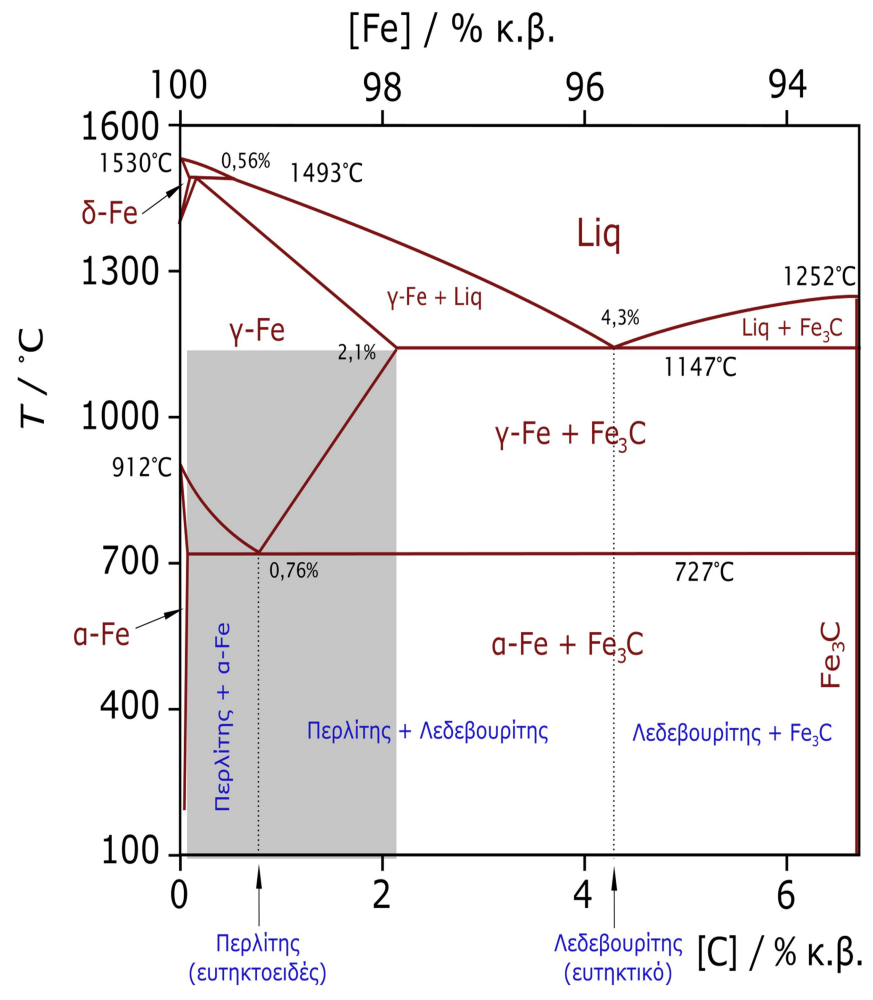


**Εικόνα 1** : κυβική χωροκεντρωμένη -α (bcc) και κυβική ενδοκεντρομένη δομή- γ (fcc)

Πέρα από τις δύο αυτές δομές θα εξεταστεί στην ενότητα 1.1.4 η τετραγωνική ενδοκεντρωμένη δομή του μαρτενσίτη.

Η επιλογή του κατάλληλου χάλυβα εξαρτάται από την εφαρμογή για την οποία προορίζεται. Οι ανθρακούχοι και οι κραματωμένοι χάλυβες είναι οι κύριες κατηγορίες χαλύβων που χρησιμοποιούνται στις βασικότερες εφαρμογές. Οι πρώτοι περιέχουν άνθρακα σε χαμηλό ή υψηλό ποσοστό (έως 2,1%) και χαμηλές προσμίξεις σε άλλα κραματικά στοιχεία (όπως μαγγάνιο), ενώ οι δεύτεροι ποικίλα ποσοστά σε άνθρακα και μεγαλύτερη προσθήκη άλλων κραματικών στοιχείων. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες, για παράδειγμα, αποτελούν μια μεγάλη κατηγορία των κραματωμένων χαλύβων με προσθήκες ενός ελάχιστου 13% (κατά βάρος) χρώμιο και χρησιμοποιούνται σε αντιδιαβρωτικές εφαρμογές και εποτρέπουν σημαντικά την εμφάνιση σκουριάς. Τύποι χάλυβα, όπως οι ηλεκτρικοί χάλυβες, οι οποίοι διακρίνονται από υψηλές προσμίξεις σε πυρίτιο (Si) χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές εφαρμογές.

1.1.2 Διάγραμμα σιδήρου-άνθρακα



Εικόνα 2: Διάγραμμα σιδήρου άνθρακα



Το διάγραμμα φάσεων σιδήρου-άνθρακα είναι το πιο βασικό και χρησιμοποιείται για να δείξει την φάση οποιουδήποτε χάλυβα ανάλογα με το % του βάρους σε άνθρακα για μια δεδομένη θερμοκρασία. Όπως προκύπτει στην **Εικόνα 2** η μέγιστη περιεκτικότητα του άνθρακα σε σίδηρο είναι 6,67%, όπου υπάρχει ως καθαρός σεμεντίτης ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Οι χάλυβες, από την άλλη πλευρά, είναι κράματα σιδήρου-άνθρακα που περιέχουν 0,025 ως 2,1% άνθρακα. Σε πραγματικές εφαρμογές όμως οι χάλυβες σχεδόν ποτέ δεν χρησιμοποιούνται με περιοεκτικότητα σε άνθρακα μεγαλύτερη από 1,2% .

Τέσσερις αλλοτροπικές φάσεις μπορούν να αναγνωριστούν στο παραπάνω διάγραμμα:

A - Σίδηρος ( $\alpha\text{-Fe}$ ), επίσης γνωστός ως φερρίτης, όπου η δομή είναι κυβική χωροκεντρωμένη και η μέγιστη συγκέντρωση του άνθρακα είναι 0,0025%. Ο φερρίτης συναντάται σε θερμοκρασία δωματίου έως  $770^\circ\text{C}$  και από  $1390^\circ\text{C}$  μέχρι το σημείο τήξης. Ο φερρίτης δεν παρουσιάζει πολύ ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες αλλά έχει πολύ καλή επιδεκτικότητα συγκόλλησης και μαγνητικές ιδιότητες (σιδηρομαγνητικά). Με την αύξηση της συγκέντρωσης άνθρακα στους χάλυβες η ικανότητα συγκόλλησης χειροτερεύει.

- B- Σίδηρος ή ( $\beta\text{-Fe}$ ), ο οποίος έχει την ίδια κρυσταλλογραφική δομή με τον  $\alpha\text{-Fe}$  και συναντάται σε θερμοκρασίες μεταξύ  $770^\circ\text{C}$  και  $910^\circ\text{C}$  οπότε και δεν θεωρείται μια ξεχωριστή αλλοτροπική φάση. Στους  $770^\circ\text{C}$  είναι η θερμοκρασία A2 (ή Curie), όπου ο φερρίτης γίνεται παραμαγνητικός και χάνει τις μαγνητικές του ιδιότητες.

- Γ- Σίδηρος (ωστενίτης) ή ( $\gamma\text{-Fe}$ ) είναι η κυβική ενδοκεντρομένη δομή-  $\gamma$  (fcc) του σιδήρου, συναντάται σε θερμοκρασίες μεταξύ  $910^\circ\text{C}$  και  $1390^\circ\text{C}$  και έχει μέγιστη συγκέντρωση 2% σε άνθρακα. Σε χάλυβες ο ωστενίτης μπορεί να σχηματιστεί από  $723^\circ\text{C}$ . Είναι μαλακή και όλκιμη δομή με ενδιαφέρουσες μηχανικές ιδιότητες. Η μετασταθής φάση του μπορεί , σε συνδυασμό με άλλες φάσεις , να συναντηθεί σε θερμοκρασία δωματίου.

-Δ- Σίδηρος ( $\delta\text{-Fe}$ ) ο οποίος σχηματίζεται όταν αρχίζει η στερεοποίηση του σιδήρου ( $1595^\circ\text{C}$ ) μέχρι τους  $1390^\circ\text{C}$ . Η κρυσταλλική δομή του είναι χωροκεντρωμένη κυβική (bcc) και παρουσιάζει μέγιστο ποσοστό σε άνθρακα (0,09% ) σχεδόν στους  $1493^\circ\text{C}$ .

Όταν η συγκέντρωση σε άνθρακα είναι μεγαλύτερη από 0,008% και σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από  $723^\circ\text{C}$  σχηματίζεται σεμεντίτης. Έχει μια ορθορομβική κρυσταλλική δομή και περιέχει 6,67% άνθρακα. Χαρακτηρίζεται ως σκληρή και πολύ εύθραυστη φάση με αποτέλεσμα να έχει πολύ περιορισμένες εφαρμογές στη βιομηχανία.

Τρεις τύποι σεμεντίτη μπορούν να αναγνωριστούν ανάλογα με τη φάση από την οποία προέκυψε:

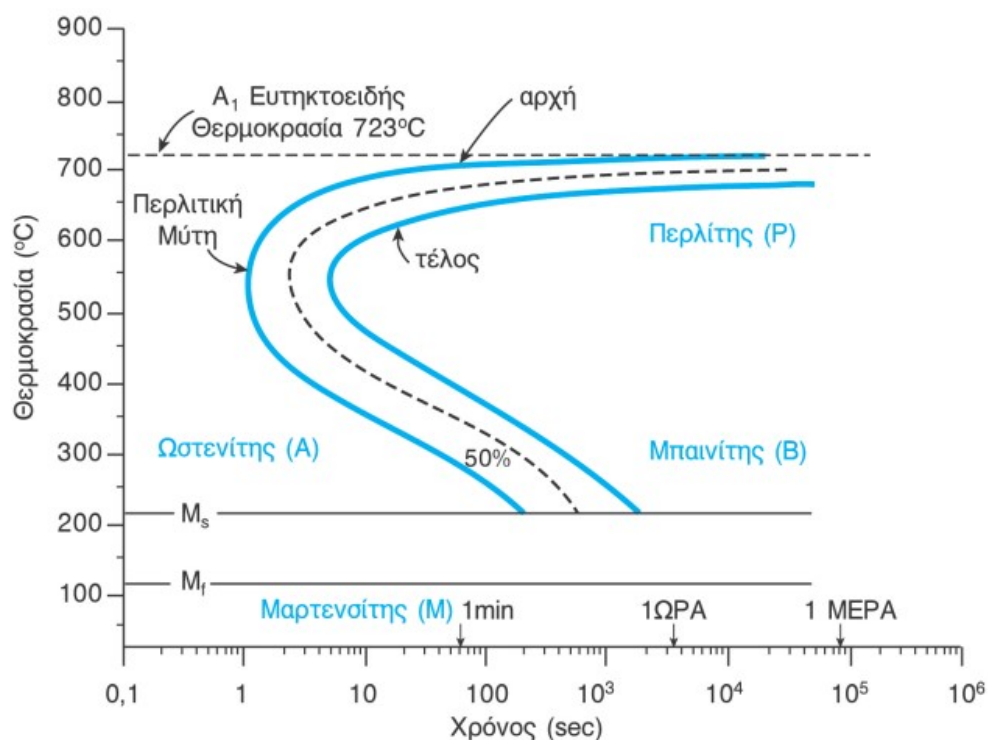
- Πρωτογενής σεμεντίτης, ο οποίος σχηματίζεται σε θερμοκρασίες άνω των  $1130^\circ\text{C}$ .

- Δευτερογενής σεμεντίτης, ο οποίος σχηματίζεται από τον πρωτογενή ωστενίτη
- Τριτογενής σεμεντίτης, που προκύπτει από την κατακρήμνιση από το στερεό διάλυμα του α - φερρίτη.

Στο ευτηκτικό σημείο (0,8% περιεκτικότητα σε άνθρακα) και κάτω από τους 723 °C σχηματίζεται μια πεταλοειδής δομή, που ονομάζεται περλίτης. Ο περλίτης αποτελείται από σεμεντίτη και φερρίτη.

Για περιεκτικότητα σε άνθρακα που κυμαίνεται από 0,8% έως 2,1% περλίτης και σεμεντίτης συνυπάρχουν. Πάνω από 2,1% περιεκτικότητα σε άνθρακα και άλλες δομές υφίστανται, όπως λεδεμβουρίτης, αλλά χάλυβες με τόσο υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα δεν είναι χρήσιμοι για βιομηχανική χρήση.

Το διάγραμμα φάσης σιδήρου-άνθρακα δεν είναι απολύτως ακριβές όταν άλλοι παράγοντες είναι παρόντες. Ανάλογα με το χρόνο και τη θερμοκρασία ψύξης από την ωστενιτική φάση μπορεί να προσδιοριστεί η τελική μικροδομή του χάλυβα σε θερμοκρασία δωματίου. Το διάγραμμα TTT (Time-Temperature-Transformation diagram) -που είναι μοναδικό για κάθε τύπο του χάλυβα (ανάλογα με τη χημική σύνθεση του) - είναι το κατάλληλο εργαλείο για τον προσδιορισμό αυτό.



**Εικόνα 3 :** Τυπικό διάγραμμα TTT

Ένα τυπικό διάγραμμα TTT για μια τυχαία χημική σύνθεση φαίνεται στην **Εικόνα 3**. Ο περλίτης, η μόνη τελική φάση η οποία ήταν παρούσα στο διάγραμμα σιδήρου-άνθρακα, δημιουργείται μόνο αν το μέταλλο θερμαίνεται ισόθερμα σε υψηλή

θερμοκρασία (πάνω από 500 °C στην προκειμένη περίπτωση) για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα.

### 1.1.3 Μπαινίτης

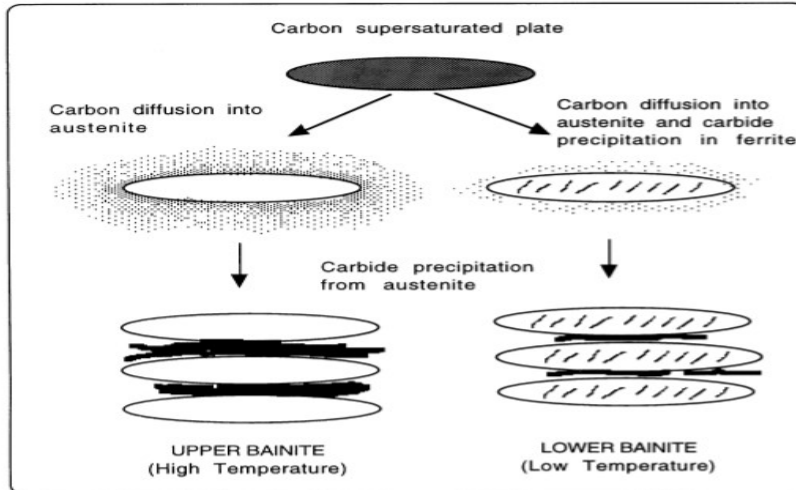
Κάτω από μία ορισμένη θερμοκρασία η διάχυση είναι πολύ περιορισμένη και ο σχηματισμός περλιτικής μικροδομής δεν είναι εφικτός. Στην περίπτωση αυτή αν το μέταλλο υποστεί θερμική επεξεργασία σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σχηματίζεται μια δομή γνωστή ως μπαινίτης. Ο μπαινίτης χαρακτηρίζεται ως μίγμα φερρίτη και καρβιδίων και διαμορφώνεται ως συσσωματώματα μικρών σφαιριδίων ή πλατειών κόκκων φερρίτη. Συνατούνται δύο τύποι μπαινίτη, ο ανώτερος και ο κατώτερος:

α) Ο ανώτερος μπαινίτης διαμορφώνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες και διακρίνεται ως επιμήκεις (στενόμακρους) κόκκους φερρίτη με ανώμαλα συμπλεκόμενα περατωτικά όρια, που προσδίδουν μια «φτερωτή» δομή. Ο άνθρακας αποθηκεύεται ως πολύ λεπτά καρβίδια μεταξύ των φερριτικών ορίων.

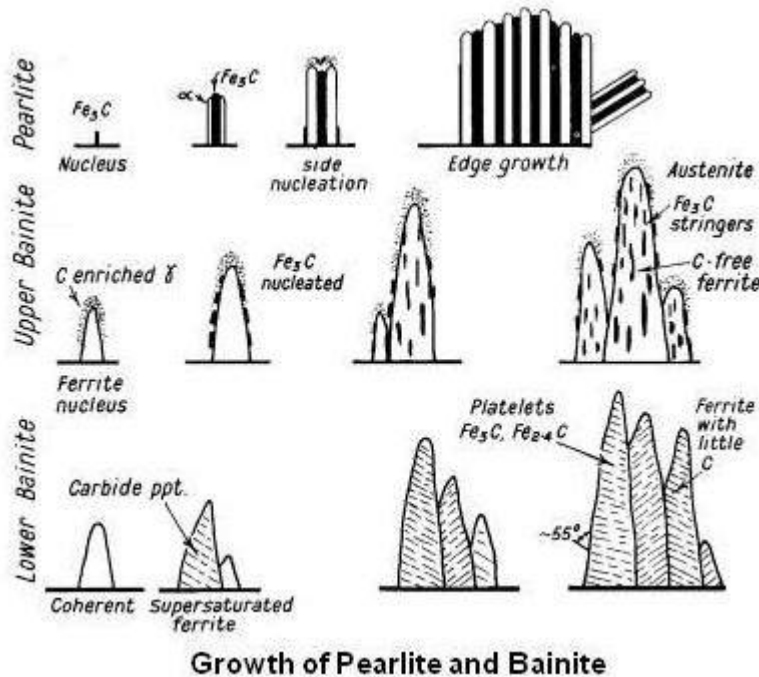
β) Ο κατώτερος μπαινίτης από την άλλη πλευρά σχηματίζεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Η ακόμα πιο αργή διάχυση καθιστά δυνατή την κατακρήμνιση του άνθρακα στον φερρίτη (η οποία έχει τώρα μια πιο βελονοειδή μικροδομή). Αυτό σημαίνει ότι κάποια ποσότητα του άνθρακα είναι δεσμευμένη και τα καρβίδια τώρα είναι ακόμα πιο λεπτά.

Στην **Εικόνα 4** οι διαφορές στην μορφολογία του ανώτερου και κατώτερου μπαινίτη και στην **Εικόνα 5** η ανάπτυξη του περλίτη και του μπαινίτη παρουσιάζονται σχηματικά. Αυτές οι διαφορές στην μικροδομή είναι αδύνατο να παρατηρηθούν σε ένα οπτικό μικροσκόπιο, ενώ είναι δύσκολο να διακριθούν ακόμα και αν χρησιμοποιείται ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Κατά γενικό κανόνα, όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία στην θερμική επεξεργασία, τόσο λεπτότερη είναι η τελική μικροδομή. Σε αυτήν την περιοχή (από χονδρόκοκο περλίτη σε κατώτερο μπαινίτη) η λεπτότερη μικροδομή σχετίζεται τις περισσότερες φορές με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, λόγω της περιορισμένης διαθέσιμης διαδρομής των διαταραχών στο εσωτερικό του κόκκου.



**Εικόνα 4:** Διαφορές στην μορφολογία του ανώτερου και κατώτερου μπαινίτη (The Bainite Controversy , 2013)

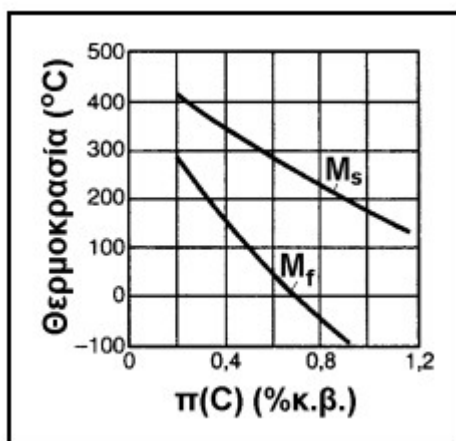


**Εικόνα 5:** Ανάπτυξη του περλίτη και του μπαινίτη (The Bainite Controversy , 2013)

#### 1.1.4 Μαρτενσίτης

Κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία και με υψηλή ταχύτητα μετασχηματισμού σχηματίζεται μια άλλη μικροδομή που ονομάζεται μαρτενσίτης. Η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται  $M_s$  ( $s$  = αρχή) και είναι ακριβώς κάτω από την χαμηλότερη θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού. Σε αυτή τη θερμοκρασία σχηματίζεται μόνο μια μικρή ποσότητα του μαρτενσίτη και συνυπάρχει με τον παραμένοντα ωστενίτη. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, το ποσοστό του παραμένοντα ωστενίτη μειώνεται, ενώ

το ποσοστό του μαρτενσίτη αυξάνεται. Η θερμοκρασία στην οποία λαμβάνεται πλήρης μαρτενσιτική δομή ονομάζεται  $M_f$  (f = finish - θερμοκρασία περάτωσης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού). Αν η πτώση της θερμοκρασίας δεν είναι αρκετά γρήγορη σχηματίζεται μαινίτης ή περλίτης και τότε ακόμα και σε θερμοκρασίες κατώτερες της  $M_f$  δεν είναι δυνατή μια πλήρως μαρτενσιτική δομή, διότι αυτές οι φάσεις, σε αντίθεση με τον ωστενίτη, είναι σταθερές σε θερμοκρασία δωματίου. Αύξηση του ποσοστού σε άνθρακα συνεπάγεται με μείωση των θερμοκρασιών  $M_s$  και  $M_f$  όπως φαίνεται στην **Εικόνα 6**.



**Εικόνα 6 :** Μεταβολή των θερμοκρασιών  $M_s$  και  $M_f$  συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άνθρακα (24).

Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός είναι μια μη διαχυσιακή διαδικασία, που προωθείται από διατμητικούς μηχανισμούς

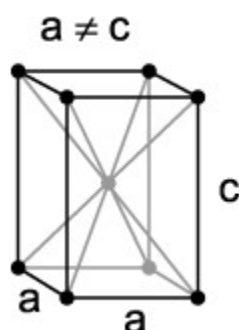
Ως εκ τούτου, πρέπει να υπάρχει μια ορισμένη ταχύτητα ψύξης, ώστε να επιτευχθεί μια πλήρως μαρτενσιτική μικροδομή. Αυτή η κρίσιμη ταχύτητα ονομάζεται κρίσιμη ταχύτητα ψύξης ( $V_c$ ) και εξαρτάται κυρίως από τη χημική σύνθεση του χάλυβα, ως επί το πλείστον την περιεκτικότητα σε άνθρακα και την περιεκτικότητα σε κραματικά στοιχεία, όπως το νικέλιο και το μαγγάνιο.

Αυτή η ξαφνική ψύξη του χάλυβα ονομάζεται βαφή και συνήθως λαμβάνει χώρα με εμβάπτιση σε νερό ή σε λάδι. Με το νερό η ταχύτητα απόσβεσης είναι υψηλότερη, αλλά μικροσκοπικές ρωγμές (quench cracks) μπορεί να εμφανιστούν, λόγω της απότομης πτώσης της θερμοκρασίας. Η βαφή σε λάδι είναι αρκετά διαδομένη, καθώς αποτρέπει πολλές φορές τη δημιουργία ρωγμών, αλλά η επιλογή ακατάλληλου λαδιού μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη σκουριά. Η βαφή σε λάδι δεν είναι εφικτή για θερμοκρασίες άνω των 230 °C, περιορίζοντας αρκετές φορές την εφαρμογή της.

Η μέθοδος της βαφής σε λουτρά άλατος προτιμάται πολλές φορές. Τα λουτρά άλατος μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (-150 έως 595 °C). Η θερμότητα εξάγεται από τη διάδοση θερμότητας με έναν ενιαίο τρόπο, πράγμα που σημαίνει ότι η παραμόρφωση ελέγχεται και το τελικό προϊόν έχει λιγότερες

πιθανότητες να παρουσιάσει quench cracks. Τα λουτρά άλατος είναι, επίσης, πολύ αποτελεσματικά όταν χρησιμοποιούνται για την σκλήρυνση ενός υλικού.

Ο μαρτενσίτης κρυσταλλώνεται στο bct (χωροκεντρωμένο τετραγωνικό σύστημα) προκύπτοντας από τον ωστενίτη (κρυσταλλογραφικό σύστημα fcc – ενδοκεντρωμένο κυβικό). Η εναλλαγή αυτή στο σύστημα κρυστάλλωσης, η οποία πραγματοποιείται κατά την απότομη μείωση θερμοκρασίας στην βαφή, συνοδεύεται πολλές φορές με την ανάπτυξη ανεπιθύμητων τάσεων στην τελική μικροδομή. Η τετραγωνικότητα του μαρτενσίτη εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε άνθρακα, ο οποίος καταλαμβάνει τις οκταεδρικές θέσεις. Ο λόγος των πλευρών  $c/a$  των ακμών της τετραγωνικής κυψελίδας δίνεται από την σχέση  $c/a = 1 + 0.045 (\% \text{ κ.β. C})$ , οπότε εξαρτάται άμεσα από την περιεκτικότητα σε άνθρακα. Σχηματικά η κρυσταλλογραφία του συγκεκριμένου πλέγματος παρίσταται στην **Εικόνα 7**



**Εικόνα 7** : bct (χωροκεντρωμένο τετραγωνικό σύστημα) (Wikipedia)

Η αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα σταθεροποιεί τον ωστενίτη σε θερμοκρασία δωματίου. Ένας χάλυβας με περιεκτικότητα σε άνθρακα 1,3% μπορεί να φθάσει ακόμη και το 40% στον παραμένοντα ωστενίτη, ενώ σε ένα χάλυβα με λιγότερο από 0,3% της περιεκτικότητας σε άνθρακα σχεδόν καθόλου ωστενίτης παραμένει στην τελική μικροδομή του μετάλλου αν είναι σωστά εκτελεσμένη η θερμική επεξεργασία.

Στοιχεία όπως το μαγγάνιο και το νικέλιο διαστέλλουν την ωστενιτική περιοχή, σταθεροποιώντας την. Άλλα στοιχεία όπως το χρώμιο, το πυρίτιο και το μολυβδαίνιο αυξάνουν την ευτικτική θερμοκρασία, σταθεροποιώντας την φερριτική περιοχή.

Ο μαρτενσίτης θεωρείται ως μια πολύ σκληρή, αλλά συγχρόνως πολύ εύθραυστη φάση με κακές μηχανικές ιδιότητες. Η απότομη ψύξη αυξάνει τις διαταραχές στην τελική μικροδομή οδηγεί στο φαινόμενο αυτό. Γι' αυτό τον λόγο η μαρτενσιτική δομή χωρίς περαιτέρω θερμική επεξεργασία δεν συνίσταται για βιομηχανική χρήση.

Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα και να βελτιωθεί η αντοχή του μαρτενσίτη πρέπει να γίνει επαναφορά του. Σε αυτή τη διαδικασία το υλικό θερμαίνεται σε μια ορισμένη θερμοκρασία κάτω από την θερμοκρασία A1 (723 °C) με αποτέλεσμα να ανακουφίζονται οι εναπομείναντες τάσεις του μετάλλου, να δίνονται σταθερότερα μικρογραφικά στοιχεία και να σταθεροποιείται η μικροδομή. Οι μετασχηματισμοί που

συμβαίνουν κατά την επαναφορά χωρίζονται σε πάνω από ένα στάδια. Επίσης, βασική προϋπόθεση της επαναφοράς είναι πρώτα η βαφή του χάλυβα προκειμένου να προκύψει η μαρτενσιτική δομή. Συνήθως, το εύρος θερμοκρασιών για επαναφορά είναι 150 – 500 °C σε τρία ή τέσσερα στάδια.

Στην πράξη, σε θερμοκρασίες κοντά στους 250 °C είναι δυνατή μόνο η διάχυση του άνθρακα, αζώτου και άλλων μικρών και ευκίνητων χημικών στοιχείων. Η διάχυση του σιδήρου ξεκινά πάνω από τους 250 °C, ενώ τα στοιχεία με ακόμη μικρότερα ποσοστά διάχυσης αρχίζουν να διαχέονται σε θερμοκρασίες κοντά στους 450 °C και άνω. Η διαδικασία βαφής τότε είναι μοναδική για κάθε χάλυβα (ανάλογα με τη χημική του σύνθεση), ώστε να επιτευχθεί ένας ικανοποιητικός συνδυασμός σκληρότητας και αντοχής.

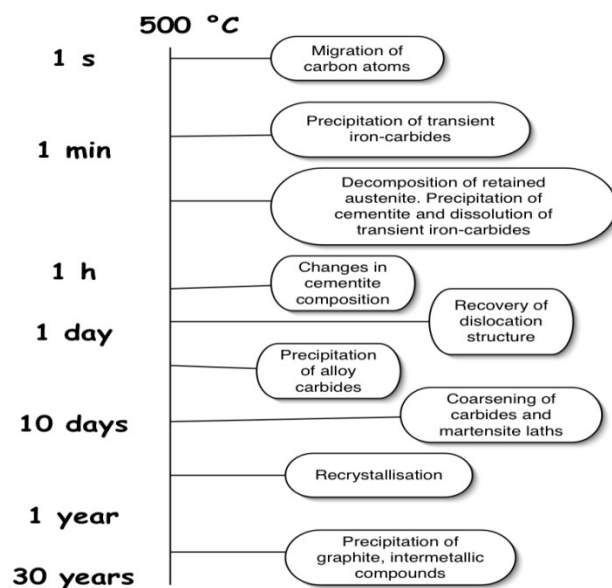
Γενικά, η θερμική κατεργασία επιτυγχάνει τα ακόλουθα:

- Πρώτο στάδιο : έως 250 ° C καθίζηση του καρβιδίου του α-σιδήρου και μερική απώλεια της τετραγωνικότητας του μαρτενσίτη.
- Δεύτερο στάδιο : μεταξύ 200 και 300 ° C, αποσύνθεση του συγκρατημένου οστενίτη (εφόσον υπάρχει) και μετατροπή του σε μπαινίτη.
- Τρίτο στάδιο : μεταξύ 200 και 350 ° C, αντικατάσταση των καρβιδίων α-σιδήρου με σεμεντίτη και ο μαρτενσίτης χάνει περαιτέρω την τετραγωνικότητά του. Επίσης, πάνω από τους 350 ° C παρατηρείται σφαιροποίηση του σεμεντίτη και ανακρυστάλλωση του φερρίτη.

Σε ελαφρά κραματωμένους χάλυβες παρατηρείται το τέταρτο στάδιο της επαναφοράς, το οποίο είναι και γνωστό ως δευτερογενής σκλήρωση, σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 450° C. Κραματικά στοιχεία, όπως το μαγγάνιο, το βανάδιο και το χρώμιο που υπάρχουν στην χημική σύσταση του δικού μας χάλυβα προς εξέταση (51CrV4) αντικαθιστούν τον σίδηρο στο πλέγμα του σεμπεντίτη, με αποτέλεσμα την κραμάτωσή του. Αποτέλεσμα της δευτερογενής σκλήρωσης είναι η αύξηση της ορίου ελαστικότητας και αντοχής του μαρτενσίτη, χωρίς να συνοδεύεται από μείωση της δυσθραυστότητάς του. Στην ενότητα 1.1.5 αναφέρονται ο σχηματισμός των διαφόρων μορφών κραματωμένου σεμπεντίτη από τα αντίστοιχα κραματικά στοιχεία.

(Prof H .K Khaira, 2013)

Ο χρόνος επαναφοράς έχει επίσης σημαντικό ρόλο στην τελική μικροδομή, όπως φαίνεται στην παρακάτω **Εικόνα 8**.



**Εικόνα 8:** Κινητική κατά την διάρκεια της επαναφοράς (H. K. D. H. Bhadeshia, 2004).

#### LTB (Low temperature Bainite) – (Μπαινίτης χαμηλής θερμοκρασίας)

Οι υψηλές περιεκτικότητες άνθρακα και πυριτίου χρησιμοποιούνται προκειμένου να μειωθεί η θερμοκρασία  $M_s$ . Η πτώση της θερμοκρασίας αυτής επεκτείνει την περιοχή, στην οποία μπορεί να προκύψει κατώτερη μπαινιτική μικροδομή. Αυτό σημαίνει ότι λεπτότερη μπαινιτική μικροδομή είναι εφικτή, οδηγώντας σε καλύτερες μηχανικές ιδιότητες για τον χάλυβα σε θερμοκρασίες δωματίου και προσφέροντας έναν καλύτερο συνδυασμό ολκιμότητας και σκληρότητας. Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας όμως για να επιτευχθεί αυτό είναι ο περιορισμός του σχηματισμού σε σεμεντίτη, ο οποίος είναι πιθανή φάση έναρξης ρωγμής. Η σταθεροποίηση της μικροδομής του κατώτερου μπαινίτη και επιτάχυνση της κινητικής του επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας αλουμίνιο, κοβάλτιο και πυρίτιο σε περιεκτικότητα πάνω από 1,5 %, ενώ παράλληλα καταστέλλεται η δημιουργία πυρήνων σεμεντίτη.

#### 1.1.5 Επίδραση των κραματικών στοιχείων

Τα κραματικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε χάλυβες επηρεάζουν τις τελικές τους ιδιότητες (π.χ μηχανικές ιδιότητες, συγκολλησιμότητα, αντοχή σε διαβρωτικά περιβάλλοντα)

Η χημική σύσταση του χάλυβα 51CrV4 (DIN EN 10277), ο οποίος χρησιμοποιείται στα πειράματα της συγκεκριμένης διπλωματικής και ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία σε αντίστοιχες εφαρμογές αναρτήσεων είναι

Πίνακας 1: Χημική σύσταση χάλυβα 51CrV4 κατά DIN EN 10277 (%-κ.β.)



C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Others
0.51	max. 0.40	0.90	1.05	-	-	0.18	-	-

Και το υπόλοιπο είναι Fe.

Κάθε ένα από αυτά τα χημικά στοιχεία ενεργεί διαφορετικά στο πλέγμα του χάλυβα και συμβάλλει σε διαφορετικές ιδιότητες. Κάτω εξετάζονται το καθένα χωριστά

**Άνθρακα (C)** θεωρείται ότι είναι το πιο σημαντικό στοιχείο κράματος στον χάλυβα και μπορεί να είναι παρόν έως και 2%-κ.β. (αν και οι περισσότεροι συγκολλημένων χάλυβες έχουν λιγότερο από 0,5%-κ.β.). Γενικά αυξημένες ποσότητες σε άνθρακα προσδίδουν υψηλότερη σκληρότητα και αντοχή σε εφελκυσμό, αλλά μειώνουν την συγκολλησιμότητα.

Το **Πυρίτιο (Si)** αυξάνει την αντοχή και την σκληρότητα, αλλά σε μικρότερο βαθμό από ό, τι το μαγγάνιο. Συνήθως μόνο μικρές ποσότητες (0,20%-κ.β.) είναι παρούσες σε χάλυβες έλασης όταν χρησιμοποιείται ως αναγωγικό μέσο. Το πυρίτιο διαλύεται στον σίδηρο και τείνει να τον ενισχύσει. Χάλυβες, που προορίζονται για συγκόλληση περιέχουν συνήθως περίπου 0,50%-κ.β. πυρίτιο ως αναγωγικό μέσο. Ορισμένα μέταλλα πληρώσεως (filler metals) μπορεί να περιέχουν έως και 1%-κ.β., παρέχοντας αυξημένη καθαρότητα και αποξείδωση για τη συγκόλληση με μολυσμένες επιφάνειες. Όταν αυτά τα μέταλλα πληρώσεως χρησιμοποιούνται για συγκόλληση σε καθαρές επιφάνειες η προκύπτουσα αντοχή του συγκολλημένου μετάλλου θα αυξηθεί σημαντικά. Η προκύπτουσα μείωση της ολκιμότητας όμως θα μπορούσε να δημιουργήσει ρωγμές, οπότε η επιλογή της κατάλληλου ποσοστού σε πυρίτιο είναι πολύ σημαντική.

Οι ηλεκτρικοί χάλυβες περιέχουν περίπου 6,5%-κ.β. πυρίτιο, καθώς προσφέρει υψηλές μαγνητικές ιδιότητες.

Το **χρώμιο (Cr)** ίναι ένα ισχυρό κραματικό στοιχείο στον χάλυβα. Αυξάνει σημαντικά την ικανότητα σκλήρυνσης του χάλυβα, και βελτιώνει σημαντικά την αντίσταση στη διάβρωση των κραμάτων σε οξειδωτικό περιβάλλον. Η παρουσία του σε ορισμένους χάλυβες μπορεί να προκαλέσει υπερβολική σκληρότητα και ρωγμές δίπλα σε επιφάνειες συγκόλλησης. Οι ανοξειδωτοι χάλυβες περιέχουν πάνω από 12% χρώμιο.

Κατά την δευτερογενή σκλήρωση το χρώμιο αντικαθιστά τον σίδηρο στον σεμεντίτη με τον ακόλουθο τρόπο :  $Fe_3C \rightarrow Cr_7C_3 \rightarrow Cr_{23}C_6$

**Βανάδιο (V).** Ένα ακόμη στοιχείο που η προσθήκη του βοηθά στη ικανότητα σκλήρυνσης του χάλυβα. Είναι πολύ αποτελεσματική όμως οπότε προστίθεται σε

μικρές ποσότητες. Σε ποσοστά πάνω από 0,05%, μπορεί να υπάρξει μια τάση ψαθυρότητας για το χάλυβα κατά τις θερμικές επεξεργασίες που αποσκοπούν στην ανακούφιση από τάσεις.

Κατά την δευτερογενή σκλήρωση στην επαναφορά σχηματίζονται στα όρια των κόκκων καρβίδια  $V_4C_3$ . Είναι επίσης πιθανό να σχηματιστεί το συγκεκριμένο καρβίδιο σε μορφή Widmanstätten εντός των κόκκων (Prof H .K Khaira, 2013).

Το συγκεκριμένο καρβίδιο αποτρέπει την εισαγωγή του ανεπιθύμητου υδρογόνου σε χάλυβες υψηλής αντοχής. (Chao-Lei Zhang et. Al, 2011) (S. Yamasaki and H. K. D. H. Bhadeshia, 2003)

Ποσοστά **μαγγανίου (Mn)**, τουλάχιστον 0,30%-κ.β., χρησιμοποιούνται σε χάλυβες, καθώς βοηθάνε στην αποξείδωσή του και συνιστά στην αυξημένη αντοχή τους με αύξηση της σκλήρυνσης (μειώνοντας τον κρίσιμο ρυθμό ψύξης κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης).

Η παρουσία του μαγγανίου είναι, επίσης, πολύ σημαντική διότι αποτρέπει τον σχηματισμό του θειούχου σιδήρου (FeS) και εγκλεισμάτων. Το μαγγάνιο συνδυάζεται με το θείο στον χάλυβα (σχηματίζοντας MnS), ελαχιστοποιώντας τον σχηματισμό σιδηροπυρίτη (FeS<sub>2</sub>), ο οποίος θα μπορούσε να προκαλέσει σημαντικές ρωγμές κατά την διάρκεια της έλασης σε υψηλή θερμοκρασία.

## 1.2 Κόπωση

### 1.2.1 Ορισμός της κόπωσης στα υλικά

Κόπωση σε ένα υλικό ορίζεται ως η απώλεια αντοχής του συναρτήσει του χρόνου μετά την εφαρμογή ενός αριθμού φορτίων. Οι αποτυχίες σε κόπωση μπορεί να θεωρηθούν ως οι πιο σημαντικές σε κατασκευές, διότι είναι απρόσμενες και λαμβάνουν χώρα κάτω από επαναλαμβανόμενες φορτίσεις κάτω από την μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (ή θλίψη) ενός υλικού.

Ιστορικά, το μεγαλύτερο ποσοστό στις αποτυχίες που συνέβησαν σε μεταλλικά υλικά προκλήθηκαν από κόπωση. Η εκτίμηση της κόπωσης είναι πιο δύσκολη απ' ό,τι εκείνη του εφελκυσμού ή της κάμψης και οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, όπως η αποφυγή ενός ακατάλληλου περιβάλλοντος λειτουργίας.

### 1.2.2 Τα τρία στάδια της αστοχίας σε κόπωση

#### 1.2.2.1 Έναρξη

Η έναρξη μιας ρωγμής προκαλείται από επαναλαμβανόμενες διάτμητικές καταπονήσεις που επιβάλλονται επί της δομής. Είναι το άθροισμα των πολλών τάσεων, που μπορούν να ξεκινήσουν μια ρωγμή, ενώ δεν μπορεί να προκληθεί σοβαρή βλάβη όταν εφαρμόζονται μεμονωμένα. Η έναρξη της ρωγμής εμφανίζεται στον πρώτο έως τον τρίτο κόκκο της ρωγμής. Η έναρξη της ρωγμής προκαλείται συνήθως από την επιφάνεια ενός υλικού, ενώ σε περιπτώσεις που έχουμε πολύ προστατευμένη επιφάνεια και σκληρότερη μικροδομή στην επιφάνεια η ρωγμή μπορεί να ξεκινήσει σε οποιαδήποτε βάθος από την επιφάνεια μέσα στο υλικό.

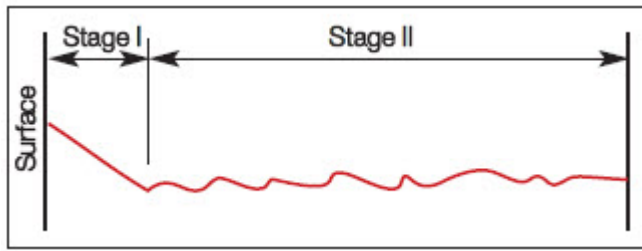
#### 1.2.2.2 Διάδοση

Η Διάδοση μιας ρωγμής επιτυγχάνεται σε δύο στάδια:

Στο Στάδιο I η ρωγμή είναι προσανατολισμένη κατά 45 μοίρες σε σχέση με το εφαρμοζόμενο φορτίο κατά μήκος των υψηλών διάτμητικών επιπέδων. Η αρχική ρωγμή σε ένα καθαρό υλικό διαδίδεται κατά μήκος ενός επιπέδου ολίσθησης εντός της ζώνης ολίσθησης. Το Στάδιο I εμφανίζεται στους πρώτους κόκκους μετά τη έναρξη της ρωγμής. Η πυρήνωση και η ανάπτυξη των ρωγμών κόπωσης προκαλείται από πλαστική παραμόρφωση. Οτιδήποτε προάγει την πλαστική παραμόρφωση θα μειώσει την ανθεκτικότητα σε κόπωση ενός υλικού.

Το Στάδιο II λαμβάνει χώρα σε μια κατεύθυνση κάθετη προς την κύρια ρωγμή, διαδιδόμενη σε μήκος πολύ μεγαλύτερο από ό, τι στο στάδιο I.

Στην **Εικόνα 9** φαίνεται σχηματικά η διάδοση της ρωγμής στα δύο στάδια.



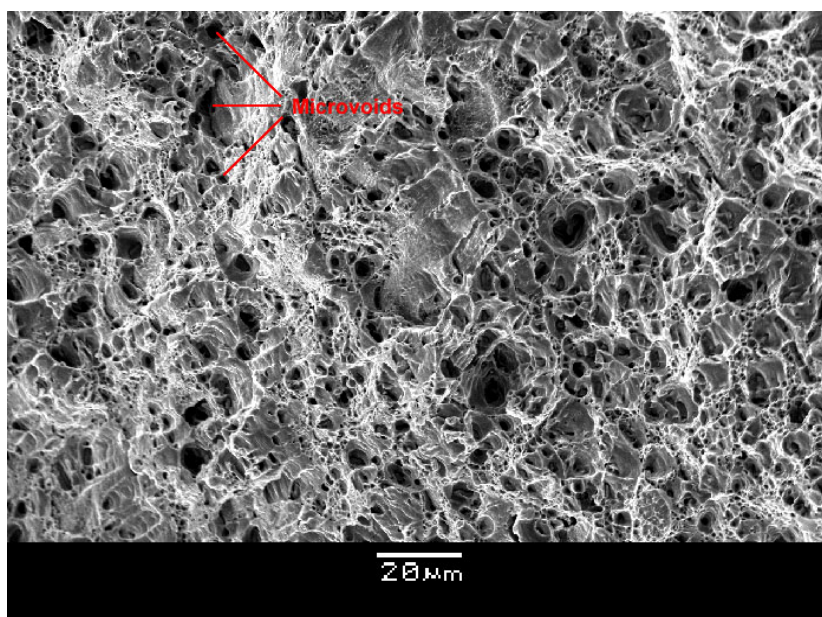
**Εικόνα 9 :** Διάδοση της ρωγμής

Οι ραβδώσεις (striations) είναι η πιο κοινή μικρογραφική ένδειξη επιφανειών θραύσης σε περιπτώσεις κόπωσης. Αποτελούν διακριτά χαρακτηριστικά, που εμφανίζονται ως σχετικά ομοιόμορφα κατανεμημένες γραμμές. Κάθε ράβδωση είναι στην πραγματικότητα μια ρηχή ρωγμή που προέκυψε από ένα μόνο φορτίο. Η διαδικασία αυτή είναι ορατή μόνο όταν συμβαίνει εξάπλωση της ρωγμής κόπωσης (στάδιο 2). Οι ραβδώσεις, που παρατηρούνται προκύπτουν επί το πλείστον:

- Όταν έχουμε όλκιμη συμπεριφορά του υλικού.
- όταν το μέταλλο είναι πάρα πολύ σκληρό ή μαλακό. Πολύ μαλακά μέταλλα είναι πολύ εύαλота σε αστοχία, ενώ πολύ σκληρά μέταλλα εκλείπουν πλαστικότητα

Η εξάπλωση της ρωγμής κόπωσης μπορεί επίσης να εκφραστεί με συνένωση μικροοπών (MVC) ή μικροδιείσδυση (microcleavage).

Η συνένωση μικροκενών προκύπτει σε υψηλούς ρυθμούς αύξησης των ρωγμών και είναι τις περισσότερες φορές μια διαδικασία υψηλής ενέργειας και συναντάται κατά την όλκιμη θραύση ενός υλικού. Συμβαίνει κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης από την πυρήνωση των μικροκενών, την ανάπτυξή τους και στο τέλος την συνένωσή τους.



**Εικόνα 10:** Αστοχία με συνένωση μικροκενών (University of Cambridge, 200)

Η θραύση μικροδιείσδυσης (microcleavage) είναι μία κατώτερα ενεργειακή διαδικασία και συνήθως συναντάται σε ψαθυρή συμπεριφορά του υλικού. Η θραύση μικροδιείσδυσης περιλαμβάνει θραύση κατά μήκος συγκεκριμένων κρυσταλλογραφικών επιπέδων και συνήθως εμφανίζεται ως επίπεδη όψη αποκοπής με πολλές παράλληλες κορυφογραμμές ή επιπέδων διάσπασης.



**Εικόνα 11:** Θραύση μικροδιείσδυσης (Microcleavage). Οι επίπεδες όψεις διάσπασης συμβάλλουν σε μια λαμπερή και φωτεινή αντανάκλαση.

Ο ρυθμός ανάπτυξης της ρωγμής,  $da / dN$ , vs  $\Delta K$  (applied stress intensity factor – εφαρμοζόμενος παράγοντας έντασης καταπόνησης) παρουσιάζει σχηματικά τη διάδοση της ρωγμής. «N» ορίζονται ως οι εφαρμοσμένοι κύκλοι, στους οποίους υποβάλλεται το υλικό και «a» ως το μήκος της ρωγμής. Αξιόπιστες εκτιμήσεις διάδοσης ρωγμών αυξάνουν την αξιοπιστία μιας κατασκευής και την αποτροπή αστοχιών.

Διάφορα επίπεδα «K» λαμβάνονται υπόψη. « $K_0$ » είναι η ένταση καταπόνησης για την περιοχή έναρξης της ρωγμής. « $K_c$ » είναι η αντοχή σε θραύση που εφαρμόζεται και εξαρτάται από το είδος του υλικού και το πάχος του. Ένα κρίσιμο επίπεδο «K», που μπορεί να προκαλέσει διάδοση της ρωγμής είναι μεταξύ των τιμών « $K_0$ » και « $K_c$ ». Ανάλογα με παράγοντες όπως είναι η ολκιμότητα και η ομοιογένεια του υλικού, ένα κρίσιμο επίπεδο K κυμαίνεται γενικά μεταξύ  $0,1 * K_c$  και  $0,4 * K_c$  (περισσότερο όλκιμο και καθαρό υλικό).

Ο  $\Delta K$  ορίζεται ως  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ , όπου (MPa \* m<sup>1/2</sup>)

$K_{max} = \sigma_{max} * (\pi * a)^{1/2}$  (MPa \* m<sup>1/2</sup>)

$K_{min} = \sigma_{min} * (\pi * a)^{1/2}$  (MPa \* m<sup>1/2</sup>)

Όπου,  $\sigma$  = η εφαρμοζόμενη τάση (MPa),  $a$  = μήκος ρωγμής (m)

Στο στάδιο I έχουμε  $da / dN = \Delta K$

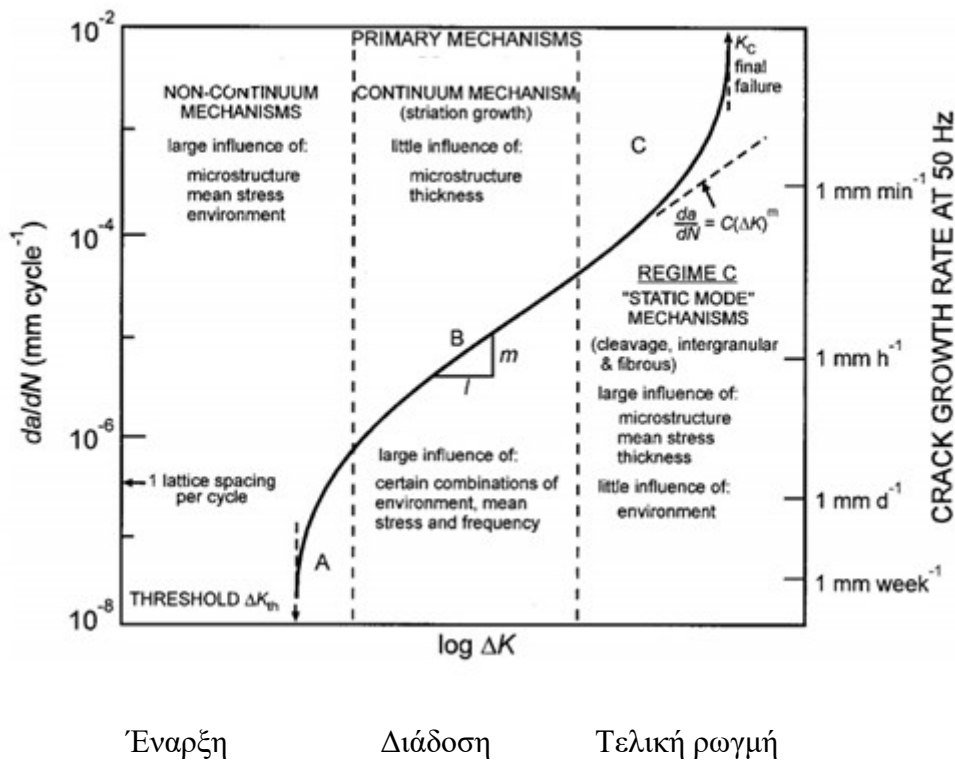
Στο στάδιο II έχουμε:  $da/dN = C*(\Delta K)^m$  (νόμος του Paris) όπου

$m$  = η κλίση της ευθείας που ορίζει την διάδοση της ρωγμής, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 16**

$C$  = συντελεστής που προκύπτει με την επέκταση της ευθείας γραμμής στο  $\Delta K = 1$  MPa (m)<sup>1/2</sup>

Η τελική θραύση (1.2.2.3) ελέγχεται κυρίως από την αντοχή σε θραύση ( $K_C$ ) και παράγοντες όπως είναι η μικροδομή και το περιβάλλον. Ο χρόνος που υπόκεινται ένα υλικό σε τάση κατά την τελική θραύση είναι πολύ μικρός σε σύγκριση με το χρόνο έναρξης και διάδοσης της ρωγμής. Αυτό σημαίνει ότι αν ένα υλικό εισέρχεται σε αυτή την περιοχή (της τελικής θραύσης) η θραύση μπορεί να είναι πολύ αυθόρμητη.

Όλες οι παραπάνω εξισώσεις παρουσιάζονται σχηματικά στην **Εικόνα 12** παρακάτω.



**Εικόνα 12:** Διάγραμμα  $da/dN$  vs  $\Delta K$

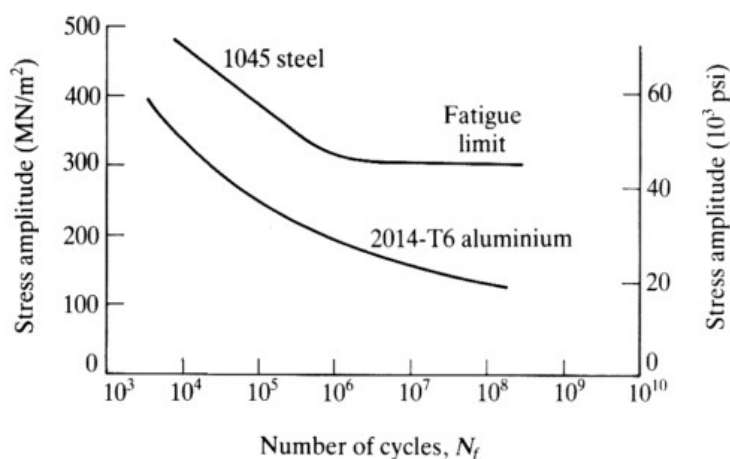
### 1.2.2.3 Τελική Θραύση

Το μήκος της ρωγμής μετά από ένα αριθμό κύκλων είναι αρκετά μεγάλο, ώστε να προκαλέσει την τελική θραύση, στην οποία η υπόλοιπη διατομή δεν μπορεί να υποστηρίξει το εφαρμοζόμενο φορτίο.

Όλκιμη συμπεριφορά προκαλείται από διατμητικές τάσεις, ενώ ψαθυρή συμπεριφορά προκαλείται από εφελκυστικές τάσεις του συστήματος. Εάν εφαρμόζονται υψηλά φορτία (κοντά στην τελική αντοχή σε εφελκυσμό), τότε το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της διάδοσης των ρωγμών σταδίου II σε κόπωση σε χαμηλούς κύκλους. Από την άλλη πλευρά, κόπωση σε υψηλούς κύκλους (εφαρμογή χαμηλότερων τάσεων) συνήθως οδηγεί στη διάδοση των ρωγμών σταδίου I. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όταν το φορτίο είναι υπερβολικά υψηλό, ρωγμές στάδιου I μπορεί να παραληφθούν και να εμφανίζονται μόνο ρωγμές μόνο στάδιο II.

Οι περισσότερες αποτυχίες σε κόπωση αρχίζουν από τοπικές ασυνέχειες, όπου υπάρχει τοπική πλαστικότητα και η διάδοση ρωγμών διέπεται από αυτές τις τοπικές πλαστικότητες στο άκρο της ρωγμής. Αυτός είναι ο λόγος, για τον οποίο πολύ αυξημένη πλαστικότητα οδηγεί σε πολλές αποτυχίες σε κόπωση.

### 1.2.3 Διαγράμματα S-N



**Εικόνα 13:** Τυπικό διάγραμμα S-N (Mechanical metallurgy, George E. Dieter)

Τα διαγράμματα S-N προβλέπουν τον αριθμό των κύκλων που ένα υλικό μπορεί να αντέξει υπό ορισμένη τάση πριν από την αστοχία. Ο y άξονας δείχνει το εύρος της τάσης (σε MPa, psi ή  $\text{MN} / \text{m}^2$ ) και ο x άξονας δείχνει τον αριθμό των κύκλων μέχρι τη θραύση (συνήθως σε λογαριθμική κλίμακα). Οι S-N καμπύλες είναι κατάλληλες για την πλήρως αντιστρέψιμους κύκλους φόρτισης, όπου η μέση τιμή φόρτισης είναι 0 ( $\sigma_m = 0$ )

Για μεσαία και χαμηλά κραματωμένους χάλυβες, όπως ο χάλυβας 1045 στο σχήμα 17, η καμπύλη S-N δείχνει ένα καλά καθορισμένο "γόνατο" στους  $10^6$  κύκλους περίπου. Πέρα από αυτό το σημείο η καμπύλη είναι οριζόντια και ορίζεται το όριο κόπωσης (ή όριο αντοχής), το οποίο (ανάλογα με το υλικό) είναι κοντά στο ήμισυ της αντοχής σε εφελκυσμό. Αυτό το σημείο δείχνει ότι κάτω από μια ορισμένη τάση καμία αποτυχία σε κόπωση δεν θα συμβεί για άπειρο αριθμό κύκλων. Το όριο κόπωσης είναι κοινό μόνο σε λίγα μέταλλα, όπως ο χάλυβας και το τιτάνιο. Υλικά

όπως το αλουμίνιο ή μαγνήσιο δεν έχουν αυτή την ιδιότητα, πράγμα που σημαίνει ότι πρόκειται να αστοχήσουν μετά από ένα ορισμένο αριθμό φορτίων. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι σύνηθες να ορίζεται ένας αριθμός κύκλων λειτουργίας, για παράδειγμα  $10^8$ , πέραν του οποίου υλικά χωρίς όριο θραύσης είναι πιθανόν να αστοχήσουν υπο χαμηλά φορτία.

Η κατασκευή αυτού του τύπου της καμπύλης απαιτεί την δοκιμή σε κόπωση πολλών δειγμάτων σε διαφορετικά φορτία, προκειμένου να καθοριστεί η αντίσταση σε χαμηλού κύκλους (περίπου τα δύο τρίτα η της αντοχής σε εφελκυσμό) και το όριο κόπωσης (αν υπάρχει) σε χαμηλότερες τάσεις.

Ορισμένες έρευνες όμως, προσπαθούν να αποποιηθούν την ύπαρξη ενός πραγματικού ορίου κόπωσης σε πολύ υψηλές τιμές κύκλων κόπωσης - VHCF (Very High Cycle Fatigue) (B Pyttel et. al, 2003). Αυτή η έρευνα καταλήγει λέγοντας ότι το όριο κόπωσης είναι μια καλή εκτίμηση για υψηλούς κύκλους (περίπου  $10^9$ - $10^{10}$  κύκλοι), αλλά το όριο κόπωσης δεν μπορεί να είναι μια γενική ιδιότητα του υλικού. Το όριο κόπωσης θα έπρεπε ιδανικά να μην χρησιμοποιείται και να αντικατασταθεί προτιμότερα με αντοχή σε κόπωση σε καθορισμένο αριθμό κύκλων. Έχει εδραιωθεί ως γενικός κανόνας ότι τα μέταλλα (κυρίως χάλυβας και τιτάνιο) δείχνουν μια οριζόντια γραμμή στο διάγραμμα S-N, όπως περιγράφεται παραπάνω. Μέταλλα, που κρυσταλλώνονται μόνο στην χωροκεντρωμένη κυβική δομή δεν παρουσιάζουν όριο αντοχής. Μεταξύ της περιοχής HCF και της περιοχής VHCF παρατηρείται μια αλλαγή στο μηχανισμό αποτυχίας, κυρίως λόγω της αλλαγής της θέσης έναρξης ρωγμών κάτω από την επιφάνεια (υποεπιφάνεια). Οι αποτυχίες στην υποεπιφάνεια συχνά εντοπίζονται λόγω μικροσκοπικών ατελειών όπως ασήμαντα εγκλείσματα ή πόροι. Αυτές οι αποτυχίες στην περιοχή VHCF συμβαίνουν χωρίς καμία προειδοποίηση και δεν μπορούν να εντοπιστούν σε ανομοιογένειες της μικροδομής.

Ένα " όριο κόπωσης " δεν υπάρχει όταν ένα υλικό υπόκειται σε περιβάλλοντα έντονων τριβών (π.χ αρθρώσεις ή συνένωση κατασκευών), διαβρωτικά περιβάλλοντα και ακραίες θερμοκρασίες. Ακόμη και σε πολύ σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες χαμηλές συχνότητες της εφαρμοζόμενης τάσης και λεπτή επιφανειακή επεξεργασία μειώνουν το όριο κόπωσης πλησιάζοντας σε πολύ υψηλούς κύκλους ( $N > 10^9$  κύκλους). Στην έρευνα αυτή η μείωση της αντοχής σε κόπωση ανά δεκαετία καθορίστηκε, η οποία ανάλογα με το χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε ήταν περίπου 5%, αν δεν είναι παρούσες υψηλές παραμένουσες τάσεις εφελκυσμού. Κράματα συγκολλημένων χαλύβων παρουσιάζουν για τις ίδιες παραμέτρους μείωση 10%. (C.M. Sonsino, 2007)

Έχει περιγραφεί ακόμα η μείωση της αντοχής σε κόπωση σε πολύ υψηλό αριθμό κύκλων όσον αφορά την συνιστώσα του σχεδιασμού και την ασφάλεια. Ο Sonsino κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ένα πραγματικό όριο κόπωσης μπορεί να επιτευχθεί μόνο σε περίπτωση απουσίας της ανομοιογένειας στην μικροδομή ή όταν δεν υπάρχει παρεμβολή ενός διαβρωτικού μέσου. Ωστόσο, τέτοιες συνθήκες είναι δύσκολα εφικτές στην πράξη. (C.M. Sonsino, 2006)



Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν τη ζωή σε κόπωση είναι:

-Τύπος Φόρτωσης, για παράδειγμα καμπτική, αξονική, πολυαξονική ή στρεπτική

-Παρουσία, μέγεθος και τρόπος σχηματισμού μιας εγκοπής, η οποία μειώνει τη διάρκεια ζωής κόπωσης.

-Διαβρωτικά περιβάλλοντα

Καθορισμός σημαντικών τιμών:

$S_{ut}$  = απόλυτη αντοχή εφελκυσμού

$S_a = \sigma_a$  = εναλλασσόμενη καταπόνηση ( $(\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) / 2)$ )

$\sigma_m$  = μέση τιμή (μέσος όρος) κόπωσης ( $(\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min}) / 2)$ )

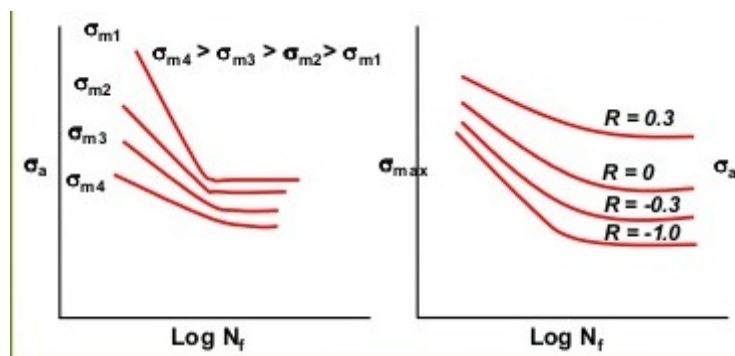
$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$  όπου

$\sigma_{max}$  = η μέγιστη τάση σε ένα κύκλο φόρτισης

$\sigma_{min}$  = η ελάχιστη τάση σε ένα κύκλο φόρτισης

$R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$

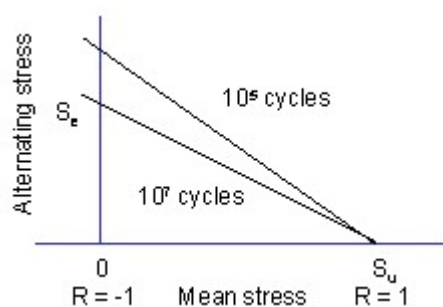
$R = -1$  αντιπροσωπεύει την περίπτωση εντελώς αντιστρέψιμης κόπωσης.



**Εικόνα 14:** S-N διαγράμματα για διάφορες τιμές μέσης τιμής κόπωσης και R. (G. E. Dieter, Mechanical Metallurgy)

Στην **Εικόνα 14** δίνονται δύο διαφορετικά S-N διαγράμματα για διαφορετικές τιμές R και  $\sigma_m$ . Με την αύξηση του R αυξάνεται αντίστοιχα και το όριο κόπωσης, καθώς και οι ιδιότητες κόπωσης σε χαμηλούς κύκλους. Με την αύξηση του  $\sigma_m$  η επιτρεπόμενη εναλλασσόμενη καταπόνηση μειώνεται.

### 1.2.4 Διαγράμματα Goodman



**Εικόνα 15:** Διαγράμμα Goodman

Όταν η μέση τιμή κόπωσης ( $\sigma_m$ ) δεν είναι μηδέν, τότε είναι σημαντικό να διαμορφώνεται το S-N διαγράμμα ενός υλικού ανάλογα με R. Ένα τυπικό διάγραμμα Goodman φαίνεται στο Σχήμα 19 παραπάνω. Ο λόγος R ή η μέση τιμή κόπωσης ( $\sigma_m$ ) και όχι ο αριθμός των κύκλων (N) τοποθετούνται στον x άξονα και η εναλλασσόμενη καταπόνηση τοποθετείται στο y άξονα.

" Η εντατική μέση τιμή μειώσει τη διάρκεια ζωής σε κόπωση, σε αντίθεση με συνθήκες πλήρως αντισκρεπτής φίρτισης. Το διάγραμμα Goodman, το οποίο προτάθηκε αρχικά το 1890, είναι μια γραφική αναπαράσταση του αποτελέσματος αυτού. " (2008-2016 eFatigue LLC)

X (μέση τάση) = 0 και y (εναλλασσόμενη καταπόνηση) = μέγιστη αντιστοιχεί στο όριο κόπωσης. Y = 0 και x = μέγιστη = Sut αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση. Μια ευθεία που συνδέει τα δύο αυτά σημεία δίνει τη γραμμή Goodman. Μια παραβολή με βάση την γραμμή Goodman προτάθηκε από τον Gerber και είναι πιο κατάλληλη για όλκιμο μέταλλα.

Η γραμμή Modified Goodman ακολουθεί την γραμμή Goodman μέχρι τη γραμμή που ορίζεται από το όριο διαρροής (yield line) και στη συνέχεια καταλήγει στο σημείο διαρροής.

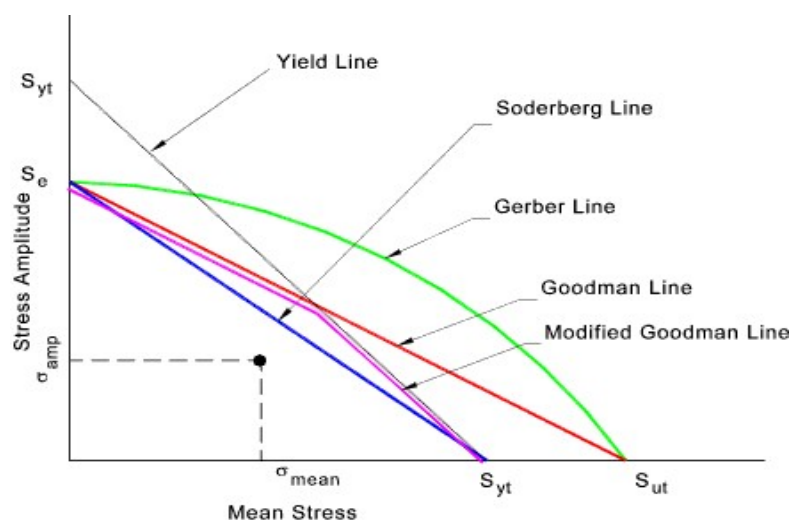
Οι ακόλουθες εξισώσεις αντιπροσωπεύουν τις επιδράσεις των τάσεων των γραμμών Modified Goodman και Gerber

$$\text{Modified Goodman } \sigma_a / S_f + \sigma_m / S_u = 1$$

$$\text{Gerber } \sigma_a / S_f + (\sigma_m / S_u)^2 = 1$$

Μια γραμμή που χρησιμοποιείται για περιπτώσεις που αποζητούνται τα ασφαλέστερα κριτήρια είναι η γραμμή Soderberg. Ενώ στην γραμμή Goodman η αντοχή του υλικού αξιολογείται σύμφωνα με την αντοχή στον εφελκυσμό, η γραμμή Soderberg αξιολογεί την αντοχή του υλικού σύμφωνα με το σημείο διαρροής.

Οι γραμμές που συζητήθηκαν παραπάνω παριστάνονται σχηματικά στην **Εικόνα 16** παρακάτω



**Εικόνα 16 :** Εναλλασσόμενη καταπόνηση vs μέση τιμή κόπωσης

Αυτές οι σύνηθες χρησιμοποιούμενες εξισώσεις προσδιορίζουν την επίδραση της αύξησης των μέσων τιμών αντοχής, οδηγώντας στη διάδοση των ρωγμών και μείωση της αντοχής του υλικού. Η γραμμή Goodman παρουσιάζει την αλληλεπίδραση της μέσης και εναλλασσόμενης καταπόνησης για ένα δεδομένο αριθμό κύκλων. Δείχνει πολύ απλά πόσο ασθενέστερο είναι κάθε υλικό σε εναλλασσόμενες τάσεις σε αυξανόσα μέση τάση.

### 1.2.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την έναρξη της ρωγμής

Πολλές κατασκευές επικεντρώνονται στο όριο κόπωσης, προκειμένου να σχεδιαστεί αυτή με ασφάλεια. Ο σχηματισμός μικρών ρωγμών όμως, ανεξάρτητα από την ορθή κατασκευή, είναι ένα πολύ συχνό φαινόμενο, οπότε προσεγγιστικές έννοιες με βάση την μηχανική της θραύσης μπορούν να ληφθούν υπόψη.

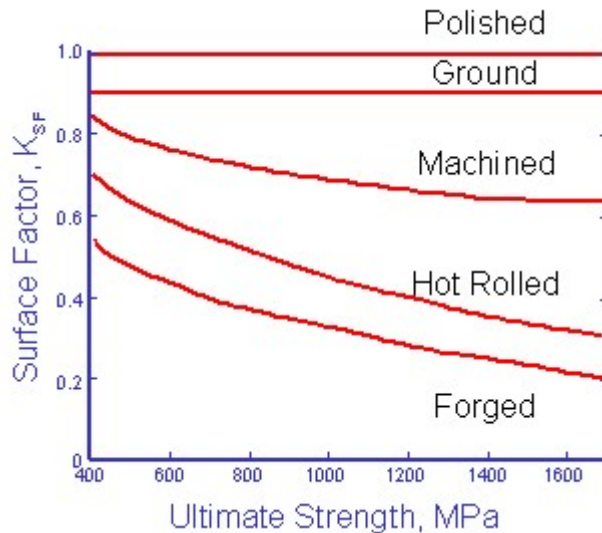
Οι πιο κοινί παράγοντες που επηρεάζουν την εμφάνιση μιας ρωγμής είναι:

- Μικροδομικά εμπόδια

Μικροδομικά εμπόδια όπως όρια των κόκκων ή περλιτικές ζώνες δεν μπορούν να διευκολύνουν την ανάπτυξη μιας ρωγμής. Ως εκ τούτου, η εκλέπτυνση των κόκκων είναι ικανή να αυξήσει την αντοχή σε κόπωση του υλικού με την εισαγωγή μιας ποσότητας μικροδομικών εμπόδια, δηλαδή όρια των κόκκων, τα οποία πρέπει να ξεπεραστούν στο στάδιο I. Μηχανικές επιφανειακές επεξεργασίες όπως shot peening και surface rolling συμβάλλουν στην αύξηση του αριθμού των εμποδίων μικροδομής ανά μονάδα μήκους λόγω της παραμόρφωσης των κόκκων.

- Σκληρότητα επιφάνειας

Η τραχύτητα λειτουργεί ως συγκέντρωση τάσεων, αυξάνοντας την έναρξη ρωγμής για μη-στιλβωμένες επιφάνειες. Η τραχύτητα της επιφάνειας εκφράζεται από τον δείκτη  $K_{sf}$  (Surface Factor). Όσο υψηλότερος είναι ο  $K_{sf}$ , τόσο ανώτερη η επιφάνεια του υλικού, οπότε ικανοποιητικά στιλβωμένες επιφάνειες προσδίδουν καλύτερες τιμές σε δοκιμές κόπωσης. Η σύγκριση μεταξύ των διαφόρων επιφανειών παρουσιάζεται στην **Εικόνα 17** που ακολουθεί.



**Εικόνα 17** : Σύγκριση διαφόρων επιφανειών

-Μέγεθος κατασκευής

Πολλές έρευνες έχουν επίσης δείξει ότι η απόδοση σε δοκιμές κόπωσης σχετίζεται με το μέγεθος των δειγμάτων. Σε γενικές γραμμές, όσο μεγαλύτερο είναι το υλικό, τόσο περισσότερες είναι οι αρχικές ατέλειες εντός αυτού και η χειρότερη απόδοση σε κόπωση είναι πολύ πιθανή.

- Εγκλείσματα

Υλικά που περιέχουν εγκλείσματα είναι σε θέση να σχηματίσουν ρωγμές κόπωσης μέσα στα εγκλείσματα αυτά, παρακάμπτοντας έτσι την διαδικασία ολίσθησης που συμβαίνει κατά την έναρξη της διαδικασίας (ρωγμής). [ref]

Στην πραγματική ζωή, η προετοιμασία των δειγμάτων κόπωσης έχει τεράστιο ρόλο στα αποτελέσματα που προκύπτουν. Η λείανση και η στίλβωση είναι πολύ σημαντικές. Αν και οι δύο δεν γίνουν σωστά τότε αναξιόπιστα αποτελέσματα μπορεί να προκύψουν, ανεξάρτητα από τη θερμική επεξεργασία που έχουν υποστεί τα δείγματα.

### 1.2.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τη ζωή σε κόπωση

-Θερμοκρασία

- Θερμοκρασίες χαμηλότερες από την θερμοκρασία δωματίου

Οι αναρτήσεις συχνά λειτουργούν σε θερμοκρασίες κάτω από  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , κοινές για τις βόρειες χώρες. Άλλες εφαρμογές, συνήθως στην αεροπορική ή διαστημική βιομηχανία, απαιτούν τη λειτουργία υπό τους  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Είναι πολύ σημαντικό οπότε να δοκιμάζονται αυτές οι πραγματικές παράμετροι στις δοκιμές κόπωσης.

Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, παρατηρείται μία αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό και μείωση στην ολκιμότητα ενός υλικού. Έτσι, χαμηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να είναι ευεργετικές για την κόπωση σε υψηλούς κύκλους, αναβάλλοντας την διάδοσης ρωγμών, και συγχρόνως επιζήμιες για κόπωση σε χαμηλούς κύκλους, ενισχύοντας την έναρξη της ρωγμής. Επίσης, όταν η θερμοκρασία μειώνεται τα υλικά με εγκοπές είναι πιο επιρρεπή σε ψαθυρή θραύση.

Έχει ακόμα αναφερθεί η απότομη εύθραυστη συμπεριφορά ενός χάλυβα κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία. Κατά το σχεδιασμό ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι να μειωθεί αυτή η κρίσιμη θερμοκρασία όσο γίνεται περισσότερο, προκειμένου να αποφευχθεί αυτή η ανεπιθύμητη κατάσταση.

- Θερμοκρασίες υψηλότερες από την θερμοκρασία δωματίου

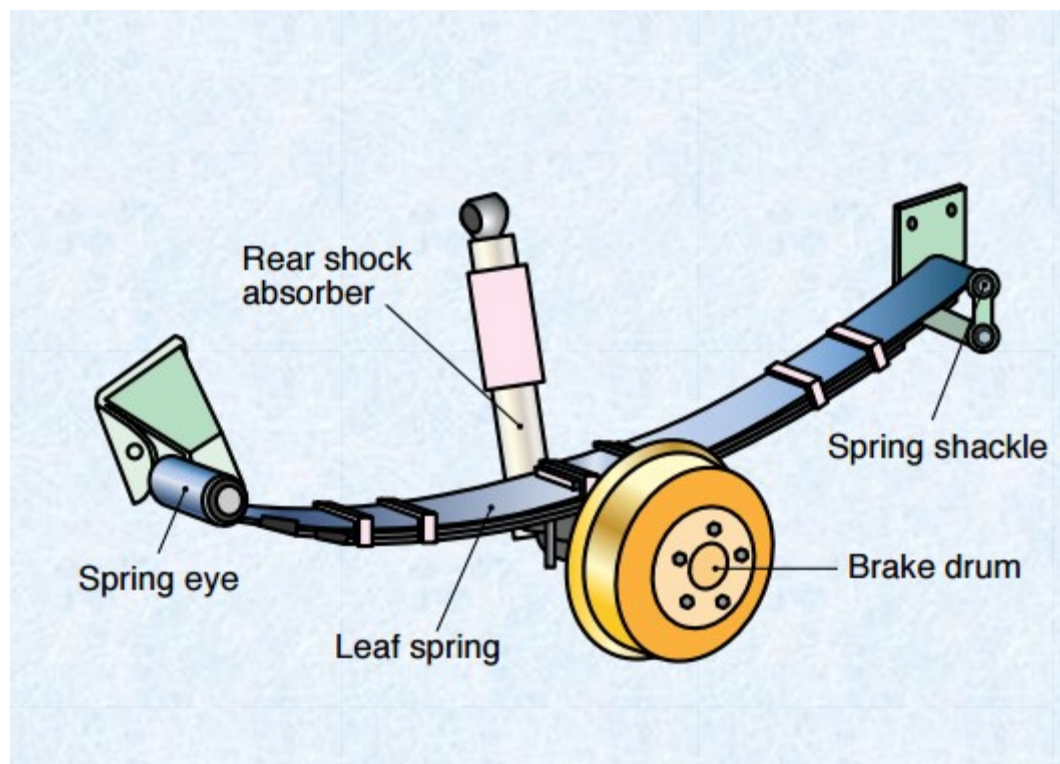
Οι αναρτήσεις λειτουργούν επίσης συχνά σε θερμοκρασίες που αγγίζουν τους  $50^{\circ}\text{C}$ . Τέτοια επίπεδα θερμοκρασίας δεν είναι επικίνδυνα για την δημιουργία απρόσμενων ρωγμών κόπωσης αν δεν υπόκεινται σε ένα διάβρωτικό περιβάλλον. Το διαβρωτικό περιβάλλον όμως μπορεί να έχει καθοριστικό ρόλο σε κατασκευές (όπως τουρμπίνες αεροπλάνου) που λειτουργούν σε θερμοκρασίες κοντά στο μισό του σημείου τήξης τους. Η οξείδωση μπορεί εύκολα να συμβεί, ακόμη και αν ένα προστατευτικό φιλμ είναι παρών, στα όρια των κόκκων λόγω της τοπικής πλαστικότητας.

Το φαινόμενο της εναλλαγής των υψηλών θερμοκρασιών, περιβάλλον στο οποίο μπορεί να λειτουργεί ένα υλικό, ονομάζεται «θερμική καταπόνηση» και η αστοχία κάτω από αυτές τις συνθήκες μπορεί να λάβει χώρα. Ένα παρόμοιου είδους αστοχία ονομάζεται «θερμομηχανική κόπωση», στην οποία εναλλασσόμενες θερμοκρασίες σε συνδυασμό με εναλλασσόμενες καταπονήσεις ή επιμηκύνσεις λαμβάνουν χώρα.

Η μείωση της ζωής κόπωσης λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του υλικού κάτω από υψηλές συχνότητες συζητήθηκε, επίσης, προηγουμένως.

### 1.3 «Σούστες»

#### 1.3.1 Βασικές αρχές και διάταξη των επιμήκων ελατηρίων («σούστες φύλλων»)



**Εικόνα 18:** Διάταξη των σούστων φύλλων

Οι σούστες φύλλων είναι ένα από τα παλαιότερα συστήματα παθητικής ανάρτησης (η πιο κοινή κατηγορία αναρτήσεων), κάνοντας την πρώτη τους εμφάνιση στη μεσαιωνική περίοδο και εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα. Μία από τις χρήσεις τους είναι η απορρόφηση των ατελειών του δρόμου και η μεγαλύτερη άνεση των επιβατών .

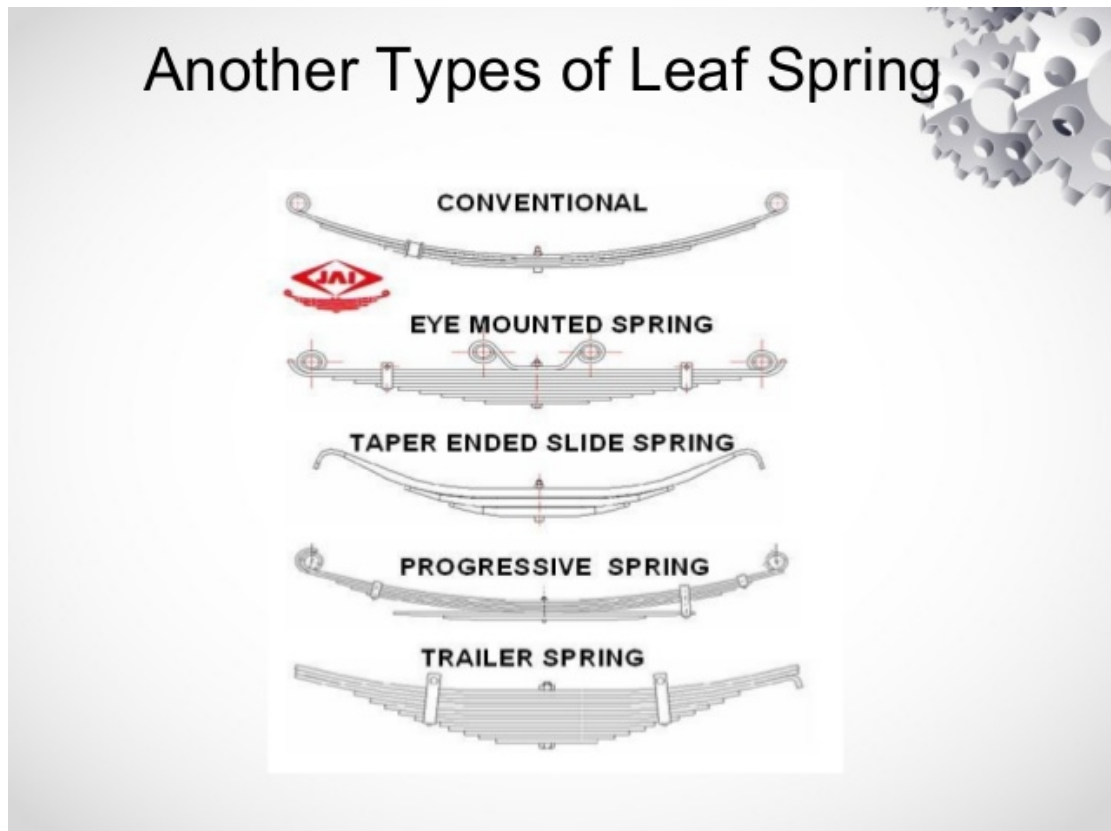
Τα Shock absorbers (absorb=απορροφώ) χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της απελευθέρωσης της κινητικής ενέργειας του ελατηρίου κατά τη λειτουργία.

Τα φύλλα εντοπίζουν τον άξονα και ρυθμίζουν την θέση του οχήματος πάνω σε αυτόν. Εκτός από την παροχή μεγαλύτερης άνεσης είναι υπεύθυνα για την υποστήριξη του βάρους του οχήματος. Είναι πολύ σημαντικό οπότε να κατασκευαστούν σούστες φύλλων με βάση το ακριβές βάρος του οχήματος. Η εκτίμηση του βάρους του οχήματος είναι πιο εύκολο για τα αυτοκίνητα ή γενικά μικρότερα οχήματα που δεν χρειάζεται να υποστηρίξουν συχνά μεγάλα φορτία. Για τα μεγάλα φορτηγά, όπου το φορτίο αυξομειώνεται συνεχώς, περιπλέκεται η κατασκευή των φύλλων, επειδή αυτός ο παράγοντας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κάθε φορά.

Ένα ελατήριο με υψηλή ποιότητα έχει τη δυνατότητα να παραμένει στην ίδια θέση μετά από ένα ή περισσότερα από ένα εκατομμύριο φορτία. Τα ελατήρια χαμηλότερης

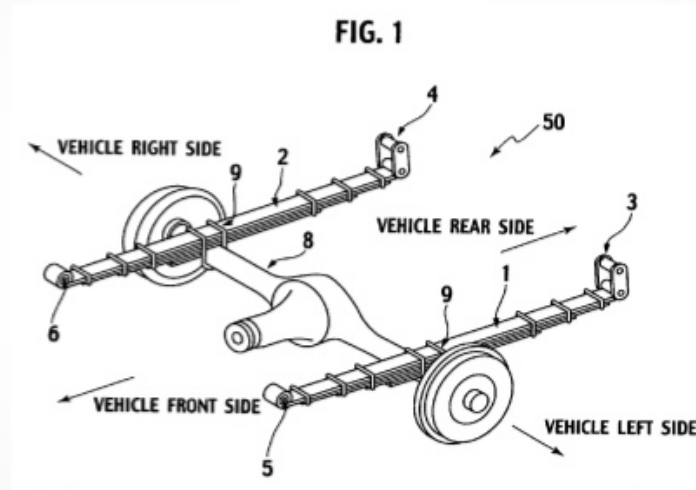
ποιότητας «κάθονται» με την επιβολή κάθε φορτίο, οδηγώντας σε πιο γρήγορες ρωγμές. Τα ελατήρια που μένουν στην ίδια θέση μετά από πολλούς κύκλους έχουν μια χαρακτηριστική «μνήμη».

Σε πολλά ελατήρια φύλλων, τα οποία αποτελούνται από περισσότερα από ένα φύλλο, χρησιμοποιούταν πετρέλαιο προκειμένου να μειωθεί η τριβή μεταξύ των φύλλων. Σήμερα όμως η χρήση ενός κατάλληλου αντι-διάβρωτικού χάλυβα (μερικές φορές ανοξείδωτου χάλυβα) είναι αρκετή για να εξασφαλιστεί μακροζωία.



**Εικόνα 19 :** Είδη σουστών φύλλων (Marwadi Education Foundation, 2014).

## Layout

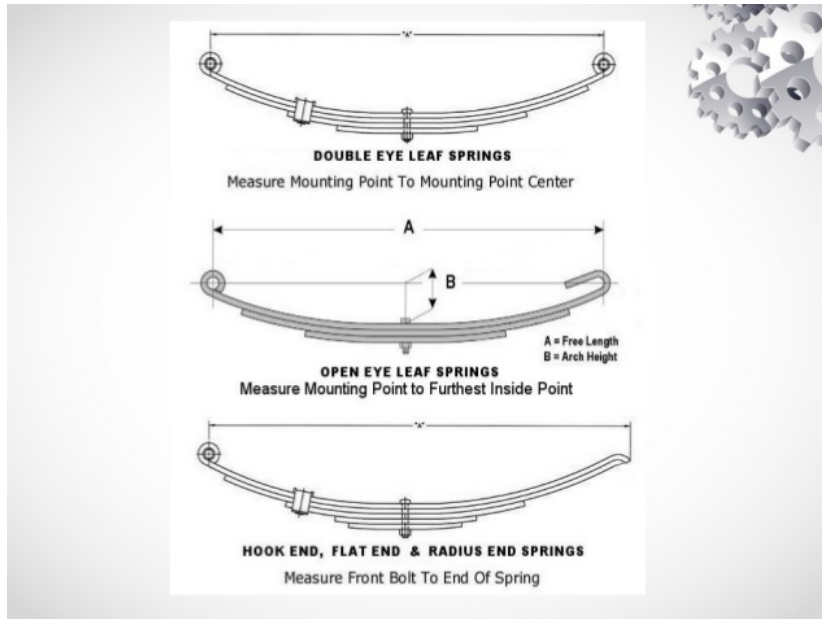


**Εικόνα 20 :** Διάταξη των σουστών φύλλων (Wikipedia)

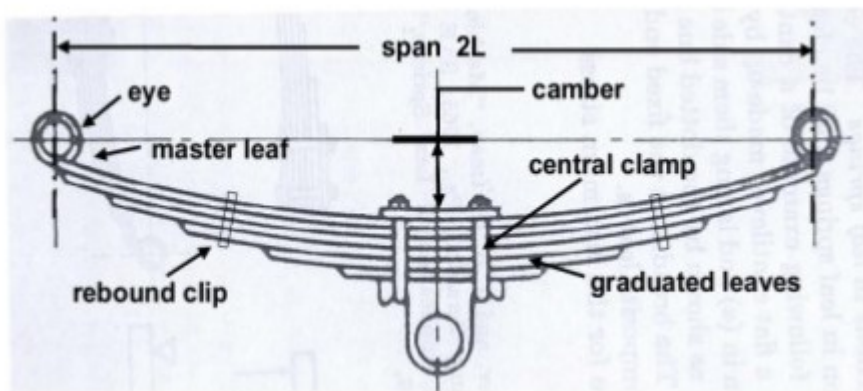
Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη των σουστών φύλλων. Ο άξονας συγκρατείται στη θέση του με τα ελατήρια φύλλων τα οποία ενεργούν σαν μια σύνδεση με τον εκάστοτε άξονα. Άλλοι τύποι ανάρτησης είναι πιο πολύπλοκοι και πιο αδύναμοι επειδή απαιτούν χωριστή σύνδεση.

Το ύψος ενός οχήματος στο οποίο χρησιμοποιούνται ανρτήσεις ελατηρίου μπορεί να μειωθεί έως 5 εκατοστά ενώ 7,6 εκατοστά πτώσης είναι εφικτά εάν χρησιμοποιείται μια διάταξη σουστών φύλλων.





**Εικόνα 21 :** Πιο κοινές σούστες φύλλων που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία (Marwadi Education Foundation, 2014)



**Εικόνα 22 :** Διάταξη ελατηρίου φύλλων με διπλό μάτι. (Marwadi Education Foundation, 2014)

Οι σούστες φύλλων αποτελούνται από ένα ή περισσότερα καμπύλα ελάσματα (φύλλα). Το μεγαλύτερο φύλλο ονομάζεται κύριο φύλλο και τα υπόλοιπα ονομάζονται graduated leaves. Οι παραβολικές σούστες φύλλων χρησιμοποιούνται κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία.

### 1.3.2 Διαδικασία κατασκευής σουστών φύλλων

Η κατασκευή των σουστών φύλλων μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τη γραμμή παραγωγής και το εργοστάσιο. Μερικά βασικά βήματα, όμως, είναι τα ίδια σε κάθε διαδικασία :

1. Κοπή των ελασμάτων σε διάφορα μήκη

2. Σχηματισμός της κεντρικής οπής
3. Ελαση του ελάσματος σε ένα κωνικό προφίλ. Οι περισσότερες σούστες φύλλων έχουν κωνικό προφίλ.
4. Κύλιση της άκρης του ελατηρίου γύρω από μια μορφή βαφής
5. Αυλάκωση εν θερμώ.
6. Press forming των φύλλων εν θερμώ προκειμένου να δοθεί το παραβολικό τους σχήμα
7. Θερμική κατεργασία προκειμένου να επιτευχθούν υψηλές μηχανικές ιδιότητες.
8. Shot peening ή άλλη επεξεργασία της επιφάνειας
9. Συνένωση των φύλλων σε μια υδραυλική πρέσα.
10. Συναρμολόγηση των ελατηρίων υπό πίεση και τελική συναρμολόγηση στο επιθυμητό σχήμα
11. Τελική χρωματική βαφή.

Αρκετές έρευνες (παράδειγμα: Amol Bhanage , Δρ K Padmanabhan, 2011) έδειξαν ότι τα ελατήρια φύλλων από σύνθετα υλικά (ίνες γυαλιού / εποξειδικά σύνθετα) δείχνουν καλύτερη ζωή σε κόπωση, αντοχή στη διάβρωση, την ακαμψία και παρέχουν μια ανετότερη αίσθηση σε σύγκριση με σούστες φύλλων χάλυβα (SAE1045- 450-QT). Την ίδια στιγμή, η μείωση στο βάρος του ελατηρίου είναι σχεδόν 70%, καθιστώντας τη χρήση του σύνθετου ελατήρια ελασμάτων ιδανικό για σπορ αυτοκίνητα. Ένα παράδειγμα είναι η χρήση τους στην Chevrolet corvette από το 1981. Συμβατικά αυτοκίνητα της εταιρίας Volvo χρησιμοποιούν απο το 2016 τα σύνθετα αυτά φύλλα ως αναρτήσεις. Το μεγάλο πλεονέκτημα όμως στην χρήση χάλυβα είναι το χαμηλότερο το κόστος τους, σε σύγκριση με αυτό των σύνθετων φύλλων. Η χρήση των σύνθετων φύλλων ελατηρίου τότε είναι περιττή σε μεγαλύτερα οχήματα, όπου το συνολικό βάρος δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό με τη χρήση ελατηρίων φύλλου χάλυβα.

### *1.3.3 FEM (Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων)*

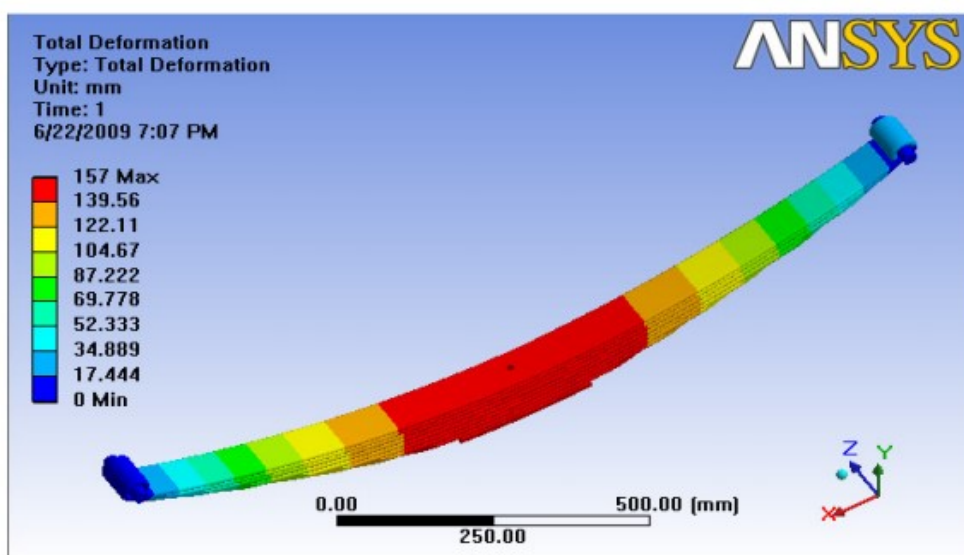
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) είναι μια μέθοδος που χωρίζει ένα μεγάλο πρόβλημα σε μικρότερες εξισώσεις. Στη συνέχεια, επιτυγχάνεται η χρησιμοποίηση μεταβολικών μεθόδων για την λύση στο κύριο πρόβλημα με πολύ μικρή πιθανότητα σφαλμάτων

Η πιο πρακτική έκφραση αυτής της μεθόδου, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μηχανικής, καλείται ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA). Ένα λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων έχει κωδικοποιηθεί με τον αλγόριθμο πεπερασμένων

στοιχείων και εφαρμόζεται ως ένα πρόβλημα που εκφράζεται είτε με PDE (Μερικές Διαφορικές Εξισώσεις) ή ολοκληρωτικές εξισώσεις. Η εφαρμογή τους κυμαίνεται από την πρόβλεψη του καιρού ως την προσομοίωση ενός αυτοκινητιστικού τρακαρίσματος.

Στην κατασκευή των σουστών φύλλων τα πεπερασμένα στοιχεία καθορίζουν την κατανομή των τάσεων κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου λειτουργίας. Οι φυσικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται εδώ είναι οι τάσεις von Mises και παραμόρφωσης. Παράμετροι όπως ο τύπος του ελατηρίου, η θέση του ‘ματιού’ ή η θέση της ανάρτησης στο όχημα έχουν ένα σημαντικό ρόλο στην μακροβιότητα του ελατηρίου. Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι μια γρήγορη και μη καταστρεπτική μέθοδος για την πρόβλεψη τυχόν βλαβών που μπορεί να προκύψουν κατά τη λειτουργία λόγω της συσσώρευσης των τάσεων στο σύστημα ανάρτησης.

Ένα λογισμικό που χρησιμοποιείται συνήθως για εφαρμογές πεπερασμένων στοιχείων είναι το ANSYS. Η τυπική παρουσίαση του φύλλου ελατηρίων κάτω από πλήρη παραμόρφωση με τη χρήση του ANSYS δείχνεται παρακάτω.



**Εικόνα 23 :** Κατανομή των τάσεων σε φύλλα ελατηρίων χρησιμοποιώντας το Ansys.

#### 1.4 Shot peening

Οι παραμένουσες τάσεις είναι πολύ μεγάλης σημασίας στη ζωή κόπωσης των υλικών. Η απουσία εφελκυστικών τάσεων και η ύπαρξη συνθλιπτικών τάσεων είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για βελτιωμένες ιδιότητες σε κόπωση. Για να έχουμε παραμένουσες τάσεις το υλικό πρέπει να μεταχειριστεί με διάφορους τρόπους, με την πιο κοινή μέθοδος για την επίτευξη εναπομένουσων τάσεων σε ένα φύλλο ελατηρίων να ονομάζεται shot peening. Θερμικές και μεταλλοτεχνικές εφαρμογές ή surface rolling χρησιμοποιούνται επίσης για την αύξηση των παραμένουσων τάσεων ενός υλικού, ανάλογα με τις διάφορες εφαρμογές.

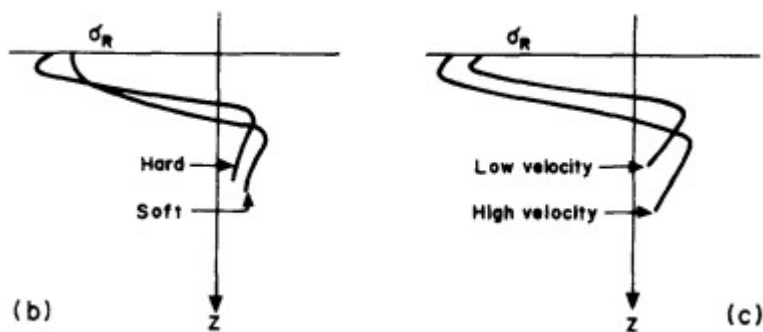
Η ύπαρξη παραμένουσων τάσεων είναι ως επί το πλείστον επωφελής σε χάλυβες υψηλής αντοχής ή σε δείγματα με εγκοπές (η επίδραση της εγκοπή μετά από shot peening μειώνεται σημαντικά).

Η πλαστική παραμόρφωση που προκαλεί η σφαιροβολή είναι ευεγερτική για σκληρά και μαλακά υλικά. Η υποεπιφάνεια των σκληρών υλικών μετά από shot peening είναι μαλακότερη από την επιφάνεια, η οποία έχει δεχθεί τα σφαιρίδια. Ακόμα, τα μαλακά υλικά που έχουν δεχθεί σφαιροβολή παρουσιάζουν ομοιογένεια, η οποία λειτουργεί κατασταλτικά στην δημιουργία ρωγμών όταν στο υλικό επιβάλλονται κυκλικές φορτίσεις. (R.K. Pandey, M. N. Deshmukh, 2001)

Κατά την εφαρμογή του shot peening η κινητική ενέργεια ( $K = \frac{1}{2} * m * v^2$ ) των σφαιριδίων προκαλεί το βάθος και την τελική κάλυψη (coverage) των παραμένουσων τάσεων.

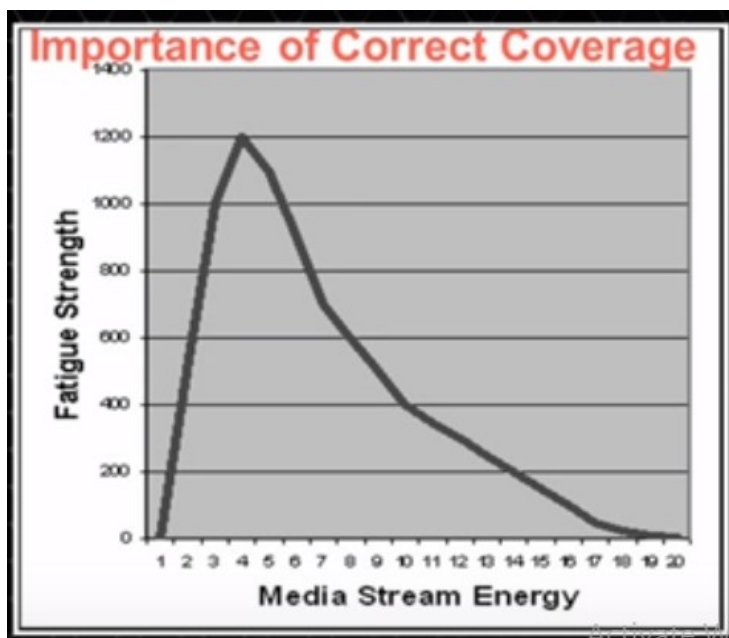
Ανάλογα με το υλικό στο οποίο εφαρμόζεται το shot peening λαμάνονται οι αντίστοιχες παράμετροι. Για τα σφαιρίδια προς κρούση κατ' αρχάς, πρωταρχικό ρόλο έχουν το μέγεθός τους, η σκληρότητά τους καθώς και η ταχύτητα και η γωνία με την οποία προσπίπτουν στο υλικό. Αν οι θλιπτικές τάσεις που εισέρχονται στην επιφάνεια του υλικού εισχωρήσουν βαθύτερα απ' όσο πρέπει προκαλείται αύξηση στο μέγεθος των περιοχών με εφελκυστικές τάσεις, με αποτέλεσμα την μείωση στην αντοχή του υλικού. Στην παρακάτω **Εικόνα 24** φαίνεται το πως επιδρούν τα σφαιρίδια την επιφάνεια και υποεπιφάνεια ενός υλικού. Σε ένα πιο μαλακό υλικό οι θλιπτικές τάσεις που δημιουργούνται από τα σφαιρίδια εισχωρούν στην περιοχή των εφελκυστικών τάσεων του υλικού. Το ίδιο μπορεί να συμβεί αν η ταχύτητα των σφαιριδίων είναι πολύ μεγάλη.

(Y.F. Al-Obaid, 1994)



**Εικόνα 24** : Τυπική κατανομή παραμένουσων τάσεων ( $\sigma_R$ ). (Y.F. Al-Obaid, 1994)

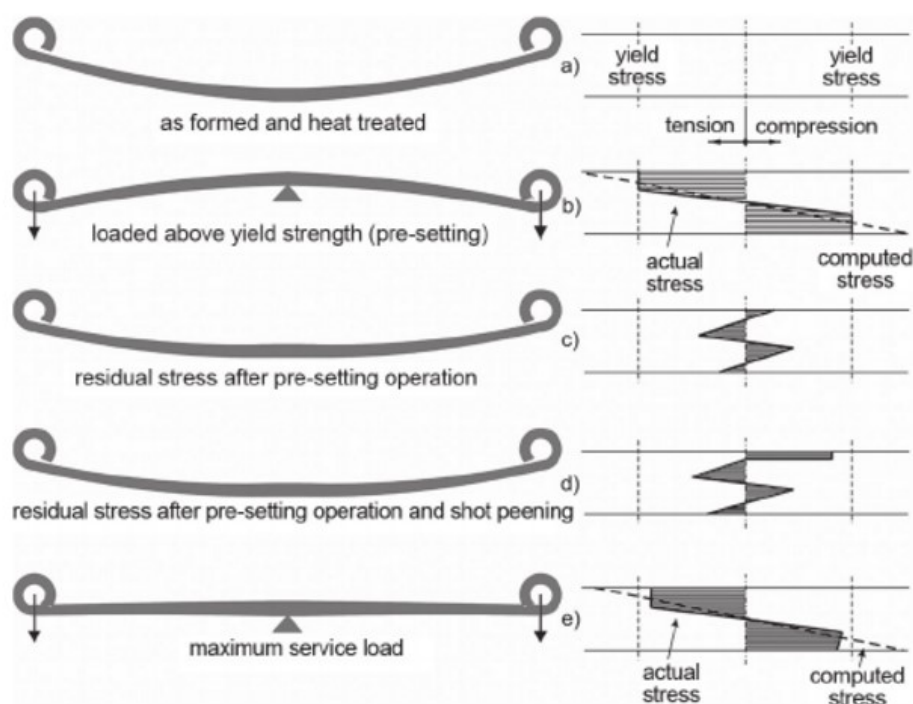
Σημαντικό ρόλο έχει η τελική κάλυψη (coverage) του υλικού προς εφαρμογή. Συνήθως μετριέται σε ποσοστά απο 0-100 %. Ποσοστό 100% ορίζουμε μια περίοδο σφαιροβολής (1T), στην οποία ένα μεγάλο μέρος της επιφάνειας έχει δεχθεί τις θλιπτικές τάσεις μία ή περισσότερες φορές. Σε τελική κάλυψη 200% το 84% της επιφάνειας του υλικού έχει σφαιροβολή 5 ή περισσότερες φορές. Σε τέτοιες περιπτώσεις η σφαιροβολή μπορεί να έχει αρνητικά αποτελέσματα στην ζωή σε κόπωση. Χάλυβας 4340 (1,5% σε νικέλιο) με 300% τελική κάλυψη είχε μειωμένη ζωή σε κόπωση σε αντίθεση με τον ίδιο χάλυβα με 100% τελική κάλυψη. Στην παρακάτω **Εικόνα 25** φαίνεται σχηματικά το αρνητικό αυτό αποτέλεσμα σε κόπωση της πολύ αυξημένης τελικής κάλυψης. Στον άξονα χ έχουμε τον όρο Media Stream Energy, ο οποίος είναι ανάλογος της τελικής κάλυψης (Mega Mechatronics, 2014).



**Εικόνα 25** : Σημασία της τελικής κάλυψης στην ζωή σε κόπωση. (Mega Mechatronics, 2014)

Το shot peening είναι στις μέρες μας μια πολύ διαδεδομένη μέθοδος ως τελικό στάδιο για την παραγωγή σουστών φύλλων. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι απαραίτητη

προκειμένου να επιτευχθεί ένα υψηλής ποιότητας φύλλο. Στην **Εικόνα 26** παρακάτω η εφαρμογή του σε φύλλα ελατηρίων και η κατανομή των παραμενουσών τάσεων, ως αποτέλεσμα, φαίνεται σχηματικά.



**Εικόνα 26:** Προφίλ των παραμενουσών τάσεων μετά απο προένταση και shot peening σε φύλλο ελατηρίων (Mamoru Akeda et al., 2007)

Είναι σύνηθες για φύλλα ελατηρίων να υποβληθούν σε προένταση σε περιβάλλον δωματίου με αντίστροφη κάμψη. Το ελατήριο δέχεται τάση πάνω από το όριο ελαστικότητας. Το φορτίο στη συνέχεια απελευθερώνεται και το ελατήριο αυτόματα έρχεται ξανά στη νέα θέση του, η οποία είναι η επιθυμητή για τη συναρμολόγηση. Αυτή η ελαστική ανάκτηση προσδίδει στο υλικό εναπομένουσες τάσεις, οι οποίες θα είναι σε αντίθετη κατεύθυνση (συνθλιπτική) του εφαρμοζόμενου φορτίου. Δεδομένου ότι το εφαρμοζόμενο φορτίο είναι κυρίως σε εφελκυσμό, αυτές οι συμπιεστικές παραμενουσες τάσεις θα προστατεύσουν τα φύλλα από πρόωρη αστοχία σε κόπωση. Το shot peening εφαρμόζεται μετά την προένταση στην άνω επιφάνεια του ελατηρίου.

Μία άλλη μέθοδος, που δεν έχει όμως ελπιδοφόρα αποτελέσματα στις ιδιότητες κόπωσης, είναι η (abrasive) girt blasting μετά από shot peening. Κατά την μέθοδο αυτή αποξεστικά σωματίδια βίαια κατευθύνονται στην επιφάνεια του υλικού, βάζοντας το επιφανειακό στρώμα σε συμπίεση, με σκοπό την προστασία του μετάλλου από διαβρωτικές ρωγμές. Αυτή η μέθοδος είναι επίσης ευρέως διαδεδομένη στα κράματα αλουμινίου. Τα αιχμηρά σωματίδια που αλληλεπιδρούν με την επιφάνεια απομακρύνουν οποιοδήποτε ανεπιθύμητο υλικό, όπως σκουριά.

## Κεφάλαιο 2

### 2.1 Πειραματικά αποτελέσματα του πανεπιστημίου TU Delft

#### 2.1.1 Επαναφερμένα μαρτενσιτικά και μπαινιτικά δοκίμια χωρίς shot peening

Στο πειραματικό μέρος χαλύβδινα δοκίμια τύπου 51CrV4 εξετάστηκαν σε δοκιμές κόπωσης. Οι χάλυβες της πρώτης ομάδας ήταν επαναφερμένοι μαρτενσιτικοί ενώ οι χάλυβες της δεύτερης ομάδας κατώτεροι μπαινιτικοί.

Η θερμική επεξεργασία για τις ράβδους επαναφερμένου μαρτενσίτη (QT) 51CrV4 αποτελείται από 3 λουτρά άλατος:

- 8 λεπτά στους 900°C,
- Βαφή σε τήγμα άλατος στους 170 °C,
- Επαναφορά σε αλάτι στους 480 °C για 60 λεπτά (30 λεπτά για τα CSM).

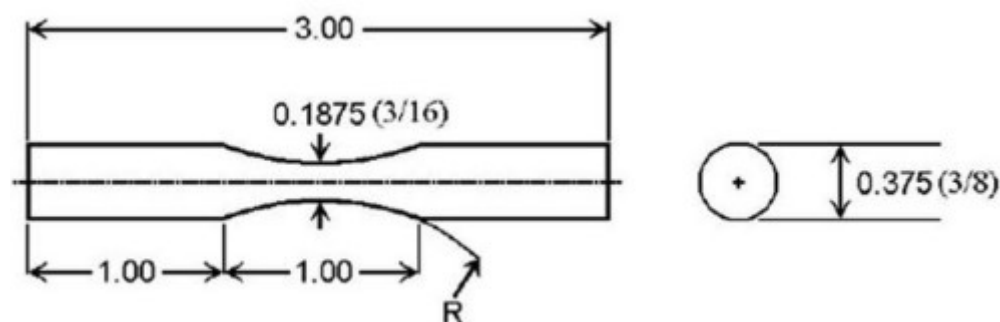
Ακολουθούμενη από την τελική μηχανική κατεργασία, λείανση και στίλβωση.

Η θερμική επεξεργασία για τον μπαινίτη Φ16 51CrV4 αποτελείται από 2 λουτρά άλατος:

- 8 λεπτά στους 900°C,
- 60 λεπτά στους 300 °C.

Ακολουθούμενη από την τελική μηχανική κατεργασία, λείανση και στίλβωση.

Τα δείγματα και των δύο κατηγοριών είχαν υποστεί μηχανουργική διεργασία πριν την θερμική επεξεργασία ώστε να αποκτήσουν τις κατάλληλες διαστάσεις (οι οποίες φαίνονται στην **Εικόνα 27**)

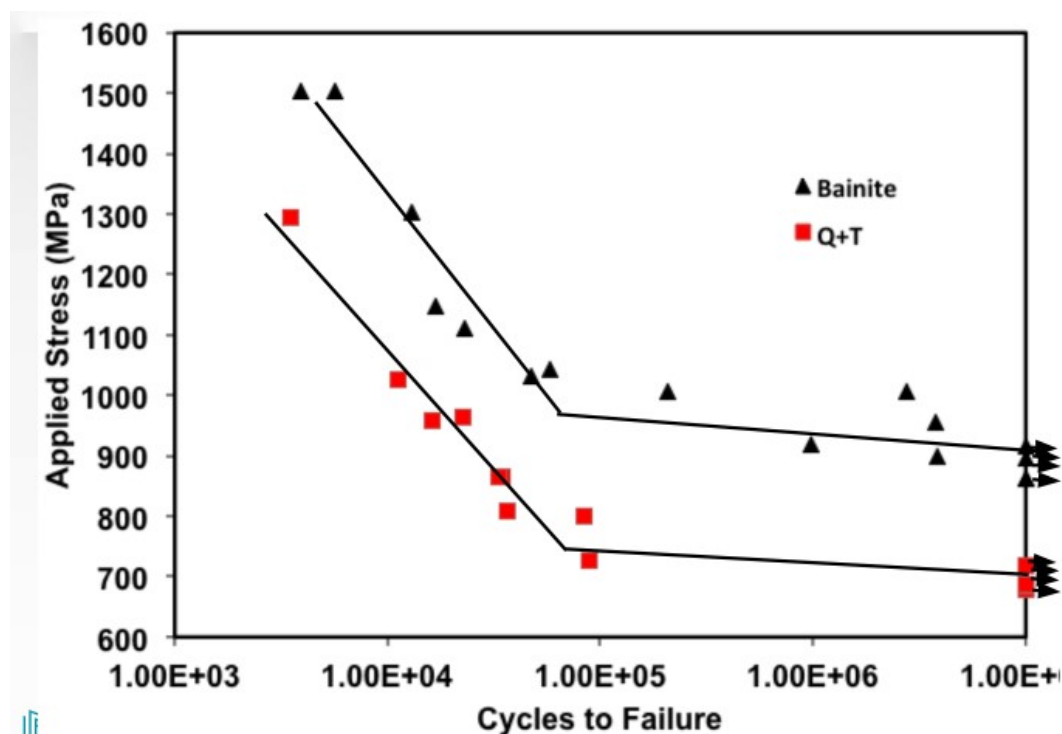


**Εικόνα 27 :** Διαστάσεις δειγμάτων

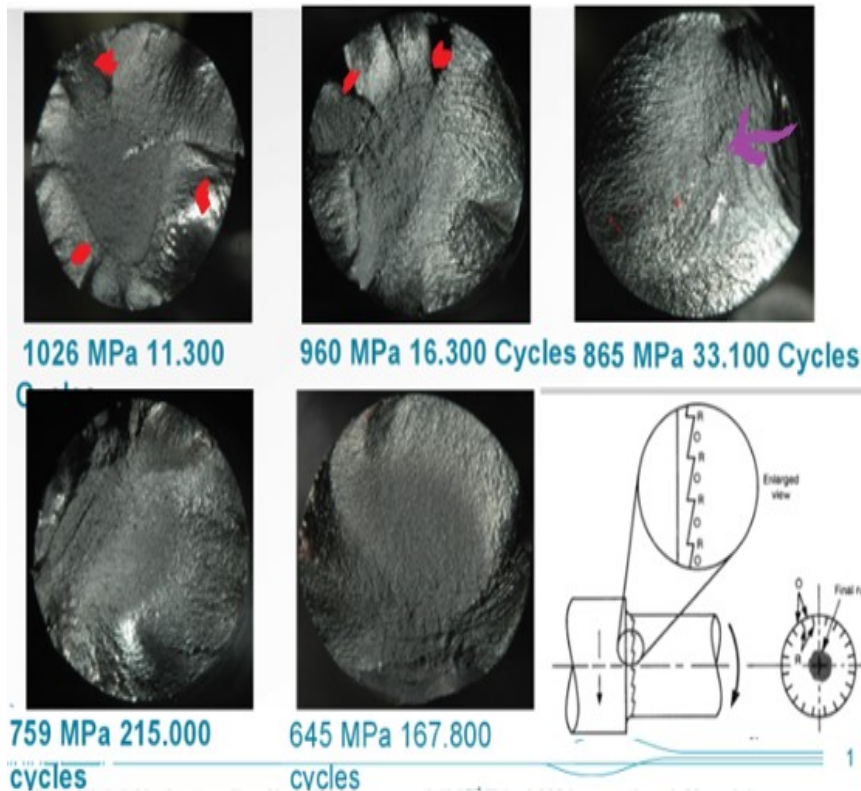
Οι δοκιμές κόπωσης διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας μία μηχανή κόπωσης περιστροφικής κάμψης (Instron). Η καμπύλη S-N για τα δύο διαφορετικά υλικά ελήφθη από την εφαρμογή διαφορετικών φορτίων σε πλήρη αναστρέψιμους κύκλους

( $R = -1$ ,  $\sigma_m = 0$ ). Πλήρως αναστρέψιμοι κύκλοι προσομοιώνουν πραγματικές συνθήκες, όπου εφελκυσμός και κάμψη λαμβάνουν χώρα κατά την λειτουργία των φύλλων ελατηρίων.

Τα αποτελέσματα των αποτελεσμάτων κόπωσης χωρίς shot peening παρουσιάζονται στην **Εικόνα 28**.







**Εικόνα 29 :** Επιφάνειες θραύσης των δειγμάτων QT για διάφορες τάσεις.\

Τα δείγματα QT σε χαμηλούς κύκλους (υψηλή τάση) έδειξαν πολλαπλά σημεία έναρξης ρωγμών, γνωστών και ως ratchet marks (τα οποία φαίνονται ως **εξογκώματα**) (Metal fatigue in engineering , *H.O.Fuchs , R.I.Stephens, N.W Sachs, 2005*).

Ανεξάρτητα από την εφαρμογή υψηλών τάσεων, υψηλοί δείκτες K είναι ένας ακόμη κρίσιμος παράγοντας για τη διαμόρφωση των αστοχιών αυτών. Τα διαφορετικά σημεία έναρξης ενώνονται μεταξύ τους μέχρι την τελική θραύση. Τα ratchet marks είναι μια όλκιμη μορφή αστοχίας και λαμβάνουν χώρα, όπως αναφέρθηκε, σε υψηλότερες τάσεις. Σε χαμηλότερες τάσεις έχουμε την δημιουργία των beach marks τα οποία προκαλούνται από πολλαπλές ραβδώσεις. Σε τάση 865 MPa είναι περισσότερο εμφανή, στην οποία φαίνεται και η **διάδοση της ρωγμής** με βέλος.



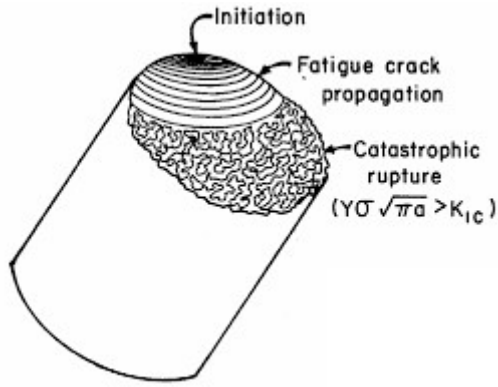
**Εικόνα 30 :** Επιφάνειες θραύσης των δειγμάτων μπαινίτη για διάφορες τάσεις.

Όσον αφορά στα δείγματα μπαινίτη, οι επιφάνειες αστοχίας σε κόπωση έχουν δύο διακριτές περιοχές:

Η μία είναι λεία ως αποτέλεσμα της τριβής του πυθμένα και την κορυφής της ρωγμής, καθώς αυτή αυξάνεται.

Η δεύτερη είναι τραχειά, λόγω της ταχείας αστοχίας του υλικού.

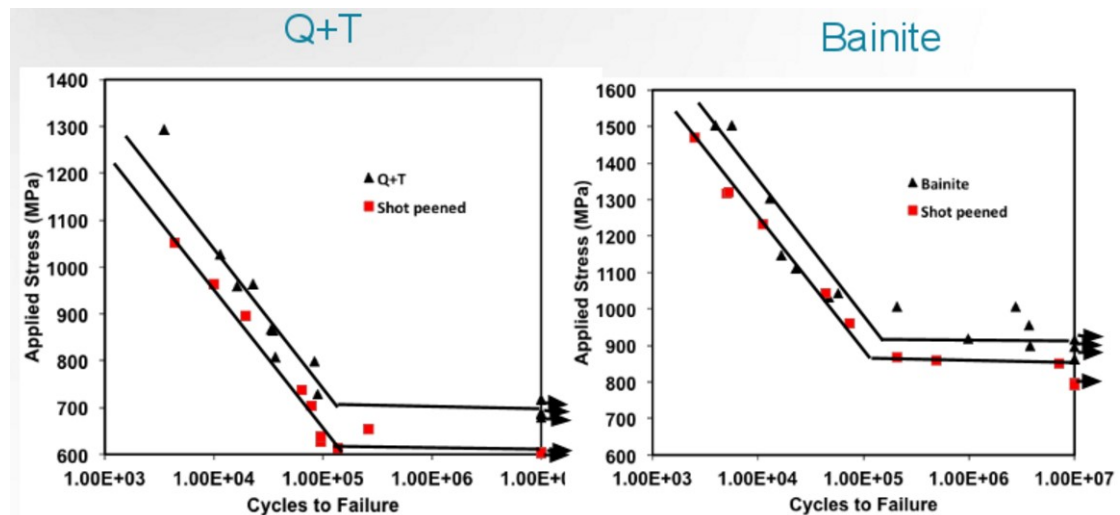
Στην **Εικόνα 30** παρουσιάζεται η τραχειά περιοχή να είναι μεγαλύτερη και η εικόνα της αστοχίας να αντιστοιχεί σε ψαθυρή αστοχία με την αύξηση των κύκλων φόρτισης. Αυτό το είδος της ψαθυρής θραύσης είναι κοινή για όλκιμα υλικά, ως επί το πλείστον σε υψηλούς κύκλους, και δεν υποδεικνύει σφάλματα κατασκευής. Αυτή η εικόνα ψαθυρής θραύσης προκαλείται από τον σεμεντίτη, η οποία είναι η πιο εύθραυστη φάση μέσα στην μικροδομή του μπαινίτη. Παρακάτω παρουσιάζεται μια γραφική απεικόνιση αυτού του είδους της αστοχίας. Η τραχειά περιοχή είναι η περιοχή της αποκόλλησης, ενώ η λεία περιοχή είναι υπεύθυνη για την έναρξη και διάδοση της ρωγμής. Με την αύξηση των κύκλων η περιοχή έναρξης και διάδοσης γίνεται όλο και μικρότερη, οδηγώντας στην αυθόρμητη θραύση του υλικού. (George Totten , 2008)



**Εικόνα 31:** Σχηματική περιγραφή επιφάνειας θραύσης (Muhammad Ali Siddiqui, 2016)

### 2.1.2 Επαναφερμένα μαρτενσιτικά και μπαινιτικά δοκίμια με shot peening

Μια δεύτερη ομάδα δειγμάτων που υπέστη παρόμοια θερμική επεξεργασία, μηχανική κατεργασία και shot peening πριν τις δοκιμές σε κόπωση ελέγχεται με την ίδια περιστρεφόμενη κάμπτική μηχανή. Η καμπύλες S-N που προέκυψαν κατά τη δοκιμή αυτών των δειγμάτων τόσο σε χαμηλές τάσεις (κόπωση σε υψηλούς κύκλους) όσο και σε υψηλές τάσεις (κόπωση σε χαμηλούς κύκλους) δείχνονται στην **Εικόνα 32** παρακάτω.



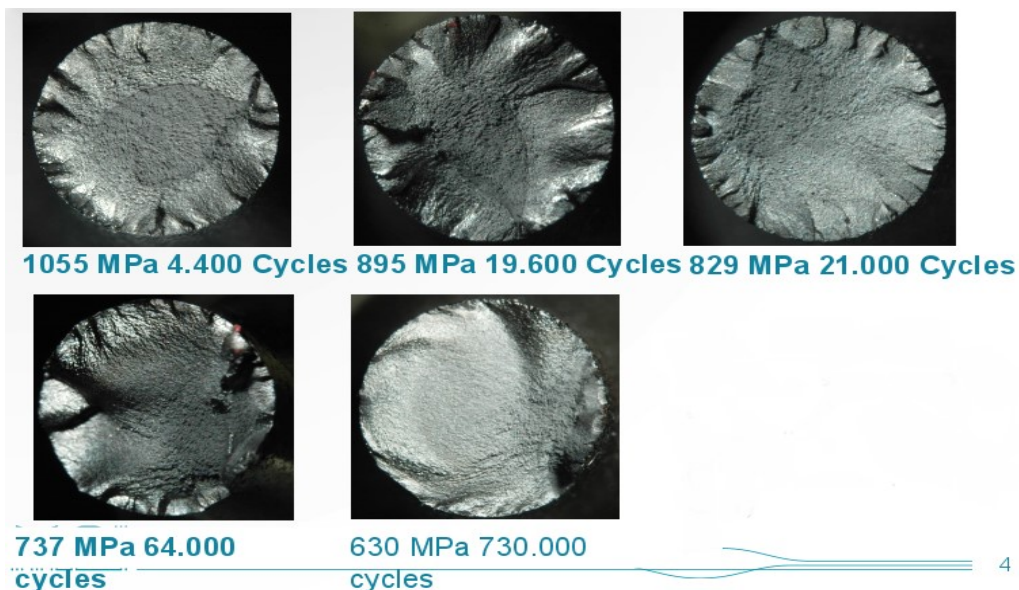
**Εικόνα 32 :** Διαγράμματα S-N για τα δείγματα QT και μπαινίτη με shot peening

Τα αποτελέσματα που σημειώθηκαν δείχνουν παραδόξως μια μείωση στις ιδιότητες κόπωσης των δειγμάτων με shot peened τόσο για την μπαινιτική όσο και για την QT μικροδομή. Το όριο κόπωσης μειώθηκε και για τις δύο μικροδομές κατά περίπου 100MPa σε σύγκριση με τα δείγματα που δεν υπέστησαν shot peened.

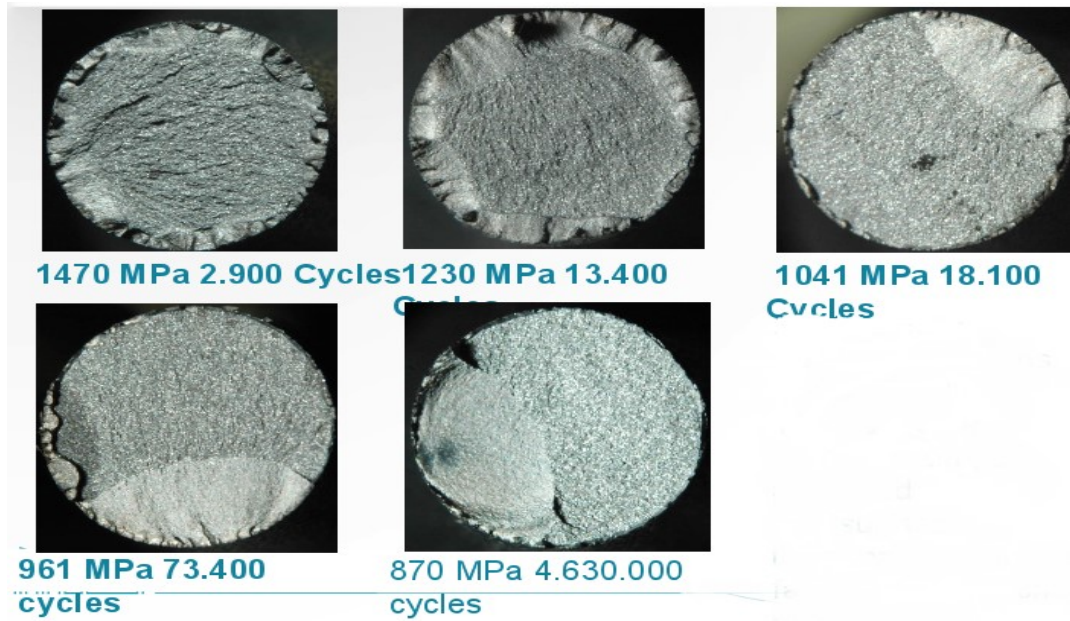
Οι επιφάνειες θραύσης για τα shot peened δείγματα (Εικόνα 33 και 34 για τα QT και μπαινιτικά δείγματα αντίστοιχα) παρακάτω αποκαλύπτουν ότι σε αμφότερες τις περιπτώσεις οι θέσεις έναρξης των ρωγμών βρίσκονται κυρίως στην επιφάνεια των δειγμάτων, δείχνοντας έτσι ότι η κατεργασία της επιφάνειας σε αυτές τις συνθήκες είναι χειρότερη από την στύλβωση που χρησιμοποιήθηκε ως τελική επιφανειακή κατεργασία στα δείγματα χωρίς shot peening.

Μια πρόσφατη έρευνα (H.-G. Lambers et.al, 2010) αποκαλύπτει ότι παραμένουσες τάσεις (που προκαλούνται από shot peening) επηρεάζουν αρνητικά τα δείγματα με ήδη αυξημένο συντελεστή K (εκφρασμένος σε  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ). Οι παραμένουσες τάσεις σε αυτή την περίπτωση ενεργούν αρνητικά στην συμπεριφορά της ανάπτυξης της ρωγμής, επειδή κυριαρχείται από τα αυξημένα εφαρμοζόμενα εξωτερικά φορτία.

Εφόσον τα δείγματα υπέστησαν κατάλληλη θερμική επεξεργασία και επιφανειακή κατεργασία (στύλβωση), καθώς και ικανοποιητικές ιδιότητες κόπωσης και φυσιολογικές επιφάνειες θραύσης, συνάγεται ότι δεν υπήρξε σε κανένα από τα δείγματα υψηλός συντελεστής K. Το μοναδικό λοιπόν συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει είναι ότι η μέθοδος shot peening που χρησιμοποιήθηκε στην δεύτερη ομάδα δειγμάτων ήταν αμφιβόλου ποιότητας. Όπως αναπτύχθηκε στην ενότητα 1.4, παράγοντες που έχουν να κάνουν με τον τρόπο εφαρμογής του shot peening, καθώς και η ταχύτητα, σκληρότητα ή είδος των σφαιρών που χρησιμοποιήθηκαν οδηγούν σε αυτό το αποτέλεσμα.



**Εικόνα 33 :** Επιφάνειες θραύσης των δειγμάτων QT με shot peening για διάφορες τάσεις



**Εικόνα 34 :** Επιφάνειες θραύσης των δειγμάτων μπαινίτη με shot peening για διάφορες τάσεις

Στις παραπάνω επιφάνειες παρατηρείται έναρξη των ρωγμών στην υποεπιφάνεια σε ένα μοναδικό σημείο καθώς συγκλίνουμε προς το όριο κόπωσης.

## Κεφάλαιο 3

### 3.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Σε αυτό το μέρος μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των ερευνών, που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην κατανόηση των ιδιοτήτων κόπωσης σε χάλυβες παρόμοιων με αυτών που εξετάστηκαν παρουσιάζεται. Παρέχεται επίσης μια σύνοψη των ήδη δημοσιευμένων ερευνών για σύγκριση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν στο Κεφάλαιο 2.

Πολλές από τις έρευνες επικεντρώνονται στη σύγκριση των επαναφερμένων μαρτενσιτικών και μπαινιτικών δειγμάτων. Επίσης, αναφέρονται και αναλύονται η επιρροή του shot peening σε κόπωση και τους μηχανισμούς που οδηγούν σε θραύση.

### 3.2 Συμπεριφορά του Shot peening

#### 3.2.1. Συμπεριφορά του single shot peening

- Ο Tekeli (2002) εξέτασε την επίδραση του shot peening για την αντοχή σε κόπωση του SAE 9245 χάλυβα. Ο πρωταρχικός σκοπός του άρθρου αυτού είναι να προσδιοριστεί η επίδραση της θερμικής επεξεργασίας και του shot peening σχετικά με τις ιδιότητες κόπωσης, την αντοχή και τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα ελατηρίου 51CrV4. Τα δείγματα υποβλήθηκαν σε θερμική επεξεργασία (Q & T) και στη συνέχεια υπέστησαν shot peening. Τα δείγματα υποβλήθηκαν σε τάση με σφαιρίδια διαμέτρου 0,58 mm για 45 s. Η απόσταση του ακροφυσίου προς το κομμάτι εργασίας ήταν 100 mm. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν 30% αύξηση σε αντοχή κόπωσης σε σύγκριση με το μη-shot peened υλικό.

-Ο Andrzej Kubit (2016) (1) κ.α μελέτησαν την επίδραση της θερμικής επεξεργασίας και του shot peening για την αντοχή σε κόπωση ενός 51CrV4 χάλυβα. Τρεις τύποι δειγμάτων ελέγχθηκαν. Χωρίς θερμική επεξεργασία (WT), οι shot peened (SP) χωρίς θερμική κατεργασία και οι βαφής και επαναφορές (QT).

Τα δείγματα παρέμειναν στους 860 ° C για 2.15 λεπτά, βάφτηκαν και μετά επαναφέρθηκαν στους 480 ° C για 15 λεπτά.

Το μεγαλύτερο σημείο διαρροής και οι καλύτερες τελικές αντοχές επιτεύχθηκαν από τα δείγματα QT. Το σημείο διαρροής των δειγμάτων που είχαν υποβληθεί σε θερμική επεξεργασία αυξήθηκε 2,9 φορές σε σύγκριση με δείγματα WT και 3,5 φορές σε σύγκριση με τα SP. Η τελική αντοχή του χάλυβα μετά την QT ήταν 2,1 φορές μεγαλύτερη από ό, τι στις υπόλοιπες ομάδες. Από την άλλη πλευρά, η μεγαλύτερη τιμή της επιμήκυνσης, ίση με 24,3%, παρατηρήθηκε για τα SP δείγματα. Αυτή η τιμή ήταν 77% μεγαλύτερη από ό, τι στα δείγματα με QT. Οι μηχανικές ιδιότητες μετά από λείανση και στίλβωση άλλαξαν σε ασήμαντο βαθμό για τα δοκίμια WT.

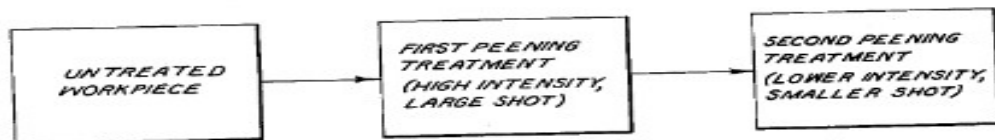
Τα δείγματα QT έδειξαν το υψηλότερο όριο κόπωσης (200 MPa) και ιδιότητες κόπωσης σε χαμηλούς κύκλους (περιοχή LCF). Τα δείγματα SP έδειξαν όριο

κόπωσης 203 MPa και τα WT ήρθαν τελευταία επιτυγχάνοντας 198 MPa. Τα δείγματα QT έχουν την υψηλότερη τιμή σε αντοχή σε εφελκυσμό, καθώς και στο όριο διαρροής. Έχοντας ένα τέτοιο μειονέκτημα στην πλαστική συμπεριφορά (πολύ χαμηλότερη επιμήκυνση), τα QT δείγματα κατάφεραν να επιτύχουν τα καλύτερα αποτελέσματα σε κόπωση, ακόμα και στην περιοχή υψηλών κύκλων (HCF). Η υψηλότερη τραχύτητα παρατηρήθηκε για τα SP δοκίμια 51CrV4 χάλυβα, η οποία πιθανότατα επηρεάζεται από τα μικρά εξογκώματα που προέκυψαν από την διαδικασία. Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι οι μηχανικές ιδιότητες και η σκληρότητα των 51CrV4 χάλυβα μετά από QT και SP είναι στενά συνδεδεμένα με αντοχή σε κόπωση. Ο συνδυασμός και των δύο προετοιμασιών μπορεί να δώσει ακόμα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα.

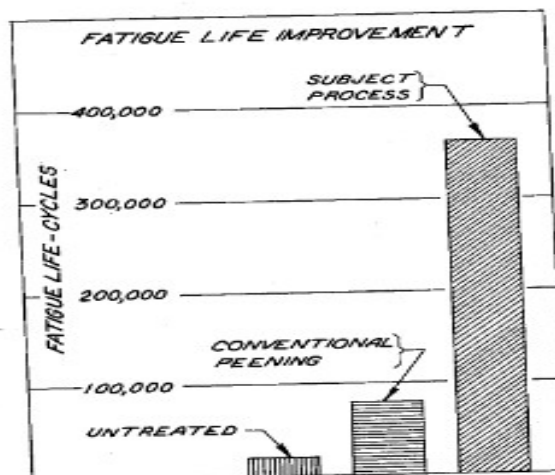
### 3.2.2 Συμπεριφορά με *double shot peening*

Ο John J Bush (1963) (2) κ.α διεξήγαγαν μια έρευνα σχετικά με τη μέθοδο διπλή βολής (*double shot peening*). Η κατάλληλη μέθοδος *shot peening* ποικίλλει ανάλογα με τη φύση του υλικού. Έχει δειχθεί όμως από πολλές μελέτες ότι το *double shot peening* δίνει τις καλύτερες ιδιότητες κόπωσης σε χάλυβες. Το υλικό αρχικά πυροβολείται με ένα συγκεκριμένο μέγεθος σφαιριδίου και στη συνέχεια πυροβολείται πάλι με ένα διαφορετικό (μικρότερου μεγέθους) σφαιρίδιο. Το μέγεθος του δεύτερου σφαιριδίου είναι κατά προτίμηση μεταξύ / 3 / ή 5 του αρχικού μεγέθους σφαιριδίου. Για τον SAE 5160 χάλυβα που χρησιμοποιείται σε αυτή την έρευνα η κατάλληλη διάμετρος της αρχικής σφαίρας είναι περίπου 0,006 έως 0,17 εκατοστά και περίπου 0,018 έως 0,028 εκατοστά για το δεύτερο μέγεθος σφαίρας. Η επιλογή του κατάλληλου μεγέθους σφαιριδίου όμως, κατά γενικό κανόνα, λαμβάνει υπόψη πολλοί παράγοντες όπως η φύση του υλικού και η σκληρότητά του και η εφαρμογή της σφαιροβολής. Βρέθηκε ότι η κατάλληλη μέθοδος *double shot peening* συνέβαλε στην αύξηση κατά 100% στην ζωή κόπωσης των δειγμάτων, σε σύγκριση με εκείνους χωρίς *shot peening*.

Η επίδραση του *shot peening* και του στη ζωή κόπωσης *double shot peening* δείχνεται σχηματικά στην **Εικόνα 36** παρακάτω.



*Fig. 1*



**Εικόνα 35:** Επίδραση του shot peening και του double shot peening στη ζωή κόπωσης (John J Bush 1963).

- Η τεχνική του double shot peening βελτιώνει την ζωή σε κόπωση των φύλλων ελατηρίων όταν χρησιμοποιεί μικρότερο σφαιρίδιο (0,4 mm διάμετρο για την πρώτη βολή και 0,3 χιλιοστά για την δεύτερη) (Bruno Geoffroy Scuracchio et.al, 2013 )(3). Τα υλικά αυτά λειτουργούν σε υψηλές τάσεις και υποβάλλονται σε χαμηλές θερμοκρασίες επαναφοράς για μεγαλύτερη σκληρότητα. Σε αυτές τις περιπτώσεις η πυρήνωση ρωγμών ελέγχει την ανθεκτικότητα. Αυτό υποστηρίζεται από τα αποτελέσματα των παραμένουσων τάσεων, πράγμα που δείχνει ότι η διάρκεια ζωής κόπωσης επηρεάζεται έντονα μόνο με επιφανειακές συμπιεστικές παραμένουσες τάσεις (με βάθος έως 0,02 mm). Ακόμη και με ένα μηχανισμό ανακούφισης από τις τάσεις που λειτουργεί υπο-επιφανειακά, η διάρκεια ζωής σε κόπωσης δεν υπέστη καμία αρνητική επίπτωση. Έτσι, η διάδοση της ρωγμής για τα συστατικά αυτά είναι σημαντικά μικρότερης σημασίας σε σχέση με την πυρήνωση των ρωγμών, όπως υποστηρίζεται από την έλλειψη διακριτών χαρακτηριστικών διάδοσης στις επιφάνειες θραύσης κάποιων δειγμάτων.

Ο Nenad Gubeljak κ.α (2014) (4) μελέτησαν την επίδραση του μεγέθους εγκλεισμάτων και παραμένουσων τάσεων σε χάλυβα 51CrV4. Η αντοχή σε κόπωση υπολογίστηκε για μία αρχική ρωγμή διάστασης 0,35 mm. Η μείωση του μεγέθους εγκλεισμάτων από 0,25 mm έως 0,15 mm αύξησε τη διάρκεια ζωής κόπωσης μόνο κατά 4%. Αυτό οφείλεται κυρίως στο shot peening, το οποίο επηρέασε τη φύση των



παραμένουσων τάσεων. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μέσω του shot peening (ιδανικά double shot peening) μια σημαντική μείωση των εγκλείστων δεν είναι απαραίτητη για την επίτευξη αξιοπρεπούς αντοχής σε κόπωση.

### *3.2.3 Shot peening σε υψηλές θερμοκρασίες*

Ο M. C. Ruy κ.α (2005) (5) εφάρμοσαν shot peening σε δείγματα χάλυβα SAE5160 σε 25°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C και 300°C, συγκρίνοντας στην συνέχεια τις ιδιότητες σε κόπωση.

Τα αποτελέσματα έδειξαν αύξηση της ζωής σε κόπωση κατά περίπου 5,5 φορές για τα δείγματα των 200°C. Αυτό αποδόθηκε τόσο στις θλιπτικές παραμένουσες τάσεις, όσο και στην σκλήρυνση που εισήχθη κατά τη διαδικασία του shot peening, όπως προτείνει η Courtney (2000).. Διαπιστώθηκε ότι ο κύριος λόγος για την αυξημένη διάρκεια ζωής σε αυτή την θερμοκρασία οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η επίδραση της σκλήρυνσης ξεπέρασε την επίδραση της μείωσης των παραμένουσων τάσεων και την αύξηση της επιφανειακής τραχύτητας.

### *3.3 Ιδιότητες κόπωσης των μαρτενσιτικών και μπαινιτικών χαλύβων*

#### *3.3.1 Επίδραση εγκλεισμάτων και νανοσωματιδίων*

Η ύπαρξη εγκλεισμάτων (κυρίως μη μεταλλικών) είναι αποτέλεσμα αμφίβολης μεταλλουργικής διεργασίας. Η απουσία τους έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ζωής κόπωσης των μεταλλικών υλικών σε χαμηλούς και υψηλούς κύκλους. Όπως διαπιστώνεται παρακάτω από διάφορες έρευνες τα εγκλείσματα είναι μια από τις κύριες εστίες έναρξης ρωγμών.

Οι ρωγμές κόπωσης σε μπαινίτες που δεν είναι απαλλαγμένοι από εγκλείσματα ξεκινούν στην επιφάνεια των δοκιμών, ενώ μπαινίτες με σχεδόν μηδενικά εγκλείσματα παρουσιάζουν ρωγμές στην υποεπιφάνεια. Η ιδιότητα αυτή είναι χαρακτηριστική και δείχνει βελτίωση στην αντοχή σε κόπωση (Yangbo Liu, 2012) (15)

Ο Z.G. Yang et.al (2004) (6) μελέτησαν τις συμπεριφορές σε κόπωση των χαλύβων μηδενικών εγκλεισμάτων και των εμπορικών χαλύβων 42CrMo σε πολύ υψηλούς κύκλους

Οι συγγραφείς εστίασαν περισσότερο στα αποτελέσματα της κόπωσης και την έναρξη των ρωγμών. Τέσσερις διαφορετικοί τύποι δειγμάτων προκύπτουν. Τα δείγματα Z έχουν σχεδόν μηδενικά εγκλείσματα, ενώ τα δείγματα C ήταν εμπορικά και αμφίβολης ποιότητας.

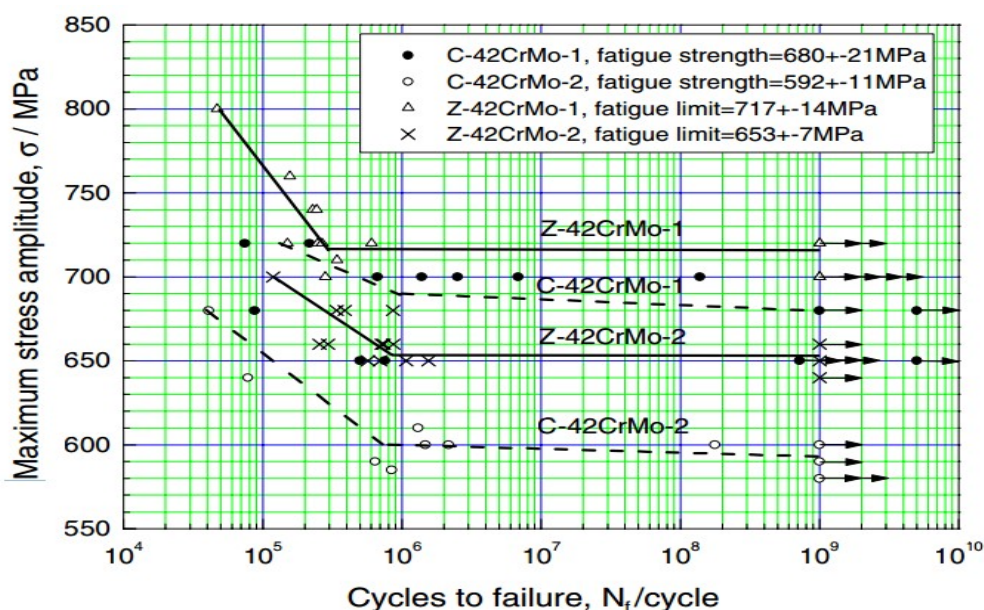
Η διαδικασία θερμικής επεξεργασίας για τα δείγματα C-42CrMo -1 και Z-42CrMo -1 είναι η εξής:

880 °C θέρμανση σε κλίβανο κενού (30 min) + βαφή σε λάδι + ανόπτηση στους 430°C (2 ώρες)

Τα Z-42CrMo-2 επαναφέρθηκαν στους 500 οC και το C-42CrMo-2 στους 550 °C.

Το σημείο διαρροής και η τελική αντοχή σε εφελκυσμό μεταξύ των δύο διαφορετικών κατηγοριών δειγμάτων ήταν πολύ κοντά.

Στην **Εικόνα 36** παρακάτω παρουσιάζονται οι S-N καμπύλες των δοκιμών.



**Εικόνα 36:** S-N καμπύλες για τα Z και C δείγματα. ( Z.G. Yang et.al, 2004)

Τα όρια κόπωσης είναι  $680 \pm 21$  και  $592 \pm 11$  MPa για τα δείγματα C-42CrMo επαναφερμένα αντίστοιχα σε χαμηλότερες και υψηλότερες θερμοκρασίες. Αντίστοιχα, τα όρια κόπωσης είναι  $717 \pm 14$  και  $653 \pm 7$  MPa για τα δείγματα Z-42CrMo επαναφερμένα σε χαμηλότερες και υψηλότερες θερμοκρασίες. Τα όρια κόπωσης για χάλυβες Z είναι υψηλότερα από τους χάλυβες C για επαναφορά στις αντίστοιχες θερμοκρασίες. Η επιλογή όμως της κατάλληλης θερμοκρασίας επαναφοράς υπερσχύει της καθαρότητας, καθώς τα C-42CrMo -1 παρουσιάζουν καλύτερες ιδιότητες σε κόπωση από τα Z-42CrMo-2 δείγματα.

Το μέγεθος κόκκου του παραμένοντα ωστενίτη είναι 16 και 22  $\mu\text{m}$  για τα Z-42CrMo και C-42CrMo, αντίστοιχα. Τα εγκλείσματα για το Z-42CrMo είναι μικρότερα από 1  $\mu\text{m}$ . Από την άλλη πλευρά, εγκλείσματα της τάξης των 22  $\mu\text{m}$  παρατηρήθηκαν στα δείγματα C-42CrMo. Η ανάλυση σε XRD έδειξε ότι τα εγκλείσματα περιέχουν κυρίως Al, Mg, Ca και O. Το γεγονός ότι η ίδια επιφανειακή επεξεργασία εφαρμόστηκε για όλα τα δείγματα οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι ρωγμές στον

εμπορικό χάλυβα που ξεκίνησαν στα εγκλείσματα, ενώ οι ρωγμές στον καθαρό χάλυβα ξεκίνησε στην επιφάνεια. Η εφαρμογή της μεθόδου shot peening θα εξάλειφε ακόμα περισσότερες αστοχίες.

Σε πραγματικές συνθήκες, αυτό σημαίνει ότι η χρήση ενός εμπορικού χάλυβα εξαρτάται πολύ από τη στατιστική φύση των ιδιοτήτων κόπωσης. Θεωρώντας ότι για διαφορετικούς χάλυβες μπορεί να 'χουμε περισσότερα ή λιγότερα εγκλείσματα σε μια γραμμή παραγωγής, που σημαίνει χειρότερες ή καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, μερικά από τα τελικά προϊόντα θα αστοχήσουν νωρίτερα από το αναμενόμενο ή θα έχουν μειωμένο όριο κόπωσης. Από την άλλη πλευρά, οι χάλυβας με μηδενικά εγκλείσματα είναι όμοιοι μεταξύ τους, πράγμα που σημαίνει ότι ο μέσος όρος των μηχανικών ιδιοτήτων των χαλύβων αυτών (που είναι υψηλότερες από αυτές των εμπορικών χαλύβων) αποτελούν ένα πολύ ασφαλέστερο παράγοντα για μαζικές εφαρμογές.

Η αποφυγή των μη μεταλλικών εγκλεισμάτων, όπως MnS, CA, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> είναι πολύ κρίσιμη στη μεταλλουργική διαδικασία. (Δρ Ahmed Σαρίφ, 2010) (22)

Τα μη μεταλλικά εγκλείσματα, ακόμη και εκείνα μικρότερα των 1 μm έχουν αρνητική επίδραση στις ιδιότητες κόπωσης. Πρόκειται για μια από τις πιθανές περιοχές έναρξης ρωγμών και συχνά ευθύνονται για τη μείωση της ζωής ενός υλικού. Από την άλλη πλευρά, η ενίσχυση του πλέγματος χάλυβα με κεραμικά νανοσωματίδια οδηγεί στην αύξηση των ιδιοτήτων κοπώσεως του. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> νανοσωματίδια, C-νανοσωματίδια και νανοσωματίδια ZrC έδειξαν καλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό και όριο κόπωσης από δοκίμια αναφοράς (χωρίς εγκλείσματα νανο-σωματιδίων) 51CrV4 χάλυβα. Τα Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> νανοσωματίδια παρεμποδίζουν την ολίσθηση των ατελειών περισσότερο απ ό,τι τα άλλα νανοσωματίδια που εξετάστηκαν, καθώς είναι πιο συμβατά με το πλέγμα του χάλυβα.

(B Podgornik et al, 2015) (23)

Στην παρούσα μελέτη αναφέρεται ότι:

" Η ευεργετική επίδραση των νανοσωματιδίων σε χάλυβες ελατηρίων συνέβαλαν κυρίως στην αλληλεπίδραση των νανοσωματιδίων στη μήτρα του χάλυβα με τις ατέλειες. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με εκείνα των νανο-ιζημάτων. Η παρουσία των νανοσωματιδίων μπορεί να αναστείλει την ανακρυστάλλωση διακόπτοντας την ολίσθηση των ορίων των κόκκων, αλλά κυρίως δημιουργούν εμπόδιο στην κίνηση εξαρθρώσεων, γνωστή ως ενίσχυση μέσω ιζημάτων (precipitation strengthening) . "

### 3.3.2 Ιδιότητες σε κόπωση διαφόρων μικροδομών σε χάλυβες.

Σε αυτή την ενότητα παραθέτονται έρευνες στις οποίες συγκρίνεται κυρίως η μπεινιτική με την επαναφερμένη μαρτενσιτική μικροδομή. Εξετάζεται επίσης και η

επίδραση του φερρίτη και παραμένοντα ωστενίτη στις προαναφερθέντες μικροδομές. Τέλος, εξετάζεται το φαινόμενο της μεικτής μικροδομής επαναφερμένου ματενσίτη / κατώτερου μπαινίτη καθώς και οι χάλυβες TRIP.

### *3.3.2.1 Ιδιότητες σε κόπωση χαλύβων με επαναφερμένη μαρτενσική μικροδομή*

Ο B.Šurštašić (2011) (20) σύγκρινε με τα αποτελέσματα της κόπωσης των χαλύβων ελατηρίων που είχαν κατασκευαστεί σύμφωνα πρότυπο DIN 51CrV4. Η θερμική κατεργασία των χαλύβων ήταν: ωστενιτοποίηση στους 870 ° C για 10 λεπτά, γρήγορη ψύξη και επαναφορά στους 425 ° C για 1 ώρα (για την πρώτη ομάδα) και επαναφορά στους 475 ° C για 1 ώρα (για την δεύτερη ομάδα).

Η πρώτη ομάδα έδειξε υψηλότερη σκληρότητα Rockwell αντοχή σε εφελκυσμό ( $R_m$ ) και όριο διαρροής ( $R_{p0.2}$ ) αλλά χαμηλότερη ολκιμότητα σε σύγκριση με την δεύτερη ομάδα. Η πρώτη ομάδα έδειξε επίσης καλύτερη αντοχή σε κόπωση, δείχνοντας πως η σωστή θερμοκρασία επαναφοράς μπορεί να επηρεάσει θετικά τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα.

Ο K.K. Alanemea (2010) (17) κ.α σύγκριναν χάλυβες διπλής φάσεως (φερρίτη και μαρτενσίτη). Τα δείγματα, αφού ψύχθηκαν από τους 860 ° C, επαναφέρθηκαν στους 740 ° C, 760 ° C, και 780 ° C για 30 λεπτά. Με την αύξηση της θερμοκρασίας επαναφοράς αυξήθηκε η περιεκτικότητα σε μαρτενσίτη. Το τελικό προϊόν με διαφορετικές περιεκτικότητες σε μαρτενσίτη και φερρίτη συγκρίθηκαν ως προς την αντοχή και την σκληρότητα τους. Τα δείγματα που επαναφέρθηκαν στους 760 ° C περιείχαν 68% μαρτενσίτη και έδειξαν το υψηλότερο όριο κόπωσης. Αύξηση της περιεκτικότητας σε μαρτενσίτη έδειξε υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό, αλλά χειρότερες ιδιότητες κόπωσης.

Σημαντικό ρόλο στην ζωή σε κόπωση ενός υλικού από επαναφερμένο μαρτενσίτη έχει η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης. Μειωμένη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης συνεπάγεται με αυξημένο ποσοστό φερρίτη στο πλέγμα του μαρτενσίτη, αυξάνοντας την ολκιμότητα της τελικής δομής. Το αποτέλεσμα είναι αύξηση των ιδιοτήτων κόπωσης καθώς μειώνεται η ευκολία διάδοσης της ρωγμής ( $da/dn$ ), (M. A. Carneiro et al.) (25)

### *3.3.2.2 Ιδιότητες σε κόπωση μαρτενσιτικών και μπαινιτικών μικροδομών*

Ο Bhadeshia (1997) (10), παρουσίασε τα πλεονεκτήματα της μπαινιτικής μικροδομής σε σιδηροδρομικές εφαρμογές προωθώντας την έναντι της περλιτικής που χησιμοποιείται στην βιομηχανία αυτή. Ο σεμεντίτης είναι σκληρή φάση και ως εκ τούτου παρέχει αντίσταση στη φθορά, αλλά είναι ταυτόχρονα εύθραυστος. Η νέα μπαινιτική μικροδομή είναι εντελώς απαλλαγμένη από καρβίδια, έχει πολύ υψηλότερη αντοχή, ενώ παρέχει παράλληλα υψηλή σκληρότητα η οποία οφείλεται στα λεπτόκοκκα υπολείμματα του μαρτενσίτη και του παραμένοντα ωστενίτη "

Ο Leiro, Ακ.α (2014) **(11)** σύγκριναν τις ιδιότητες τριών δοκιμίων χάλυβα με υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο (0.55C-1.72Si) . Οι διαφορετικές θερμικές επεξεργασίες ήταν οι εξής : βαφή και επαναφορά στους 460 ° C για να ληφθεί η μαρτενσιτική μικροδομή και για τις άλλες δύο κατηγορίες δοκιμίων ωστενιτιποίηση στους 300 και 350 ° C, αντίστοιχα, για να ληφθούν δύο διαφορετικές μικροδομές μπαινίτη απαλλαγμένη από καρβίδια. Στον χάλυβα που ωστενιτοποιήθηκε στους 350 ° C το ποσοστό της περιεκτικότητας σε μπαινίτη και παραμένοντα ωστενίτη ήταν υψηλότερο από αυτό του χάλυβα που ωστενιτοποιήθηκε στους 300 ° C. Έπειτα έγιναν δοκιμές κόπωσης σε περιστρεφόμενη καμπτική μηχανή. Όταν η θερμοκρασία ωστενιτιποίησης ήταν 300 ° C το όριο αντοχής αυξήθηκε κατά 25%, παρά τη μείωση κατά 5% της αντοχής σε εφελκυσμό σε σύγκριση με τα δοκίμια του επαναφερμένου μαρτενσίτη. Η σχέση μεταξύ του ορίου αντοχής [Rfat (50%)] και της αντοχής στον εφελκυσμό (Rm) ήταν υψηλότερη για τα ωστενιτοποιημένα δείγματα σε σύγκριση με εκείνα που βιάφτηκαν και επαναφέρθηκαν. Ως εκ τούτου, πιστεύεται ότι η παρουσία του παραμένοντα ωστενίτη επηρεάζει τη σχέση μεταξύ του ορίου αντοχής και αντοχής σε εφελκυσμό.

Ο Yaojian κ.α (1987) **(12)** σύγκριναν τις μηχανικές ιδιότητες των μικροδομών με ματενσίτη, κοκκώδη μπαινίτη, κατώτερο μπαινίτη και παραμένοντα ωστενίτη. Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε ήταν 55SiMnVB. Η αντοχή σε εφελκυσμό και κόπωση μειώθηκε με την αύξηση της περιεκτικότητας σε φερρίτη ή κοκκώδη μπαινίτη. Αντίθετα αποτελέσματα πάρθηκαν με την αύξηση της περιεκτικότητας σε κατώτερο μπαινίτη, κυρίως στη ζωή κόπωσης των δειγμάτων.

Επισημάνθηκε επίσης ότι μια δομή με 4,4% φερρίτη και μαρτενσίτη είχαν ελαφρώς υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό αλλά σημαντική μείωση στην αντίσταση σε μικροπλαστική παραμόρφωση σε σχέση με την μεικτή δομή 12% κοκκώδους μπαινίτη, 65% κατώτερου μπαινίτη και μαρτενσίτη.

Το συμπέρασμα ήταν ότι η μη δεσμευμένη φάση του φερρίτη είχε αρνητική επίδραση στην ολκιμότητα και την αντοχή ενός χάλυβα. Οι αρνητικές επιπτώσεις της είναι κοινές για πολλές μικροδομές που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία.

Μια άλλη έρευνα από τον Mithaq Ηλία Hanno (2012) **(18)** έδειξε ότι ο φερρίτης μέσα στην μαρτενσιτική μικροδομή επηρεάζει θετικά τις ιδιότητες σε κόπωση του χάλυβα 42CrMoS4, όταν η περιεκτικότητά του είναι μεταξύ 3% και 20%. Πιο κάτω ή πάνω από αυτό το εύρος τα δείγματα χαρακτηρίστηκαν με χειρότερες ιδιότητες κόπωσης.

### *3.3.2.3 Ιδιότητες σε κόπωση μεικτών μικροδομών*

Παρατηρήθηκε από τις αρχές της δεκαετίας του '60 ότι μια μεικτή δομή με κατώτερο μπαινίτη και επαναφερμένο μαρτενσίτη (duplex) εμφανίζει καλύτερη αντοχή και σκληρότητα από μια μονοφασική μαρτενσιτική μικροδομή. Ο κάτωτερος μπαινίτης έχει καλύτερες ιδιότητες από τον ανώτερο μπαινίτη σχεδόν σε κάθε εφαρμογή και η ιδανική περιεκτικότητα του σε μια μεικτή δομή εξαρτάται από τον τύπο του χάλυβα. (Bingzhe Bai, 2009) (16)

Ο Tomita (1991) χρησιμοποίησε μια μέθοδο για την επίτευξη μιας τέτοιας μικροδομής. Ο χάλυβας διατηρήθηκε στην περιοχή του κατώτερου μπαινίτη (διάγραμμα TTT) για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο (λιγότερη από αυτή που χρειάζεται για την πλήρη κατώτερη μπαινιτική δομή) και στη συνέχεια ψύχθηκε για να μετατραπεί το υπόλοιπο του ωστενίτη σε μαρτενσίτη. Ο χάλυβας στη συνέχεια υπέστη θερμική επεξεργασία και η τελική μικροδομή με τις τελικές ιδιότητες προέκυψε. Ο Tomita διαπίστωσε ότι για τον SNCM439 χάλυβα η ιδανική μικροδομή αποτελείται από 25% κατώτερο μπαινίτη και το υπόλοιπο επαναφερμένος μαρτενσίτης.

Ο Guhui Gao et. Al (2016) (7) ερεύνησαν την επίδραση του παραμένου ωστενίτη στη συμπεριφορά πολύ υψηλών κύκλων κόπωση (VHCF), ιδιαίτερα στην έναρξη της ρωγμής κόπωσης στους κύκλους αυτούς.

Η χημική σύνθεση των πειραματικών χάλυβα σε% κ.β. ήταν Fe-0.2C-2.0Mn-1.0Si-0.8Cr-0.2Mo-0.6Ni. Το μαγγάνιο προστέθηκε για να αποφευχθεί η μετατροπή του ωστενίτη σε φερρίτη σε υψηλές θερμοκρασίες. Το πυρίτιο προστέθηκε για την καταστολή της καθίζησης καρβιδίων κατά τη διάρκεια της βαφής και της επαναφοράς.

Η θερμοκρασία Ms βρέθηκε να είναι 340 °C. Ο σωστός ρυθμός ψύξης ώστε να επιτευχθεί τόσο μπαινιτική όσο και μαρτενσιτική μικροδομή προσδιορίστηκε σύμφωνα με το ποσοστό ψύξης για την πλήρη μαρτενσίτη και την πλήρη μπαινίτη μικροδομή. Τα δείγματα είχαν διαφορετικές θερμοκρασίες βαφής και στεγανοποίησης.

1. ψύξη στους  $\sim 2^\circ \text{C} / \text{s}$  έως  $200^\circ \text{C}$  (κατώτερη θερμοκρασία της Ms) μετά απο ωστενιτοποίηση στους  $880^\circ \text{C}$  για 60 λεπτά, παραμονή στους  $280^\circ \text{C}$  για 45 λεπτά και επαναφορά στους  $250^\circ \text{C}$  για 120 λεπτά (συντομογραφία BQ200 δείγμα)
2. ψύξη στους  $\sim 2^\circ \text{C} / \text{s}$  έως  $320^\circ \text{C}$  (κατώτερη θερμοκρασία της Ms) μετά απο ωστενιτοποίηση στους  $880^\circ \text{C}$  για 60 λεπτά, παραμονή στους  $360^\circ \text{C}$  για 45 λεπτά και επαναφορά στους  $250^\circ \text{C}$  για 120 λεπτά (σε συντομογραφία δείγμα BQ320).

Και τα δύο δείγματα περιέχουν μπαινίτη, φερρίτη, μαρτενσίτη και παραμένοντα ωστενίτη. Το δείγμα BQ200 είχε περισσότερο μαρτενσίτη και λιγότερο παραμένοντα ωστενίτη από το δείγμα BQ320, λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας επαναφοράς.

Ο μετασχηματισμός του ωστενίτη παίζει σημαντικό ρόλο στην VHCF. Όντας μια πιο μαλακή φάση από τον μαρτενσίτη και τον μπαινίτη η έναρξη εντός του πλέγματός του μπορεί να λάβει χώρα. Από την άλλη πλευρά, η παραμόρφωση σε μαρτενσίτη (φαινόμενο TRIP) θα μπορούσε να παρέχει υψηλή σκλήρυνση και να αναβάλλει την πλαστική παραμόρφωση, αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής κόπωσης σε πολύ υψηλούς κύκλους (G. Lacroix et.al , 2008).

Το δείγμα BQ200 δείχνει υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό σε σύγκριση με το δείγμα BQ320 (1410MPa και 1320 MPa αντίστοιχα), αλλά χαμηλότερη ολκιμότητα. Τα αποτελέσματα της κόπωσης έδειξαν ότι το όριο κόπωσης του BQ200 ήταν σχεδόν 770MPa, ενώ το όριο κόπωσης για το BQ320 ήταν 600MPa, πράγμα που σημαίνει ότι το όριο κόπωσης / αντοχή σε εφελκυσμό ήταν 0,55 και 0,45, αντίστοιχα. Ένα άλλο κρίσιμο γεγονός ήταν ότι όλες οι ρωγμές των BQ200 δειγμάτων ξεκίνησαν στην επιφάνεια, ενώ οι ρωγμές στα δείγματα BQ320 ξεκίνησαν από το εσωτερικό τους. Μία μέθοδος shot peening για παράδειγμα θα μπορούσε να αποτρέψει αυτές τις αστοχίες, καθώς και να προσδώσει στα BQ200 δείγματα υψηλότερο όριο κόπωσης.

Ο E.M. Serbino και ο A.P. Tschiptschin (2014) (8) σύγκριναν τη συμπεριφορά σε κόπωση επαναφερμένων μαρτενσιτικών και ωστενιτοποιημένων (κυρίως σχηματισμούς κατώτερου μπαινίτη) υπερκαθαρών χαλύβων υψηλής αντοχής Cr-Si (HSS) (ως προς DIN EN 54SiCr6 και παρόμοιο με χάλυβα ASTM A877, ο οποίος χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές αναρτήσεων).

Η θερμική κατεργασία ήταν παρόμοια με την θερμική επεξεργασία που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία, αν και σε όλα τα δείγματα (επαναφορά σε 400 °C για τα δείγματα QT και ωστενιτοποίηση σε 290 °C για τα δείγματα AT) στη συγκεκριμένη μελέτη εφαρμόστηκε στα δείγματα double shot peening πριν από τη δοκιμή κόπωσης.

Τόσο τα δείγματα QT όσο και τα AT έδειξαν παρόμοια αντοχή στον εφελκυσμό (περίπου 2000 MPa), σκληρότητα (περίπου 600 Vickers) και επιμήκυνση, αλλά τα δείγματα AT παρουσίασαν μικρότερο όριο διαρροής (περίπου 8%).

Ενώ η QT μικροδομή περιέχει 1,4% του παραμένοντα ωστενίτη, η AT μικροδομή παρουσιάζει περίπου 7,2% παραμένοντα ωστενίτη.

Τα δείγματα υπόκειντε τάσεις 450, 475 και 500 MPa, προκειμένου να καλύψουν την HCF και την αρχή της VHCF (N περίπου  $10^7$  κύκλους) περιοχής.

Το shot peening πιθανότατα συνέβαλε στην αποφυγή επιφανειακών ρωγμών. Τόσο για τα QT όσο και για τα AT δείγματα οι ρωγμές ξεκίνησαν στην υπο επιφάνεια και δεν αποδόθηκαν σε εγκλείσματα, χαρακτηριστικό του χάλυβα υψηλής καθαρότητας.

Τα δείγματα έδειξαν παρόμοια συμπεριφορά κόπωσης για 450 και 475 MPa, ενώ τα δείγματα AT έδειξαν καλύτερες ιδιότητες κόπωσης στα 500 MPa.

Στην έρευνα αυτή αναφέρεται ότι:

"Η διαφορά στη συμπεριφορά μεταξύ των δειγμάτων που παρατηρήθηκε για τάση 500 MPa συσχετίζεται με τις διαφορές στη μικροδομή και τις τοπικές τάσεις που προκαλούνται από την παρουσία των καταβυθισμένων καρβιδίων στα όρια των κόκκων σε ωστενιτοποιημένα δείγματα, οφείλεται δηλαδή στην παρουσία του παραμένοντα ωστενίτη στην μπαινιτική μικροδομή.

Το AT δοκίμια παρουσιάζουν κατά κύριο λόγο κατώτερο μπαινίτη με μερικά ποσοστά παραμένοντα ωστενίτη, αλλά χωρίς να καθιζάνουν καρβίδια στα όρια των κόκκων, όπως παρατηρήθηκε στα επαναφερμένα(QT) δείγματα. Αυτό το μικροδομικό χαρακτηριστικό δημιουργεί προτιμώμενες θέσεις για έναρξη ρωγμών κόπωσης, λόγω της υψηλότερης σκληρότητας και της διαφορά στην πλαστικότητα μεταξύ του ιζήματος και της μήτρας. Αυτό θα μπορούσε να επιταχύνει τα αρχικά στάδια της κόπωσης ή να μειώσει το όριο μεταξύ της έναρξης και διάδοσης ρωγμών σε δείγματα QT. Ωστόσο, στη δοκιμασία κόπωσης που ελέγχεται από χαμηλότερες διάτμητικές εντάσεις, οι διαφορές στη μικροδομή δεν επηρεάζει την ζωή σε κόπωση. "

Οι G. Chai και J. Lindén (2013) (9) έκαναν δοκιμές κόπωσης σε περιστροφική καμπτική μηχανή σε δοκίμια μικτής μικροδομής επαναφερμένου μαρτενσίτη και κατώτερου μπαινίτη, προσπαθώντας να εντοπίσουν τους μηχανισμούς έναρξης και διάδοσης της ρωγμής.

Το συμπέρασμα ήταν ότι με την αύξηση του αριθμού των κόκκων (οπότε και περισσότερα όρια κόκκων) η ζωή σε κόπωση αυξήθηκε. «Τα όρια των κόκκων γίνονται φραγμοί για την πρόωρη διάδοση της ρωγμής κόπωσης». «Όταν η ρωγμή κόπωσης μεγαλώνει οι ελαστικοί-πλαστικοί μηχανισμοί αστοχίας (EPFM) και οι γραμμικοί ή μη-γραμμικοί μηχανισμοί ελαστικής παραμόρφωσης γίνονται κυρίαρχοι και τα όρια των κόκκων δεν είναι τόσο σημαντικά για την παρεμπόδιση της διάδοσης της ρωγμής. »

Η έρευνα δείχνει ότι 'η θέση έναρξης της ρωγμής στην υποεπιφάνεια βρισκόταν στην περιοχή όπου η σκληρότητα ήταν σχετικά χαμηλή ή περιείχε κάποια χονδρόκοκκη φάση φερρίτη (στο πλέγμα του μπαινίτη), που συνιστά την πιο μαλακή φάση στο πλέγμα.'

(SNDCO = subsurface non-defect crack origin = υποεπιφανειακή μη ελαττωματική έναρξη ρωγμής)

Η έναρξη της ρωγμής στην υποεπιφάνεια συνέβη τόσο σε μη ελαττωματικές περιοχές, όσο και σε εγκλείσματα. Η διάρκεια ζωής κόπωσης είναι υψηλότερη εάν η θέση έναρξης της ρωγμής βρίσκεται σε μια μη-ελαττωματική περιοχή και υπάρχουν περισσότεροι κόκκοι στην SNDCO. Σε κόπωση με χαμηλές τάσεις έχουμε αύξηση στο μέγεθος της SNDCO. Αυτό προκαλεί επίσης την αλλαγή στην μορφολογία της SNDCO σε λιγότερο όλκιμη. Η SNDCO έχει σημείο έναρξης είτε στον φερρίτη που



περιέχεται στην φάση του μπαινίτη ή στα όρια των κόκκων. Στη συνέχεια, η ρωγμή έχει εφελκυστική αντί για διατμητική μορφή, οδηγώντας στην έναρξη της ρωγμής.

Wei Dongyuan (2004) (13):

Οι ιδιότητες κόπωσης του C-Si-Mn-Cr χαμηλά κραματωμένου χάλυβα που παρουσιάζει αντοχή σε εφελκυσμό 1500 MPa ή μεγαλύτερη μπορεί να βελτιωθεί με την ακόλουθη θερμική επεξεργασία: ωστενιτοποίηση στους 900 ° C για 20 λεπτά ακολουθούμενη από ψύξη στον αέρα και στη συνέχεια επαναφορά στους 280 και 370 ° C για 2 ώρες. Ο χάλυβας είχε μια μεικτή φάση μπαινίτη-καρβιδίων και μαρτενσίτη που περιέχουν παραμένοντα ωστενίτη σε ποσοστό 8% και άνω ( ορίζεται ως CFB / M χάλυβας). Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν για τον χάλυβα CFB / M συγκρίθηκαν με εκείνα του πλήρως μαρτενσιτικού χάλυβα, ο οποίος επαναφέρθηκε στους 280 και 370 ° C για 2 ώρες μετά από ωστενιτοποίηση στους 900 ° C για 20 λεπτά (που ορίζεται ως χάλυβας FM) . Η αντοχή σε κόπωση προσδιορίστηκε με μια μέθοδο αξονικής δοκιμής κόπωσης καθώς και η διάδοση της ρωγμής μελετήθηκαν. Σε σύγκριση με τον χάλυβα FM, η CFB / M μικροδομή αύξησε το όριο αντοχής και τον ρυθμό διάδοσης της ρωγμής κόπωσης ( $\Delta K_{th}$ ). Ειδικότερα, η CFB / M μικροδομή είχε καλύτερο συνδυασμό αντοχής και ανθεκτικότητας στην κόπωση όταν επαναφέρεται στους 370 ° C για 2 ώρες.

Ο Yanlin Yu κ.α (2010) (14) περιέγραψαν τις ιδιότητες σε κόπωση σε πολύ υψηλούς κύκλους (VHCF ) για χάλυβα με κράματα Mn-Si-Cr μεικτής φάσης (μπαινίτης και μαρτενσίτης). Η ιδιότητα κόπωσης του μεικτού χάλυβα σε VHCF είναι λιγότερο ευαίσθητη σε εγκλείσματα από την επαναφερμένη μαρτενσιτική μικροδομή και η ποσότητα του παραμένοντα ωστενίτη έχει μικρή επίδραση στην VHCF. Αυτή η μικροδομή τότε μπορεί να παρέχει αποδεκτές ιδιότητες σε κόπωση, ακόμη και όταν η δομή δεν είναι πολύ καθαρή από ατέλειες.

Οι Borik και Charman (1983) (19) χρησιμοποίησαν διαφορετικά δείγματα με βάση τη χημική σύνθεση ενός 51100 χάλυβα (ο οποίος περιέχει περίπου 1% άνθρακα) προκειμένου να συγκριθεί η μπαινιτική και επαναφερμένη μαρτενσιτική μικροδομή.

Ο επαναφερμένος μαρτενσίτης με σκληρότητα κάτω των 40 HRC εμφανίζει καλύτερες ιδιότητες κόπωσης από τον μπαινίτη στο ίδιο εύρος σκληρότητας. Τα σφαιροειδή καρβίδια που σχηματίζονται στον μαρτενσίτη κάτω των 40 HRC οδηγεί σε λεπτότερη μικροδομή και καλύτερες ιδιότητες σε κόπωση.

Από την άλλη πλευρά, τα καρβίδια του μπαινίτη πάνω από 40 HRC είναι πολύ καλά κατανομημένα, ενώ τα καρβίδια στον μπαινίτη κάτω των 40 HRC δείχνουν μια περλιτική μορφή, η οποία συνήθως είναι ανεπιθύμητη.

Για διαφορετικούς τύπους χαλύβων οι εν λόγω τιμές σκληρότητας αλλάζουν. Για μια δεδομένη σκληρότητα, είναι σημαντικό να βρούμε την κατάλληλη μικροδομή, προκειμένου να επιτευχθούν οι ιδανικές ιδιότητες σε κόπωση.

Αυξημένη σκληρότητα και μικρότερο μέγεθος κόκκων αναμένεται να οδηγήσουν σε βελτιωμένη ζωή κόπωσης με σχετικά μικρές τροποποιήσεις στην θερμική επεξεργασία. Αυτό επιβεβαιώνεται και από μια σειρά περιστρεφόμενων καμπτικών δοκιμών κόπωσης.

Η κατάλληλη περιεκτικότητα των χημικών στοιχείων στο πλέγμα του χάλυβα είναι πολύ σημαντική και καθορίζει τις μηχανικές του ιδιότητες. Η ιδανική ποσότητα του Si (πυριτίου) στο ωστενιτικό κράμα Fe-15Mn-10Cr-8Ni-XSi εξετάστηκε από τους Ilya Nikulin et.al (2016) (21).

Σε περιεκτικότητες Si πάνω από 4% κ.β ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός ενισχύθηκε και παρέχεται μια διαδρομή για την ανάπτυξη της ρωγμής κόπωσης μέσα σε καρβίδια ε-μαρτενσίτη. Μία μείωση της περιεκτικότητας σε Si κάτω από 4 % κ.β μειώνει την σταθερότητα του μαρτενσίτη επιτρέποντας την διάδοση ρωγμών κατά μήκος των ορίων του κόκκου.

#### 3.3.2.4 Ιδιότητες σε κόπωση χαλύβων TRIP

Οι χαλύβες TrIP συνδυάζουν στην μικροδομή τους φερρίτη, μαινίτη και παραμένοντα ωστενίτη (αρκετές φορές και μαρτενσίτη). Σε φαινόμενα κρούσης ο παραμένοντα ωστενίτης μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη. Ο μετασχηματισμός αυτός στον σταθερότερο μαρτενσίτη αυξάνει σημαντικά την αντοχή σε θραύση. Το φαινόμενο TrIP βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία, κυρίως σε κολώνες που περικλύουν την καμπίνα ενός οχήματος, καθώς προσφέρουν πολύ υψηλή ασφάλεια σε μια έντονη κρούση.

Σε έρευνα (Χαϊδεμένοπουλος et. al., 4ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών, 2010) συγκρίθηκαν σε δοκιμές κόπωσης δοκίμια χαμηλά κραματωμένων χαλύβων TrIP-7000 τα οποία χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες (HT2 και HT3) βάση της διαφορετικής θερμικής επεξεργασίας που είχαν υποστεί. Ο χάλυβας HT3 είχε μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό αλλά ο χάλυβας HT2 παρουσίασε καλύτερη αντοχή σε κόπωση σε χαμηλούς κύκλους λόγω της μεγαλύτερης σταθερότητας του παραμένοντα ωστενίτη. Σε υψηλούς κύκλους παρατηρούνται παρόμοιες ιδιότητες για τους δύο χάλυβες. Αντίστοιχες έρευνες απέδειξαν ότι ο παράγοντας αυτός (η σταθερότητα του παραμένοντα ωστενίτη) είναι ο κυριότερος για τον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των συγκεκριμένων χαλύβων.

Σε χαμηλούς κύκλους κόπωσης (υψηλότερες τάσεις) η μετατροπή του παραμένοντα ωστενίτη σε μαρτενσίτη αποδεικνύεται αρνητική, καθώς η προκύπτουσα μαρτενσιτική δομή μπορεί να λειτουργήσει ως εστία έναρξης ρωγμών. Τότε, η σταθερότητα του παραμένοντα ωστενίτη μπορεί να αποβεί θετική. Αντιθέτως, η δημιουργία σταθερών μαρτενσιτικών δομών σε υψηλούς κύκλους κόπωσης

εμποδίζει την κινητικότητα των ατελειών. Σε τέτοιες περιπτώσεις προτιμάται η ύπαρξη παραμένοντα ωστενίτη με μικρότερη σταθερότητα.

Οι μεικτές μικροδομές, καθώς και οι χάλυβες TRIP που εξετάστηκαν στην συγκεκριμένη ενότητα δεν έχουν εφαρμοστεί σε μαζική παραγωγή σουστών φύλλων.

Στην πρώτη περίπτωση η πιθανή ανομειογένεια των δύο φάσεων (κατώτερος μπαινίτης και επαναφερμένος μαρτενσίτης) μπορεί να οδηγήσει σε έναρξη ρωγμής στην διεπιφάνεια των δύο φάσεων. Για να περιοριστεί αυτό το φαινόμενο πρέπει να ληφθούν υπόψη δύο παράγοντες. Ο πρώτος είναι η δημιουργία μαρτενσίτη με ακόμα μεγαλύτερη σκληρότητα, καθώς προκύπτει από ωστενίτη ο οποίος περιέχει αυξημένο ποσοστό σε άνθρακα μετά τον μπαινιτικό σχηματισμό. (University of Cambridge, 2004). Η ομοιγένεια στις ιδιότητες των δύο φάσεων πετυχαίνεται ευκολότερα όταν σχηματίζεται μπαινίτης σε χαμηλές θερμοκρασίες και αποκτά αυξημένη σκληρότητα με υψηλά ποσοστά αντοχής, όπως αναπτύχθηκε στην ενότητα 1.1.3 (Hehemann et al., 1957). Κατα την διαδικασία παραγωγής χαλύβων με μεικτή μικροδομή ο μαρτενσίτης που προκύπτει από το πλέγμα του ωστενίτη – κατώτερου μπαινίτη έχει την τάση να σχηματίζεται σε λεπτούς κόκκους με υψηλές μηχανικές ιδιότητες (Multui et al., 1977).

## Κεφάλαιο 4

### Συμπεράσματα

Λαμβάνοντας τις παραπάνω έρευνες υπ όψιν, μπορούμε να πούμε ότι η έννοια της κόπωσης είναι πολύπλευρη. Για ένα χάλυβα που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε μία συγκεκριμένη εφαρμογή η επιλογή της ιδανικής μικροδομής και της χημικής σύνθεσης, η αποφυγή εγκλεισμάτων, ακαθαρσιών (όπως οξυγόνο ή υδρογόνο) και μια στιλβωμένη επιφάνεια ή μια επιφάνεια που έχει υποστεί shot peening είναι μερικοί από τους βασικούς παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η αποτελεσματικότητα του shot peening μπορεί να βελτιωθεί σε περιβάλλοντα υψηλότερης θερμοκρασίας ή με την εφαρμογή του double shot peening.

Η επιλογή της κατάλληλης θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης και επαναφοράς είναι επίσης υψίστης σημασίας. Οι περισσότεροι από τους ερευνητές έδειξαν ότι ο κατώτερος μπαινίτης παρέχει καλύτερες ιδιότητες σε κόπωση και μηχανικές ιδιότητες από τον ανώτερο μπαινίτη ή τον περλίτη. Στις περισσότερες περιπτώσεις επίσης, ειδικά στους κραματωμένους χάλυβες υψηλής αντοχής, παροσιάζει υψηλότερη ζωή σε κόπωση από τον επαναφερμένο μαρτενσίτη.

Τα αποτελέσματα κόπωσης από το TU Delft επιβεβαιώνουν την προηγούμενη εικασία, καθώς παρουσιάζονται καλύτερες ιδιότητες σε υψηλούς και χαμηλούς κύκλους κόπωσης για τα δείγματα κατώτερου μπαινίτη (σε σύγκριση με τα δείγματα επαναφερμένου μαρτενσίτη). Αυτό δεν ισχύει για τα shot peened δείγματα, τα οποία έδειξαν μειωμένες ιδιότητες κόπωσης (σε σύγκριση με εκείνα που τα μη shot peened) και εμφανίστηκαν περισσότερες περιοχές έναρξης στην επιφάνεια. Αυτό πιθανότατα προκλήθηκε από την ακατάλληλη εφαρμογή της μεθόδου στα δείγματα που δοκιμάστηκαν σε κόπωση.

Για τις περισσότερες εφαρμογές που απαιτούν ένα συνδυασμό ολκιμότητας και σκληρότητας, μια μεικτή δομή κατώτερου μπαινίτη και επαναφερμένου μαρτενσίτη μπορεί να επιφέρει θετικά αποτελέσματα (Tomita 1991, 2000). Το ποσοστό της κάθε φάσης εξαρτάται από τον τύπο του χάλυβα και την χημική του σύνθεση. Φάσεις όπως φερρίτης ή μετασταθής ωστενίτης είναι επίσης σημαντικές. Η ύπαρξή τους στο

πλέγμα του σιδήρου όμως θα πρέπει να είναι αυστηρά προσδιορισμένη, διότι η έλλειψή τους σε σκληρότητα μπορεί να οδηγήσει σε έναρξη ρωγμών ειδικά σε χαμηλότερες τάσεις. Αυτού του είδους μεικτής μικροδομής θα μπορούσε να αποδειχθεί ευεργετική για την αυτοκινητοβιομηχανία σε ελατήρια φύλλων.

Καλύτερες ιδιότητες κόπωσης θα έχουν ως αποτέλεσμα την αυξημένη διάρκεια ζωής και αξιοπιστίας της κατασκευής. Μια πιθανή μείωση του βάρους του οχήματος μπορεί επίσης να επιτευχθεί, διατηρώντας ταυτόχρονα ικανοποιητική αντοχή. Επιπλέον, η μείωση του βάρους θα οδηγήσει σε μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> και μειωμένη κατανάλωση καυσίμου για κάθε όχημα.

## Πηγές

How Components Fail (second edition) , *Donald J. Wolpi*

Mechanical metallurgy, George E. Dieter

[file:///C:/Users/Phillip/Downloads/Surface\\_Features\\_of\\_Fatigue\\_Fractures.pdf](file:///C:/Users/Phillip/Downloads/Surface_Features_of_Fatigue_Fractures.pdf)

<http://steel.keytometals.com/Articles/Art127.htm>

[http://www2.lbl.gov/ritchie/Library/PDF/ROR\\_IJFract99.pdf](http://www2.lbl.gov/ritchie/Library/PDF/ROR_IJFract99.pdf)

<http://heatbath.com/2012/06/salt-bath-quenching/>

METAL FAILURES , *ARTHUR G. McEVILY*

Metal fatigue in engineering , *H.O.Fuchs , R.I.Stephens*

4ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών, 2010

Γενική Μεταλλογνωσία Ι , *Γ. Δ. Παπαδημητρίου , 1989*

Γενική Μεταλλογνωσία ΙΙ , *Γ. Δ. Παπαδημητρίου , 1993*

Μεταλλοτεχνία , *Γ. Δ. Παπαδημητρίου*

<http://www.slideshare.net/MuhammadAliSiddiqui6/fracture-mechanics-failure-analysis-lecture-fatigue>

<http://www.metalravne.com/steelselector/steels/VCV150.html>

<http://www.slideshare.net/SpringerIndia/fatigue-and-corrosion-in-metals>

<http://academic.uprm.edu/pcaceres/Courses/MatEng/MSE8-2.pdf>

<http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/mechanical-testing/results1.php>

<https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Structure/fatigue.htm>

<http://fcp.mechse.illinois.edu/files/2014/07/2-Mechanisms.pdf>

<https://www.efatigue.com/constantamplitude/background/strainlife.html>

[http://www.efunda.com/formulae/solid\\_mechanics/fatigue/fatigue\\_factor.cfm](http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/fatigue/fatigue_factor.cfm)

<http://www.slideshare.net/taviyakunal/introduction-to-leaf-spring>

[http://ac.els-cdn.com/S0142112310001362/1-s2.0-S0142112310001362-main.pdf?\\_tid=c6cc9e8c-5400-11e6-a4a1-00000aacb35d&acdnat=1469627479\\_c389e979c686f62acf93cb9190125540](http://ac.els-cdn.com/S0142112310001362/1-s2.0-S0142112310001362-main.pdf?_tid=c6cc9e8c-5400-11e6-a4a1-00000aacb35d&acdnat=1469627479_c389e979c686f62acf93cb9190125540)

[https://www.efatigue.com/glossary/?word=goodman\\_diagram](https://www.efatigue.com/glossary/?word=goodman_diagram)

<https://pmpaspeakingofprecision.com>

[file:///C:/Users/Phillip/Downloads/Surface\\_Features\\_of\\_Fatigue\\_Fractures.pdf](file:///C:/Users/Phillip/Downloads/Surface_Features_of_Fatigue_Fractures.pdf)

[http://ac.els-cdn.com/S014211230600346X/1-s2.0-S014211230600346X-main.pdf?\\_tid=6b78dbe4-5415-11e6-9f10-00000aab0f6b&acdnat=1469636345\\_bd2c520cf89c1c6367b9041fc17f8a3f](http://ac.els-cdn.com/S014211230600346X/1-s2.0-S014211230600346X-main.pdf?_tid=6b78dbe4-5415-11e6-9f10-00000aab0f6b&acdnat=1469636345_bd2c520cf89c1c6367b9041fc17f8a3f)

<http://www.leonghuat.com/articles/elements.htm>

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016766369400036G>

<http://shotpeeningtraining.com>

<http://www.shotpeener.com/library/pdf/2001149.pdf>

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705810001505>

<https://www.steeltank.com/Portals/0/Articles/Effect%20of%20Chemical%20Elements%20in%20Steel.pdf>

<http://www.slideshare.net/SpringerIndia/fatigue-and-corrosion-in-metals>

<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/159029.pdf>

<http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/mathimata/2006Diaxisi.pdf>

<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/vanadium.carbide.Yamasaki.MST.2003.pdf>

<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2004/z/3750-012.pdf>

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1006706X11600770>

-----

<http://www.ecf21.eu/Drafts/1675.pdf> (1)

<https://www.google.com/patents/US3073022> (2)

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306912008953> (3)

[https://www.researchgate.net/publication/270230106\\_Effect\\_of\\_Residual\\_Stresses\\_and\\_Inclusion\\_Size\\_on\\_Fatigue\\_Resistance\\_of\\_Parabolic\\_Steel\\_Springs](https://www.researchgate.net/publication/270230106_Effect_of_Residual_Stresses_and_Inclusion_Size_on_Fatigue_Resistance_of_Parabolic_Steel_Springs) (4)

<file:///C:/Users/Phillip/Downloads/10340-40458-1-PB.pdf> (5)

[http://ac.els-cdn.com/S1359645404003672/1-s2.0-S1359645404003672-main.pdf?\\_tid=2c25a6f4-535a-11e6-9994-00000aab0f01&acdnat=1469555923\\_fd53c7c87450585c8d18a75c3ba6f089](http://ac.els-cdn.com/S1359645404003672/1-s2.0-S1359645404003672-main.pdf?_tid=2c25a6f4-535a-11e6-9994-00000aab0f01&acdnat=1469555923_fd53c7c87450585c8d18a75c3ba6f089) (6)

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112316301694> (7)

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112313003551> (8)

<http://www.gruppofrattura.it/pdf/cp/cp2003/076.pdf> (9)

- <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00255655/document> (10)
- <http://link.springer.com/article/10.1007/s40195-013-0020-4> (11)
- [http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-94-009-3459-7\\_13](http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-94-009-3459-7_13) (12)
- [https://www.researchgate.net/publication/248524859\\_Fatigue\\_behavior\\_of\\_1500\\_MPa\\_BainiteMartensite\\_Duplex-phase\\_high\\_strength\\_steel](https://www.researchgate.net/publication/248524859_Fatigue_behavior_of_1500_MPa_BainiteMartensite_Duplex-phase_high_strength_steel) (13)
- [https://www.researchgate.net/publication/248465539\\_Very\\_high\\_cycle\\_fatigue\\_behaviors\\_of\\_Mn-Si-Cr\\_series\\_BainiteMartensite\\_dual\\_phase\\_steels](https://www.researchgate.net/publication/248465539_Very_high_cycle_fatigue_behaviors_of_Mn-Si-Cr_series_BainiteMartensite_dual_phase_steels) (14)
- [https://www.researchgate.net/publication/258108284\\_Improving\\_fatigue\\_strength\\_of\\_bainite\\_martensite\\_dual-phase\\_steels\\_in\\_very\\_high\\_cycle\\_fatigue\\_regime\\_by\\_refining\\_microstructures](https://www.researchgate.net/publication/258108284_Improving_fatigue_strength_of_bainite_martensite_dual-phase_steels_in_very_high_cycle_fatigue_regime_by_refining_microstructures) (15)
- [http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-77230-9\\_7](http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-77230-9_7) (16)
- [http://file.scirp.org/pdf/JMMCE20100700004\\_25675328.pdf](http://file.scirp.org/pdf/JMMCE20100700004_25675328.pdf) (17)
- <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:550361/FULLTEXT01.pdf> (18)
- [https://books.google.gr/books?id=Hbo8dI4CqVAC&pg=PA31&lpg=PA31&dq=bainite+and+martensite+fatigue&source=bl&ots=HQtq\\_GjqbN&sig=6LYe2f-qEpuoo10eGUd2V5mQvdE&hl=el&sa=X&ved=0ahUKEwiVINbljP3OAhVEuxQKHe05CvY4ChDoAQgqMAQ#v=onepage&q&f=true](https://books.google.gr/books?id=Hbo8dI4CqVAC&pg=PA31&lpg=PA31&dq=bainite+and+martensite+fatigue&source=bl&ots=HQtq_GjqbN&sig=6LYe2f-qEpuoo10eGUd2V5mQvdE&hl=el&sa=X&ved=0ahUKEwiVINbljP3OAhVEuxQKHe05CvY4ChDoAQgqMAQ#v=onepage&q&f=true) (19)
- <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=358> (20)
- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645415301099> (21)
- [http://www.bsrm.com/resources/articles/Fatigue\\_Seminar\\_Book-Dr\\_Ahmed\\_Sharif\\_Part-I.pdf](http://www.bsrm.com/resources/articles/Fatigue_Seminar_Book-Dr_Ahmed_Sharif_Part-I.pdf) (22)
- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092150931500489X> (23)
- <http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/mathimata/2006Diaxisi.pdf> (24)
- <http://www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/ICF/ICF11/paper/viewFile/10676/10022> (25)