

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ  
ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΧΑΛΥΒΑ  
ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΜΒΛΠΤΟΤΗΤΑΣ  
ΣΕ ΑΥΤΑ**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:  
ΓΣΟΥΚΑΛΑΣ ΣΤΕΛΙΟΣ  
ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ ΜΑΡΙΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ ΚΟΚΚΙΝΟΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ 2011**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή έχει θέμα την μονοαξονική μηχανική συμπεριφορά δοκιμίων χάλυβα, εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας.

Ευχαριστούμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μας κ. Αναστάσιο Κόκκινο επιστημονικό συνεργάτη του Τμήματος Μηχανολογίας για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μας προσέφερε για την πραγματοποίηση της εργασίας, να ευχαριστήσουμε επίσης και τον καθηγητή κύριο Παναγιώτη Κακαβά για την πολύτιμη βοήθεια του και για την παραχώρηση της μηχανής εφελκυσμού που βρίσκεται στο εργαστήριο Δομικών Υλικών του τμήματος Ανακαίνισης και Αποκατάστασης Κτηρίων, στην οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα της παρούσας εργασίας. Τέλος να ευχαριστήσουμε τον κύριο Γεώργιο Γιαννόπουλο επιστημονικό συνεργάτη του Τμήματος Μηχανολογίας για τη βοήθεια που μας προσέφερε στην διαδικασία εμβάπτισης των δοκιμίων χάλυβα στους φούρνους του εργαστηρίου Τεχνολογία Μηχανολογικών Υλικών .

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή αναφέρεται στη μελέτη αντοχής σε εφελκυσμό του χάλυβα και πως αυτές επηρεάζονται από τις θερμικές κατεργασίες.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε 5 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται κάποια ιστορικά στοιχεία για το χάλυβα καθώς και οι μέθοδοι παραγωγής του χάλυβα. Ενδεικτικά αναφέρονται και κάποια από τα προϊόντα του αφού οι εφαρμογές του είναι παρά πολλές στη σημερινή εποχή.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσουμε τη μικροδομή του χάλυβα, δηλαδή την κρυσταλλογραφία του. Αφού αναλύουμε κάποιες βασικές έννοιες της δομής αυτής, αναφερόμαστε στις θερμικές κατεργασίες που μπορεί να υποστεί ο χάλυβας και πως αυτές μπορούν να επηρεάσουν την μικροδομή του και κατά συνέπεια τις χαρακτηριστικές τιμές αντοχής του στο πείραμα του εφελκυσμού.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στο αντικείμενο έρευνας της αντοχής των υλικών, καθώς επίσης και μια μικρή αναφορά στα είδη των καταπονήσεων. Στην συνέχεια υπάρχει ανάλυση της θεωρίας του εφελκυσμού σύμφωνα με το χαρακτηριστικό διάγραμμα του πειράματος του εφελκυσμού.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στην πειραματική συσκευή την εργασίας. Αναφέρονται τα είδη των μηχανών δοκιμών που υπάρχουν καθώς επίσης και τα περιφερειακά συστήματα αυτών, τα οποία είναι απαραίτητα για τον εκάστοτε έλεγχο αντοχής, που γίνεται σε μια μεγάλη γκάμα μεταλλικών αλλά και μη μεταλλικών προϊόντων.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας βρίσκεται το πειραματικό μέρος. Στο κεφάλαιο αυτό μελετάτε η αντοχή του χάλυβα σε εφελκυσμό. Στο πρώτο μέρος μελετάται η αντοχή του χάλυβα σε εφελκυσμό χωρίς κάποια θερμική κατεργασία, ενώ στο δεύτερο μέρος τα δοκίμια έχουν επεξεργαστεί θερμικά και στη συνέχεια υποβάλλονται στο πείραμα του εφελκυσμού. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων τα λαμβάνουμε με τη βοήθεια του Η/Υ που συνοδεύει τη μηχανή εφελκυσμού που χρησιμοποιήσαμε. Ενώ αυτά συγκρίνονται και με τη βιβλιογραφία γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων με την όποια εξάγουμε και τα τελικά συμπεράσματα κυρίως για τη πτώση της χαρακτηριστικής τιμής της αντοχής σε θραύση καθώς επίσης και άλλων τιμών όπως το μετρό ελαστικότητας κ.α.

Τα σπουδαιότερα συμπεράσματα που εξάγουμε από την εκπόνηση μια τέτοιας εργασίας είναι πρώτον πόσο σημαντικός είναι ο έλεγχος αντοχής των προϊόντων. Δεύτερον όσο αφορά το προϊόν του χάλυβα, παρατηρήσαμε την απόκριση του στις μεταβολές που δέχτηκε από τις θερμικές κατεργασίες.

## Πίνακας περιεχομένων

<b>1. Ο ΧΑΛΥΒΑΣ ΚΑΙ ΤΑ ΠΡΟΙΟΝΤΑ ΤΟΥ</b> .....	1
1.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΧΑΛΥΒΑ .....	1
1.2 Ο ΣΙΔΗΡΟΣ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ .....	1
1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΧΑΛΥΒΑ .....	8
1.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΧΑΛΥΒΑ .....	9
1.5 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ .....	9
1.6 ΜΟΡΦΟΣΙΔΗΡΟΣ .....	10
1.7 ΘΕΡΜΗ ΚΑΙ ΨΥΧΡΗ ΕΛΑΣΗ .....	11
1.8 ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΧΑΛΥΒΑ .....	12
<b>2. ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΑ</b>	<b>15</b>
2.1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ .....	15
2.2 Η ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ .....	16
2.2.1 Ο ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΣ ΔΕΣΜΟΣ .....	16
2.2.2 ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΑ ΠΛΕΓΜΑΤΑ .....	17
2.2.3 Η ΚΟΚΚΩΔΗΣ ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ .....	20
2.2.4 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΟΚΚΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ .....	21
2.3 ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ .....	21
2.4 Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΠΡΟΣΜΙΞΕΩΝ .....	24
2.5 ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΔΟΜΗ ΧΑΛΥΒΑ .....	24
2.6 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ .....	26
2.6.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	26
2.6.2 ΤΑΞΙΝΟΜΙΣΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ .....	26
2.6.3 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	26
2.6.4 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ .....	28
2.6.5 ΕΙΔΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ .....	28
2.6.6 Η ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΒΑΦΗΣ .....	29
2.6.7 Η ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΚΩΤΗΣ ΒΑΦΗΣ .....	29
2.6.8 Η ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ .....	30

2.6.9 Η ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΝΟΠΤΗΣΗ.....	30
2.6.10 ΑΝΟΠΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ .....	31
2.6.11 ΔΥΝΑΤΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΧΩΡΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΝΟΠΤΗΣΗ .....	32
2.6.12 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΜΒΑΠΤΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΡΕΑΣΜΟΥ.....	35
<b>3. ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ .....</b>	<b>37</b>
3.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	37
3.2 ΕΙΔΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΩΝ .....	38
3.3 ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ.....	39
3.4 Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	40
3.4.1 ΟΛΚΙΜΑ ΚΑΙ ΨΑΘΥΡΑ ΥΛΙΚΑ .....	40
3.4.2 ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΗΟΟΚΕ.....	41
3.4.3 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	41
3.5 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	42
3.5.1 ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ.....	42
3.5.2 ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ .....	43
3.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	45
<b>4. ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ .....</b>	<b>50</b>
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	50
4.2 ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ.....	50
4.3 ΔΟΚΙΜΙΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ .....	52
4.4 ΜΗΧΑΝΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ (WDW-50E) .....	53
4.5 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ.....	58
<b>5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....</b>	<b>59</b>
5.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ST37 ΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ .....	59
5.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΣΕ ΧΑΛΥΒΑ ST37 ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ .....	62
5.2.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΤΩΝ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ .....	62

5.2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ .....	63
5.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΣΕ ΧΑΛΥΒΑ ST37 ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ .....	70
5.3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΤΩΝ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ .....	70
5.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΜΒΑΠΤΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΩΡΕΣ .....	76
5.4.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΒΑΦΗΣ.....	76
5.4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΑΦΗΣ.....	77
5.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΣΕ ΒΑΜΕΝΟ ΧΑΛΥΒΑ ST37.....	81
5.5.1 ΒΑΜΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΓΙΑ 30 ΛΕΠΤΑ.....	81
5.5.2 ΒΑΜΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΓΙΑ 1 ΩΡΑ .....	83
5.5.3 ΒΑΜΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΓΙΑ 1:30 ΩΡΑ .....	86
5.5.4 ΒΑΜΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΓΙΑ 2:00 ΩΡΑ .....	88
5.5.5 ΒΑΜΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΓΙΑ 3:00 ΩΡΑ .....	90
5.5.6 ΒΑΜΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΓΙΑ 4:00 ΩΡΑ .....	92
5.5.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	94
5.6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΣΕ ΧΑΛΥΒΑ ΠΟΥ ΕΧΕΙ ΥΠΟΒΛΗΘΕΙ ΣΕ ΑΝΟΠΤΗΣΗ.....	95
5.6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	99
5.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	100
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	103

## ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

$A_t$  = η ανοιγμένη παραμόρφωση μέχρι το σημείο θραύσης

$A_{gt}$  = η ανοιγμένη παραμόρφωση μέχρι το σημείο της μέγιστης τάσης εφελκυσμού

$R_{p0.2}$  = τεχνητό όριο διαρροής



# 1. Ο ΧΑΛΥΒΑΣ ΚΑΙ ΤΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΟΥ

## 1.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΧΑΛΥΒΑ

Η αρχαιότερη γνωστή παραγωγή χάλυβα, είναι ένα κομμάτι σιδήρου το οποίο έχει ανασκαφθεί από μία αρχαιολογική περιοχή στην μικρά Ασία (Kaman-Kalehoiuk), και είναι περίπου 4000 ετών. Άλλα κομμάτια χάλυβα προέρχονται από την ανατολική Αφρική, και χρονολογούνται από το 1400 π.Χ. Τον 4ο αιώνα π.Χ. όπλα σιδήρου παρήχθησαν στην Ιβηρική χερσόνησο. Οι Κινέζοι την περίοδο 403-221 π.Χ. παρήγαγαν βαμμένο χάλυβα, ενώ οι Κινέζοι της δυναστείας Χαν (202 π.Χ. - 220 μ.Χ.), δημιούργησαν χάλυβα από την τήξη σφυρήλατου σιδήρου με χυτοσίδηρο, δημιουργώντας ένα carbon-intermediate steel από τον 1ο αιώνα μ.Χ. Οι άνθρωποι Haya της Ανατολικής Αφρικής ανακάλυψαν ένα είδος υψικαμίνου η οποία τους επέτρεψε να δημιουργήσουν σφυρήλατο χάλυβα σε θερμοκρασία  $1.802^{\circ}\text{C}$ , σχεδόν 2.000 χρόνια πριν. Αυτή η δυνατότητα δεν είχε επαναληφθεί μέχρι αιώνες αργότερα στην Ευρώπη κατά τη διάρκεια της Βιομηχανικής Επανάστασης.[9]

## 1.2 Ο ΣΙΔΗΡΟΣ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ

Ο σίδηρος πολύ σπάνια χρησιμοποιείται στη χημικά καθαρή μορφή. Συνήθως είναι αναμειγμένος με άλλα στοιχεία, όπως άνθρακα, μαγγάνιο, νικέλιο, χρώμιο, πυρίτιο, κ.α. Αναλόγως των ιδιοτήτων και του τρόπου παρασκευής τους, διακρίνουμε τις εξής γενικές κατηγορίες κραμάτων σιδήρου:

1. Ακατέργαστος χυτοσίδηρος
2. Χυτοσίδηρος χυτηρίου
3. Χάλυβες άνθρακα
4. Κράματα άνθρακα

## **1. Ακατέργαστος χυτοσίδηρος**

Ο τύπος αυτός του χυτοσιδήρου προέρχεται απ' ευθείας από την υψικάμινο υπό μορφή ακατέργαστων κομματιών διαφόρων σχημάτων. Υπό τη μορφή αυτή ο χυτοσίδηρος δε χρησιμοποιείται γιατί δεν είναι εύκολη η κατεργασία του, και δεν έχει τις κατάλληλες μηχανικές ιδιότητες. Οι περιεκτικότητες του χυτοσιδήρου αυτού σε στοιχεία είναι, σίδηρος (Fe) 92-97%, άνθρακας (C) 0.25-3.51%, μαγγάνιο (Mn) 0.5-1.5%, πυρίτιο (Si) 0.5-4%, θείο (S) 0.02-0.5% και φώσφορος (P) 0.1-0.3%.

Ο άνθρακας στο χυτοσίδηρο παρουσιάζεται με δύο μορφές, ενωμένος με το σίδηρο υπό μορφή καρβιδίου, οπότε ο χυτοσίδηρος τείνει να πάρει χρώμα προς το άσπρο, και υπό μορφή σφαιροειδούς γραφίτη οπότε ο χυτοσίδηρος έχει το χρώμα της στάχτης. Από τις δύο αυτές μορφές είναι προτιμότερη από μηχανουργική άποψη, η μορφή με τη μεγαλύτερη δυνατή περιεκτικότητα σε σφαιροειδή γραφίτη. Οι τύποι αυτοί του χυτοσιδήρου παρουσιάζουν μικρότερη σκληρότητα και ρευστότητα στην υγρή κατάσταση. Η παρουσία του πυριτίου υποβοηθά τη δημιουργία γραφίτη. Το θείο δεν είναι ιδιαίτερα επιθυμητό σε μεγάλο ποσοστό, γιατί αυξάνει τη σκληρότητα του χυτοσιδήρου. Αντίθετα, η παρουσία μαγγανίου είναι πολύ επιθυμητή γιατί δεσμεύει το θείο και έτσι μειώνει τη σκληρότητα του χυτοσιδήρου. Επίσης, αυξάνεται και ρευστότητα του μετάλλου.[5]

Η παρουσία του φωσφόρου σε μικρά ποσοστά βελτιώνει πολύ τη ρευστότητα του χυτοσιδήρου, πράγμα πολύ σημαντικό για την κατασκευή χυτών αντικειμένων. Σε μεγάλα ποσοστά, ο φώσφορος καθιστά τον χυτοσίδηρο ψαθυρό και πορώδη.

## **2. Χυτοσίδηρος χυτηρίου**

Ο ακατέργαστος χυτοσίδηρος τις υψικάμινο για να γίνει υλικό κατάλληλο για χύτευση υφίσταται διάφορες θερμικές κατεργασίες σε ρευστή κατάσταση και προστίθενται και διάφορα άλλα μέταλλα για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του. Τα συνηθισμένα στοιχεία που προστίθενται στο κράμα είναι, το νικέλιο (Ni) σε ποσοστό 2.5-6%, και σε χυτοσιδήρους μεγάλης αντοχής έως 20%, το χρώμιο (Cr) σε ποσοστό 0.5-4%, το αλουμίνιο, το μολυβδένιο (Mo), ο χαλκός (Cu), κ.α.

## **3. Χάλυβες άνθρακα**

Οι χάλυβες του τύπου αυτού περιέχουν κυρίως σίδηρο και άνθρακα σε ποσοστά που ποικίλουν από 0-1.81%. Για την παραγωγή των χαλύβων αυτών

χρησιμοποιείται ακατέργαστος χυτοσίδηρος και κομμάτια παλαιού χάλυβα, τα οποία αφού θερμανθούν μέχρι ρευστοποίησεως σε καμίνους τύπου Bessemer ή ηλεκτρικούς υφίστανται μείωση του περιεχόμενου άνθρακα με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα που διοχετεύεται στη ρευστή μάζα του μετάλλου.

Αναλόγως της περιεκτικότητας του χάλυβα σε άνθρακα μεταβάλλονται και οι μηχανικές ιδιότητες του. Γενικά, οι χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα παρουσιάζουν μεγαλύτερο σημείο θραύσεως και σκληρότητα, αλλά μικρότερη αντοχή σε κρουστικά φορτία.

Οι μηχανουργικές ιδιότητες των χαλύβων είναι δυνατό να βελτιωθούν με διάφορες μηχανικές κατεργασίες, όπως η σφυρηλάτηση ή η έλαση, καθώς και με διάφορες θερμικές κατεργασίες, όπως η ανόπτηση, η αναθέρμανση, η βαφή κ.α. Επίσης, είναι δυνατή η επιφανειακή χημική επεξεργασία του χάλυβα για τη βελτίωση τοπικά των ιδιοτήτων του. Παρόμοιες επεξεργασίες είναι η ενανθράκωση, η εναζώτωση, για την αύξηση της επιφανειακής σκληρότητας του μετάλλου, οι διάφορες επιμεταλλώσεις, κ.α. Οι κατεργασίες αυτές δεν είναι ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των χαλύβων άνθρακα αλλά χρησιμοποιούνται κατά κόρον και στα λοιπά είδη χάλυβα.

Το βασικό πλεονέκτημα των χαλύβων άνθρακα είναι η χαμηλή τιμή τους σε σχέση με τα άλλα κράματα χάλυβα, δεν παρουσιάζουν όμως την ποικιλία ιδιοτήτων που απαιτεί η σύγχρονη τεχνολογία.

#### **4. Κράματα χάλυβα**

Τα κράματα είναι δυνατόν να διαχωριστούν στις εξής κατηγορίες:

- 1) Χάλυβες μαγγανίου
- 2) Χάλυβες νικελίου
- 3) Χάλυβες νικελίου-χρωμίου, νικελίου-χρωμίου-μολυβδενίου, νικελίου-χρωμίου-βαναδίου.
- 4) Χάλυβες χρωμίου
- 5) Χάλυβες μολυβδενίου
- 6) Χάλυβες χρωμίου-μολυβδενίου
- 7) Ανοξειδωτοι χάλυβες
- 8) Χάλυβες πυριτίου
- 9) Ταχυχάλυβες

##### **1) Χάλυβες μαγγανίου**

Γενικά όλοι οι χάλυβες περιέχουν μαγγάνιο σε μικρά ποσοστά. Το μαγγάνιο σε μικρά ποσοστά 1-2% βελτιώνει την αντοχή, ολκιμότητα, και

αντοχή σε κρούση των χαλύβων άνθρακα. Το μαγγάνιο σε μεγάλα ποσοστά 10-15%, δημιουργεί με βαφή και κατεργασία εν ψυχρώ, μεγάλη επιφανειακή σκληρότητα και αντοχή σε φθορά. Η κατεργασία των χαλύβων αυτών απαιτεί κοπτικά εργαλεία μεγάλης σκληρότητας.

## **2) Χάλυβες νικελίου**

Το νικέλιο χρησιμοποιείται σε διάφορες αναλογίες που κυμαίνονται από 6 έως και άνω του 50% σε νικέλιο. Το νικέλιο σε μικρά ποσοστά βελτιώνει την αντοχή, τη σκληρότητα και την ολκιμότητα του χάλυβα. Επίσης, διευκολύνει τη θερμική κατεργασία και τη βαφή.

Σε μεγάλες περιεκτικότητες το νικέλιο αυξάνει τη σκληρότητα του χάλυβα και βελτιώνει την αντοχή σε φθορά. Επίσης μειώνει το συντελεστή διαστολής και βελτιώνει τις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού.

## **3) Χάλυβες νικελίου-χρωμίου-μολυβδενίου-βαναδίου**

Οι χάλυβες νικελίου-χρωμίου είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη κατηγορία χαλύβων. Οι χάλυβες αυτοί χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που είναι απαραίτητη η υψηλή μηχανική αντοχή και σκληρότητα.

Οι περιεκτικότητες σε στοιχεία των χαλύβων αυτών είναι:

- Άνθρακας 0.1-0.55%
- Νικέλιο 1-4.75%
- Χρώμιο 0.45-1.75%
- Μαγγάνιο 0.3-0.81%

Το μολυβδένιο προστιθέμενο στο κράμα του χρωμονικελίουχου χάλυβα βελτιώνει την αντοχή σε κρούση και διευκολύνει τις θερμικές κατεργασίες του μετάλλου, μειώνοντας έτσι το κόστος κατασκευής. Τα χρησιμοποιούμενα ποσοστά είναι 0.3-0.6%. το βανάδιο (V) χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της αντοχής του κράματος σε δυναμικά φορτία και την αύξηση της σκληρότητας. Χρησιμοποιείται σε ποσοστά 0.2%, ή και μεγαλύτερα για την κατασκευή κοπτικών εργαλείων.

## **4) Χάλυβες χρωμίου**

Το χρώμιο προστιθέμενο σε μικρά ποσοστά 0.2-6% αυξάνει το όριο θραύσεως του χάλυβα μαγγανίου.

### 5) Χάλυβες μολυβδενίου

Το μολυβδένιο προστιθέμενο σε ποσοστό 0.2-0.7% βελτιώνει την ολκιμότητα του χάλυβα άνθρακα, και χρησιμοποιείται για χύτευση, έλαση και σφυρηλάτηση.

### 6) Χάλυβες χρωμίου-μολυβδενίου

Οι χάλυβες της κατηγορίας αυτής περιέχουν χρώμιο σε ποσοστά 0.4-10% και μολυβδένιο 0.2-1.5% και παρουσιάζουν μεγάλη μηχανική αντοχή και ολκιμότητα. Χρησιμοποιούνται για χύτευση, έλαση και σφυρηλάτηση.

### 7) Ανοξειδωτοι χάλυβες

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες περιέχουν μεγάλα ποσοστά νικελίου 0-26% και χρωμίου 4-22%. Ο συνηθέστερος τύπος ανοξειδωτου χάλυβα περιέχει 18% χρώμιο και 8% νικέλιο. Οι χάλυβες αυτοί παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στην οξείδωση, και μετά από ακριβή θερμική κατεργασία, σημαντική αντοχή, ολκιμότητα και αντοχή σε κρούση.

### 8) Χάλυβες πυριτίου

Το πυρίτιο υπάρχει σε μικρά ποσοστά σε όλους τους τύπους των χαλύβων. Σε ποσοστά 0.6-0.9% το πυρίτιο αυξάνει την αντοχή του χάλυβα σε κόπωση, γι' αυτό το λόγο οι χάλυβες αυτοί χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ελατηρίων. Επίσης, ο χάλυβας με ποσοστά 0.05% άνθρακα, 0.3% μαγγάνιο και 3.4% πυρίτιο παρουσιάζει μικρή μαγνητική υστέρηση και χρησιμοποιείται για την κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών.

### 9) Ταχυχάλυβες

Για την κατασκευή κοπτικών εργαλείων χρησιμοποιούνται ειδικά κράματα χάλυβα με μεγάλες περιεκτικότητες σε βολφράμιο (W) και κοβάλτιο (Co). Τυπικές αναλογίες δίδονται στον πίνακα 1.1. Τα κράματα αυτά χρησιμοποιούνται και για την κατασκευή καλουπιών.

Η θερμική κατεργασία των κραμάτων αυτών γίνεται ως εξής: το κράμα θερμαίνεται στην αρχή πολύ αργά για να αποφευχθεί θραύση. Στη συνέχεια η θερμοκρασία πρέπει να αυξηθεί απότομα στους **800° C**, έως τη θερμοκρασία βαφής **1250 – 1400° C**.

Η βαφή γίνεται στον αέρα ή σε λάδι ή σε λειωμένο μολύβι. Στη συνέχεια ακολουθεί αναθέρμανση μέχρι τους **600° C** για την αύξηση της σκληρότητας σε 700 Brinell (HB).

**Πίνακας 1.1:** Επίδραση προσμίξεων στα κράματα χάλυβα [7]

ΣΤΟΙΧΕΙΟ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΑΣ	ΔΙΑΛΥΤΟΤΗΤΑ	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΕ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ- ΚΥΡΙΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ
Ni	γ-φερρογόνο και γραφιτίζον	10% στον α-Fe, άνευ ορίου στον γ-Fe	Προκαλεί σημαντική αύξηση της εμβαπτότητας, αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και παρεμποδίζει την ανακρυστάλλωση. Προστίθεται, επίσης, για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων και της αντοχής σε διάβρωση.
Mn	γ-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	3% στον α-Fe, άνευ ορίου στον γ-Fe	Προκαλεί μικρή αύξηση της εμβαπτότητας, πολύ μικρή αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και μεγάλη μείωση των σημείων $M_f$ και $M_s$ .
Cr	α-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	άνευ ορίου στον α-Fe, 12,8% στον γ-Fe	Προκαλεί μικρή αύξηση της εμβαπτότητας, μικρή αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και μεγάλη βελτίωση της αντοχής σε διάβρωση.
Si	α-φερρογόνο και γραφιτίζον	18,5% στον α-Fe, 6% στον γ-Fe	Προκαλεί μικρή αύξηση της εμβαπτότητας και αύξηση της σκληρότητας. Δίνει φερριτικούς χάλυβες, με μεγάλους κόκκους για ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές. Χρησιμοποιείται, επίσης, για βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων και της αντοχής σε διάβρωση.
Mo	α-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	37,5% στον α-Fe, 5% στον γ-Fe	Προκαλεί μεγάλη αύξηση της εμβαπτότητας, αύξηση της σκληρότητας και της δυσθραυστότητας, και παρεμποδίζει τη γήρανση. Προστίθεται για αύξηση της αντοχής σε επαναφορά, σε φθορά και διάβρωση και για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων.
W	α-φερρογόνο και ισχυρά καρβιδιογόνο	33,0% στον α-Fe, 6% στον γ-Fe	Προκαλεί μεγάλη αύξηση της εμβαπτότητας, αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και μηχανική φθορά, βοηθά στη διατήρηση της σκληρότητας από δευτερογενή σκλήρυνση και αποτελεί βασικό στοιχείο των ταχυχαλύβων.
V	α-φερρογόνο και πολύ ισχυρά καρβιδιογόνο	άνευ ορίου στον α-Fe, 1% στον γ-Fe	Προκαλεί πολύ μεγάλη αύξηση της εμβαπτότητας, υποβοηθά στο μέγιστο τη διατήρηση της σκληρότητας από δευτερογενή σκλήρυνση. Προστίθεται για βελτίωση αντοχής σε επαναφορά και μηχανική φθορά.
Al	α-φερρογόνο και γραφιτίζον	36,0% στον α-Fe, 1,1% στον γ-Fe	Προκαλεί μικρή αύξηση της εμβαπτότητας και παρεμποδίζει τη μεγέθυνση των κόκκων.
Ti	α-φερρογόνο και ισχυρότατα καρβιδιογόνο	6,0% στον α-Fe, 0,1% στον γ-Fe	Προκαλεί μεγάλη αύξηση της εμβαπτότητας, μικρή αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και παρεμποδίζει τη γήρανση.
Co	γ-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	75,0% στον α-Fe, άνευ ορίου στον γ-Fe	Προκαλεί μείωση της εμβαπτότητας και μεταθέτει προς τα αριστερά τις καμπύλες TTT. Βοηθά στη διατήρηση της σκληρότητας.

**Πίνακας 1.2:** Κράματα κατασκευής κοπτικών εργαλείων [5]

C	Mn	Si	W	Cr	Va	Cb	Mo
0.78	0.3	0.25	18.5	4.2	1.1	-	-
0.79	0.3	0.25	14-20	4.5	1.4	4-6	-
0.9	0.3	0.3	6	4	2-4	-	5
1.2	0.37	0.35	2.5	-	1.75-2.5	-	8.5

Η σκληρότητα αυτή δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή και επιτυγχάνεται εύκολά με κοινούς χάλυβες άνθρακα. Το βασικό πλεονέκτημα των ταχυχάλυβων είναι η ικανότητα τους να διατηρούν τη σκληρότητα αυτή σε υψηλές θερμοκρασίες έως **600° C**.

Οι ταχυχάλυβες παρά τη μεγάλη τεχνολογική πρόοδο που επέφεραν με την εμφάνισή τους, σήμερα τείνουν να αντικατασταθούν σαν κοπτικά εργαλεία από τα καρβίδια.



**Εικόνα 1.3:** Κοπτικά εργαλεία από ταχυχάλυβες

### 1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΧΑΛΥΒΑ

**Μέθοδος Bessemer:** κατά τη μέθοδο αυτή, ο κοινός χυτοσίδηρος φέρεται εντός μετατροπέα από τον πυθμένα του οποίου εμφυσείται θερμός αέρας (ή αέρας και οξυγόνο) με τη βοήθεια ακροφυσίων. Ο αέρας αυτός κατακαίει (οξειδώνει) τις ακαθαρσίες του λιωμένου χυτοσιδήρου και έτσι λαμβάνεται χυτοσίδηρος σχεδόν πλήρως απαλλαγμένος από τον άνθρακα. Στη συνέχεια προστίθεται η επιθυμητή ποσότητα του άνθρακα. Ανάλογα με την περιεκτικότητα του χυτοσιδήρου σε φώσφορο, επενδύεται και ο μετατροπέας με όξινη ή βασική επένδυση. Για χυτοσίδηρο πτωχό σε φώσφορο, η επένδυση είναι όξινη και για χυτοσίδηρο πλούσιο σε φώσφορο, βασική (μέθοδος Thoman). Η όξινη πυρίμαχη επένδυση, αποτελείται από άργιλο και διοξείδιο του πυριτίου ενώ η βασική επένδυση, είναι πλούσια σε βασικά οξείδια του οξειδίου του ασβεστίου και του οξειδίου του μαγνησίου και λαμβάνεται με πύρωση του δολομίτη. [9]

**Μέθοδος Siemens - Martin:** κατά τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται αβαθείς κάμινοι με μεγάλη επιφάνεια αντίδρασης της επένδυσης, η οποία μπορεί να είναι βασική ή όξινη. Η θερμοκρασία στην κάμινο, φθάνει τους 1500 - 1700°C. Η υψηλή θερμοκρασία και η μεγάλη επιφάνεια της επένδυσης της καμίνου, επιτρέπουν την προγραμματισμένη επίδραση των οξειδωτικών αντιδράσεων. Με τη χρήση αυτής της μεθόδου, καθίσταται δυνατή η παραγωγή χάλυβα, με διάφορους τρόπους, ανάλογα με την τροφοδοσία της καμίνου. Όπως π.χ. η ράβδος κοινού χυτοσιδήρου και μεταλλεύματος (χυτοσίδηρος περίπου 75%), η μέθοδος κοινού χυτοσιδήρου και απορριμμάτων σφυρήλατου σιδήρου και χάλυβα (χυτοσίδηρος περίπου 25%) κλπ. Η μέθοδος Siemens - Martin, είναι κατάλληλη για παραγωγή οποιουδήποτε χάλυβα και επιτρέπει μία ακριβή σύνθεση των κραμάτων.

**Μέθοδος ηλεκτρικής καμίνου:** με τη μέθοδο της ηλεκτρικής καμίνου, λαμβάνεται χάλυβας εξαιρετικής ποιότητας και γι' αυτό χρησιμοποιείται για τη βελτίωση χάλυβα Bessemer ή Siemens - Martin, καθώς επίσης και για την Παρασκευή ειδικών χαλύβων. Η θερμότητα παράγεται από ηλεκτρική ενέργεια, είτε διά σχηματισμού ηλεκτρικών τόξων μεταξύ ηλεκτροδίων από άνθρακα και του τήγματος, είτε διά καύσεως κωκ, μέσα στην υψικάμινο, με τη βοήθεια ηλεκτρικών αντιστάσεων. Στη δεύτερη περίπτωση, προστίθεται τόσο κωκ, όσο απαιτείται για την αντίδραση της αναγωγής του μεταλλεύματος.



## **1.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΧΑΛΥΒΑ**

### **1. Μέθοδος κατεργασίας**

- i) Θερμής έλασης χωρίς θερμομηχανική κατεργασία
- ii) Θερμή έλασης με θερμική κατεργασία
- iii) Ψυχρής κατεργασίας με έλαση του αρχικού προϊόντος, με στρέψη αρχικού προϊόντος που προέρχεται από θερμή έλαση ή με συνδυασμό και των δύο.

### **2. Μορφή επιφάνειας**

- i) Λείοι
- ii) Με νευρώσεις
- iii) Με κοιλότητες

### **3. Ολκιμότητα**

- i) Χαμηλής ολκιμότητας
- ii) Κανονικής ολκιμότητας
- iii) Υψηλής ολκιμότητας

### **4. Συγκολλησιμότητα**

- i) Συγκολλήσιμοι
- ii) Μη συγκολλήσιμοι

### **5. Αντοχή σε διάβρωση**

- i) Κοινοί χάλυβες
- ii) Ανοξειδωτοι χάλυβες
- iii) Ανθρακούχοι χάλυβες
- iv) Κραματωμένοι χάλυβες

## **1.5 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ**

Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων οι οποίες ενδιαφέρουν είναι:

- Όριο διαρροής και όριο θραύσης
- Η μορφή του διαγράμματος τάσεων - παραμορφώσεων
- Η ολκιμότητα
- Η αντοχή σε κόπωση

Ο υπολογισμός των απαιτήσεων οπλισμού σε μία μελέτη βασίζεται σε κατηγορία χάλυβα που αντιστοιχεί σε καθορισμένη τιμή χαρακτηριστικής αντοχής. Η αντοχή αυτή συνδέεται με το όριο διαρροής και το όριο θραύσης. Γενικά, η χαρακτηριστική αντοχή προσδιορίζεται με τις δοκιμές ελέγχου ποιότητας και είναι πιστοποιημένη.

Οι τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών, που περιγράφουν τις μηχανικές ιδιότητες του δομικού χάλυβα, προκύπτουν με τη βοήθεια πειραμάτων. Η δοκιμή σε εφελκυσμό κάτω από στατική φόρτιση αποτελεί το βασικότερο πείραμα.

Ο χάλυβας είναι κράμα που αποτελείται βασικά από δύο χημικά στοιχεία:

- Τον μεταλλικό σίδηρο (Fe)
- Τον μη μεταλλικό άνθρακα (C)

Κοντά σ' αυτό το κράμα είναι δυνατό να περιέχει κι άλλα στοιχεία σε πολύ μικρότερη αναλογία, όπως φώσφορο (P), πυρίτιο (Si), θείο (S), χαλκό (Cu), μαγνήσιο (Mg), μαγγάνιο (Mn), νικέλιο (Ni), χρώμιο (Cr) κ.λ.π.

Η ακριβής χημική σύσταση του χάλυβα ελέγχεται σε δύο στάδια κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής: Λίγο πριν από την εξέταση, δηλαδή όσο το υλικό είναι ακόμα άμορφη μάζα και μετά την εξέταση και απόψυξη, οπότε το υλικό έχει πάρει την τελική του μορφή κι είναι έτοιμο για χρήση.

## 1.6 ΜΟΡΦΟΣΙΔΗΡΟΣ

Με τον όρο μορφοσίδηρο ή δομικό χάλυβα (structural steel or mild steel) ονομάζουμε κάθε μη σληρυνόμενο χάλυβα που προορίζεται για μαζική εφαρμογή, αναφερόμαστε στο χάλυβα που υπάρχει στο εμπόριο και χρησιμοποιείται για διάφορες κατασκευές.

Οι τυπικές εφαρμογές του είναι γέφυρες, βιομηχανικά κτίρια και ουρανοξύστες, παράκτια δομήματα, σωληνώσεις μεταφοράς πετρελαίου, σωληνώσεις παροχής και αποχέτευσης στα κτίρια, σωλήνες κιγκλιδωμάτων και σωλήνες δομικών ικριωμάτων, ηλεκτρικοί πυλώνες, πλοία, αυτοκίνητα καθώς και σε πλαίσια από τα οποία οι πύραυλοι ή τα βλήματα προωθούνται, πλαίσια που κρατούν τα σήματα σιδηροδρόμου και πλαίσια που υποστηρίζουν τα βαρέλια κ.λ.π.

Στο εμπόριο ο χάλυβας συναντάται σε διάφορες μορφές διατομής όπως κυκλικής διατομής (στρογγυλά σύμφωνα με DIN1013), ορθογωνικής διατομής

(λάμες, σύμφωνα με DIN1017), τετραγωνικής διατομής, εξαγωνικής διατομής, γωνίες ισοσκελής και ανισοσκελής, IPE, UPN, ημικυκλικής διατομής.



**Εικόνα 1.4:** Προϊόντα χάλυβα

## **1.7 ΘΕΡΜΗ ΚΑΙ ΨΥΧΡΗ ΕΛΑΣΗ**

Τα προϊόντα του χάλυβα παράγονται με θερμή ή ψυχρή έλαση (διαδικασία διαμόρφωσης εν θερμώ ή εν ψυχρώ ενός μεταλλικού υλικού με τη χρήση αντίρροπα περιστρεφόμενων κυλίνδρων).

Οι χάλυβες ψυχρής έλασης ενδέχεται όμως να παρουσιάζουν σημαντική μείωση της ολκιμότητάς τους (και λόγω φαινομένων γήρανσης), καθώς και μείωση της αντοχής τους, μετά από έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως για παράδειγμα μετά από πυρκαγιά ή συγκόλληση.

Η ψυχρή έλαση επιτρέπει και την παραγωγή προϊόντων με διαστάσεις πολύ πλησιέστερες στις τελικές διαστάσεις που θέλει ο καταναλωτής. Πολλές κατηγορίες δομικού χάλυβα χρησιμοποιούνται στην κανονική τους κατάσταση, αλλά η απότομη ψύξη και αναθέρμανση είναι συγκεκριμένη για κάποιες κατηγορίες.

Κατά κανόνα, δεν είναι δυνατή η διάκριση μεταξύ χαλύβων ψυχρής και θερμής κατεργασίας μόνο με μακροσκοπική παρατήρηση (εργαστηριακός έλεγχος).



**Εικόνα 1.5:** Χύτευση χάλυβα

## **1.8 ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΧΑΛΥΒΑ**

Λόγω της βιομηχανικής κατασκοπίας που αναπτύχθηκε στα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα σε Ευρώπη και Αμερική όλοι οι κατασκευαστές ατμομηχανών, οχημάτων, σιδηροτροχιών και εργαλειομηχανών είχαν στη διάθεσή τους χυτοχάλυβα υψηλής ποιότητας. Στα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα καθιερώθηκαν οι πρώτοι τύποι χάλυβα και οι μέθοδοι ελέγχου της αντοχής τους. Αυτές οι τυποποιήσεις προκάλεσαν και σημαντικές αντιπαραθέσεις μεταξύ χαλυβουργών, κυρίως Γερμανών και Αμερικάνων, όπως συμβαίνει κατά κανόνα με όλες τις τυποποιήσεις βιομηχανικών προϊόντων. Κύριο πρόβλημα κατά την τυποποίηση του χάλυβα ήταν να αντιμετωπιστεί με χαμηλό κόστος ο αυξανόμενος αριθμός αστοχιών του υλικού, όπως εκρήξεις λεβήτων, θραύσεις

αξόνων και σιδηροτροχιών κ.ά. Οι Γερμανοί παραγωγοί επιθυμούσαν να προσδιορίζονται οι ποιότητες χάλυβα από την αντοχή σε εφελκυσμό και τίποτα επιπλέον. Άλλα τυποποιητικά χαρακτηριστικά, όπως η περιεκτικότητα σε άνθρακα ή η καταλληλότητα για ηλεκτροσυγκολλήσεις απορρίπτονταν. Οι Αμερικάνοι, από την άλλη πλευρά ενδιαφέρονταν κυρίως να καθιερωθεί ο χαρακτηρισμός των τύπων του χάλυβα σύμφωνα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα.

Η θεμελιώδης ανάγκη των κοινωνιών για ανταλλαξιμότητα και συμβατότητα και οι απαιτήσεις μιας όλο και περισσότερο σφαιρικής οικονομίας για ομοιομορφία, οδήγησε στη δημιουργία προτύπων και κωδίκων και στον γρήγορο πολλαπλασιασμό τους στις προηγούμενες δύο δεκαετίες. Τα "πρότυπα" ορίζονται ως κάτι που εξετάζεται από μία αρχή ή από τη γενική συγκατάθεση ως βάση της σύγκρισης, καθιερώνουν συνήθως τις ανοχές και τους διάφορους φυσικούς παράγοντες, όπως οι διαστάσεις, τακτοποιήσεις, μορφές και ο τρόπος εσωτερικής παραγωγής. Οι "κώδικες" λένε στον χρήστη τι να κάνουν και κάτω από ποιες περιστάσεις να το κάνουν.

Τα κυριότερα πρότυπα τυποποίησης χάλυβα είναι:

- **ASTM:** Αμερικανικά πρότυπα. Εδώ χρησιμοποιούνται εναλλακτικοί όροι, π.χ. σε ASTM A 515 ο βαθμός προσδιορίζει το επίπεδο δύναμης ενώ σε ASTM A 302 ο βαθμός δείχνει τις απαιτήσεις και για τη χημική σύνθεση και για τις μηχανικές ιδιότητες. Γενικότερα σε αυτά τα πρότυπα το A είναι το γράμμα για τα σιδηρούχα υλικά και ένας αυθαίρετος, σειριακά ορισμένος αριθμός, εντούτοις ο αριθμός αυτός δεν είναι πάντα επαρκής για να περιγράψει εντελώς ένα προϊόν χάλυβα.
- **DIN:** Γερμανικά πρότυπα. Αναπτύσσονται από Deutsches Institute Normung στην Ομοσπονδιακή Δημοκρατία της Γερμανίας. Οι γερμανικές προδιαγραφές χάλυβα προηγούνται με τα κεφαλαία γράμματα DIN και ακολουθούν έναν αλφανουμερικό ή αριθμητικό κώδικα. Η τελευταία μέθοδος, γνωστή ως αριθμός Werkstoff, χρησιμοποιεί τους αριθμούς μόνο με ένα δεκαδικό μετά από το πρώτο ψηφίο, π.χ. MU St37-2 σημαίνει (M=χάλυβας παραγόμενος με τήξη σε κάμινο Siemens Martin), (U=ακατεύναστος χάλυβας), (St=χάλυβας-steel), (37=θα πρέπει ο χάλυβας να έχει όριο διαρροής μεγαλύτερο από 370 MPa), (2= υποδηλώνει την ποιοτική ομάδα).

- **JIS:** Ιαπωνικά πρότυπα. Αναπτύσσονται από την ιαπωνική επιτροπή βιομηχανικών προτύπων, η οποία είναι μέρος του Υπουργείου Διεθνούς Εμπορίου και Βιομηχανίας στο Τόκιο. Οι προδιαγραφές χάλυβα JIS αρχίζουν με τα κεφαλαία γράμματα JIS και ακολουθούνται με κεφαλαία γράμματα (γ στην περίπτωση άνθρακα και των χαμηλού σε κράματα σιδήρου μέταλλα). Αυτό το γράμμα ακολουθείται με σειρά αριθμών και γραμμάτων που δείχνουν το συγκεκριμένο χάλυβα.
- **UNI:** Ιταλικά πρότυπα. Αναπτύσσονται από το Ente Nazionale Italiano Di Unificazione στο Μιλάνο της Ιταλίας. Προηγούνται με το κεφαλαίο γράμμα UNI που ακολουθείται από έναν τετραψήφιο κώδικα μορφής προϊόντων που ακολουθείται στη συνέχεια από έναν αλφανουμερικό προσδιορισμό κραμάτων.
- **SS:** Σουηδικά πρότυπα. Αναπτύσσονται από το σουηδικό ίδρυμα προτύπων στην Στοκχόλμη .Οι προσδιορισμοί αρχίζουν με τα γράμματα SS που ακολουθούνται από τον αριθμό 14 για όλους τους χάλυβες. Αυτό που ακολουθεί στη συνέχεια είναι μία αριθμητική ακολουθία 4 ψηφίων παρόμοια με τον γερμανικό αριθμό Werkstoff.
- **AFNOR:** Γαλλικά πρότυπα. Αναπτύσσονται από την ένωση Francaise de Normalisation στο Παρίσι. Ένα κεφαλαίο NF τοποθετείται αριστερά του αλφανουμερικού κώδικα ο οποίος αποτελείται από μία κεφαλαία επιστολή που ακολουθείται από μία σειρά ψηφίων τα οποία με τη σειρά τους ακολουθούνται από μία αλφανουμερική ακολουθία.
- **BS:** Βρετανικά πρότυπα. Αναπτύσσονται από το βρετανικό ίδρυμα προτύπων στο Λονδίνο της Αγγλίας. Όπως και στα πρότυπα JIS, κάθε βρετανικός προσδιορισμός περιλαμβάνει μία μορφή προϊόντων και ένα κώδικα κραμάτων. [9]

## 2. ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΑ

### 2.1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Τα μέταλλα παρουσιάζουν χαρακτηριστικές φυσικές ιδιότητες. Αυτές είναι:

- Η μεταλλική λάμψη
- Η στερεά κατάσταση στις συνθήκες περιβάλλοντος πλην του υδραργύρου
- Το μεγάλο ειδικό βάρος
- Η υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα
- Η καλή μηχανική αντοχή

Επίσης:

- Μπορούν να πάρουν τη μορφή σύρματος ή ράβδου, δηλαδή είναι όλκιμα υλικά.
- Μπορούν να πάρουν τη μορφή ελασμάτων, δηλαδή είναι ελατά υλικά.
- Επηρεάζουν το μαγνητικό πεδίο. Η επιρροή στο μαγνητικό πεδίο είναι πολύ έντονη στο σίδηρο, στο νικέλιο και στο κοβάλτιο.

Οι παραπάνω ιδιότητες, μεμονωμένες, δεν αρκούν για να χαρακτηρίσουμε κάποιο υλικό ότι είναι μέταλλο π.χ.:

- Μεταλλική λάμψη παρουσιάζουν και αρκετά αμέταλλα (π.χ. αντιμόνιο).
- Καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα μπορούμε να συναντήσουμε και σε πολλά ακόμη υλικά (π.χ. άνθρακας).

Κατά συνέπεια, για να χαρακτηρίσουμε κάποιο υλικό ως μέταλλο, θα πρέπει να δούμε αν έχει όλες μαζί τις ιδιότητες που προαναφέραμε.

Ο βαθμός που παρουσιάζει ένα μέταλλο την κάθε ιδιότητά του ποικίλλει.  
π.χ.:

- Το αλουμίνιο μπορεί να λάβει μορφή λεπτών αλλά ανθεκτικών ελασμάτων, όπως είναι το γνωστό σε όλους αλουμινόχαρτο. Τα περισσότερα από τα άλλα μέταλλα δε διαμορφώνονται σε ελάσματα πάχους μικρότερου από 0,1 mm.
- Ο χαλκός παρουσιάζει 6,5 φορές μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα και 6 φορές μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα από το σίδηρο.

Το τιτάνιο παρουσιάζει τριπλάσια μηχανική αντοχή από το σίδηρο.

## 2.2 Η ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Η δομή των μετάλλων παρουσιάζει τις εξής δύο χαρακτηριστικές ιδιότητες:

- Το μεταλλικό δεσμό
- Η μάζα τους αποτελείται από κόκκους κρυστάλλων

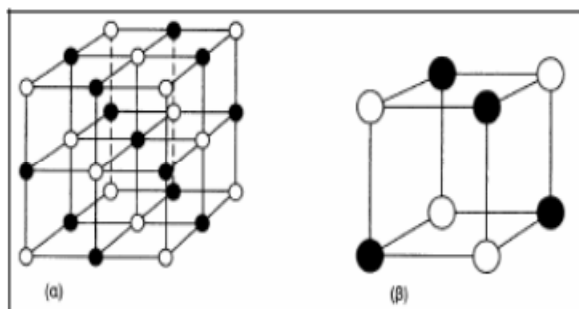
Στη συνέχεια αναπτύσσονται αυτά τα δύο χαρακτηριστικά της δομής των μετάλλων.

### 2.2.1 Ο ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΣ ΔΕΣΜΟΣ

Για να αναλύσουμε τη δομή της κρυσταλλογραφίας του μετάλλου θα πρέπει πρώτα να εξηγήσουμε μερικές βασικές έννοιες της.

- Κρυσταλλική δομή είναι η διάταξη ατόμων στο χώρο που παρουσιάζει τριπλή περιοδικότητα, δηλαδή υφίσταται μια δομική μονάδα που επαναλαμβάνεται στις 3 διευθύνσεις. Σχ. 2.1(α).
- Στοιχειώδες κύτταρο είναι η δομική μονάδα, από την οποία προκύπτει η κρυσταλλική δομή. Σχ. 2.1(β).
- Κρύσταλλος ή κόκκος είναι το τμήμα στερεού που έχει σε όλη του την έκταση την ίδια συνεχή κρυσταλλική δομή.
- Κρυσταλλικό πλέγμα είναι η διάταξη σε κανονικές πολυεδρικές μορφές των πυρήνων των ατόμων.
- Κυψελίδα είναι παραλληλεπίπεδο, το οποίο περιέχει οπωσδήποτε έναν κόμβο και επαναλαμβανόμενο στις 3 διαστάσεις αναπαράγει το κρυσταλλικό πλέγμα.





Σχήμα 2.1: (α) κρυσταλλική δομή, (β) στοιχειώδες κύτταρο

## 2.2.2 ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΑ ΠΛΕΓΜΑΤΑ

Για τον χαρακτηρισμό των κρυσταλλικών πλεγμάτων και συστημάτων ακολουθείται η εξής ορολογία

**Κυβικό:** Το γεωμετρικό σχήμα κυψελίδας είναι κύβος.

**Τετραγωνικό:** Το γεωμετρικό σχήμα κυψελίδας είναι ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με βάση τετράγωνο.

**Ορθορομβικό:** Το γεωμετρικό σχήμα κυψελίδας είναι ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με βάση ορθογώνιο.

**Ρομβοεδρικό:** Το γεωμετρικό σχήμα κυψελίδας είναι παραλληλεπίπεδο με όλες τις έδρες του ίσους ρόμβους.

**Μονοκλινές:** Το γεωμετρικό σχήμα κυψελίδας είναι παραλληλεπίπεδο με τις δύο βάσεις του και το ένα ζεύγος παράλληλων εδρών ορθογώνια, ενώ το τρίτο ζεύγος παράλληλων εδρών απλά παραλληλόγραμμα.

**Τρικλινές:** Το γεωμετρικό σχήμα κυψελίδας είναι παραλληλεπίπεδο με όλες τις έδρες του παραλληλόγραμμα.

**Εξαγωνικό:** Το γεωμετρικό σχήμα του στοιχειώδους κυττάρου είναι ορθό κανονικό εξαγωνικό πρίσμα, η δε κυψελίδα είναι ορθό πρίσμα με βάση ρόμβο.


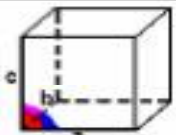



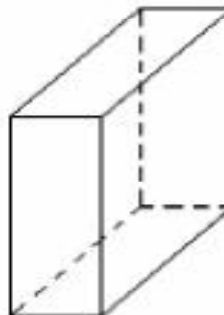








**Χωροκεντρωμένο:** Περιλαμβάνει ένα άτομο στο κέντρο βάρους του στοιχειώδους κυττάρου.

**Εδροκεντρωμένο:** Περιλαμβάνει ανά ένα άτομο στο κέντρο βάρους κάθε έδρας του στοιχειώδους κυττάρου.

**Βασικοκεντρωμένο:** Περιλαμβάνει ανά ένα άτομο στο κέντρο βάρους των δύο βάσεων μόνο του στοιχειώδους κυττάρου.

**Μέγιστης πυκνότητας:** Χρησιμοποιείται μόνο για το εξαγωνικό πλέγμα. Πρόκειται για βασικο-κεντρωμένο πλέγμα που έχει επιπλέον άλλα 3 άτομα στο μέσο της απόστασης (ύψος) που ενώνει τα κέντρα βάρους των απέναντι τριγώνων που σχηματίζονται από τις διαγωνίους των εξαγωνικών βάσεων και δεν γειτνιάζουν μεταξύ τους (πάνω στη βάση που ανήκουν). [7]

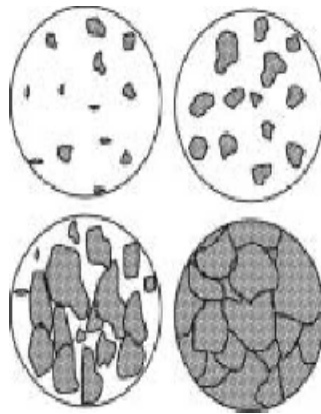
Πίνακας 2.2: Τα 14 κρυσταλλικά πλέγματα και τα 7 κρυσταλλικά συστήματα [7]

ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΑ ΠΛΕΓΜΑΤΑ		ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	
		ΚΥΨΕΛΙΔΑ	
 <p>ΚΥΒΙΚΟ    ΕΔΡΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟ ΚΥΒΙΚΟ    ΧΩΡΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟ ΚΥΒΙΚΟ</p>	 <p><math>\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ</math> <math>a = b = c</math></p> <p>ΚΥΒΙΚΟ</p>		
 <p>ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟ    ΧΩΡΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟ</p>	 <p><math>\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ</math> <math>a = b \neq c</math></p> <p>ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟ</p>		
 <p>ΟΡΘΟΡΟΜΒΙΚΟ    ΒΑΣΙΚΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟ ΟΡΘΟΡΟΜΒΙΚΟ    ΕΔΡΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟ ΟΡΘΟΡΟΜΒΙΚΟ</p> <p>ΧΩΡΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟ ΟΡΘΟΡΟΜΒΙΚΟ</p>	 <p><math>\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ</math> <math>a \neq b \neq c</math></p> <p>ΟΡΘΟΡΟΜΒΙΚΟ</p>		
 <p>ΡΟΜΒΟΕΔΡΙΚΟ</p>	 <p><math>\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ</math> <math>a = b = c</math></p> <p>ΡΟΜΒΟΕΔΡΙΚΟ</p>		
 <p>ΜΟΝΟΚΛΙΝΕΣ    ΒΑΣΙΚΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟ ΜΟΝΟΚΛΙΝΕΣ</p>	 <p><math>\alpha = \gamma = 90^\circ</math> <math>\beta \neq 90^\circ</math> <math>a \neq b \neq c</math></p> <p>ΜΟΝΟΚΛΙΝΕΣ</p>		
 <p>ΤΡΙΚΛΙΝΕΣ</p>	 <p><math>\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ</math> <math>a \neq b \neq c</math></p> <p>ΤΡΙΚΛΙΝΕΣ</p>		
 <p>ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΕΞΑΓΩΝΙΚΟ</p>	 <p><math>\alpha = \beta = 90^\circ</math> <math>\gamma = 120^\circ</math> <math>a = b \neq c</math></p> <p>ΕΞΑΓΩΝΙΚΟ</p>		

### 2.2.3 Η ΚΟΚΚΩΔΗΣ ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Η μάζα ενός μεταλλικού τεμαχίου αποτελείται από πολλούς κρυστάλλους που τους ονομάζουμε «κόκκους» και που στον κάθε ένα από αυτούς τα άτομα είναι διατεταγμένα με μία γεωμετρική μορφή, όπως αυτή που είδαμε στο σχήμα (2.1). Ο σχηματισμός των κόκκων οφείλεται στον τρόπο που παράγονται τα μέταλλα. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στις διαδοχικές φάσεις του σχήματος (2.3).

Στην αρχή το μέταλλο βρίσκεται σε υγρή μορφή, κάτω από υψηλή θερμοκρασία. Ενώ η θερμοκρασία αρχίζει να ελαττώνεται, αρχίζει η στερεοποίηση. Τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα φαίνονται στο σχήμα (2.3) και μπορούν να περιγραφούν ως εξής:



**Σχήμα 2.3:** Οι διαδοχικές φάσεις στερεοποίησης του μετάλλου και ο σχηματισμός των κόκκων

- Σε διάφορα σημεία της μάζας του ρευστού μετάλλου αρχίζει η στερεοποίηση. Εμφανίζονται οι πρώτοι μικροί κρύσταλλοι.
- Πάνω στους πρώτους κρυστάλλους προσκολλώνται συνεχώς νέα άτομα. Συγχρόνως εμφανίζονται και νέοι κρύσταλλοι.
- Όταν το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του μετάλλου έχει ενσωματωθεί στους κρυστάλλους, αυτοί θα αρχίσουν να έρχονται σε επαφή μεταξύ τους.

Όταν η θερμοκρασία ελαττωθεί κάτω από το σημείο πήξης, τότε όλη η μάζα του μετάλλου έχει στερεοποιηθεί και οι κόκκοι έχουν ενωθεί μεταξύ τους.

Στα σημεία επαφής των κόκκων, η πολυεδρική διάταξη του σχήματος (2.1) έχει διαταραχτεί. Τα άτομα βρίσκουν τις θέσεις ισορροπίας τους αλλά με ακανόνιστες μορφές.

Η παραπάνω διαδικασία στερεοποίησης του μετάλλου καταλήγει σε μία δομή στην οποία έχουμε:

- Τους κόκκους του μετάλλου με την κανονική κρυσταλλική δομή τους
- Τις επιφάνειες που ενώνονται οι κόκκοι μεταξύ τους, οι οποίες αποτελούν περιοχές ακαταστασίας της κρυσταλλικής δομής.

#### **2.2.4 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΟΚΚΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ**

Ένα μέταλλο, που θα αποτελέιτο από ένα και μοναδικό κρύσταλλο, θα έσπαγε πολύ εύκολα. Οι καλές μηχανικές ιδιότητες (αντοχή, ελαστικότητα) οφείλονται στην αντοχή που παρουσιάζουν τα σημεία που ενώνονται οι κόκκοι μεταξύ τους. Όσο μικρότεροι είναι οι κόκκοι ενός μεταλλικού τεμαχίου, τόσο καλύτερες είναι οι μηχανικές του ιδιότητες.

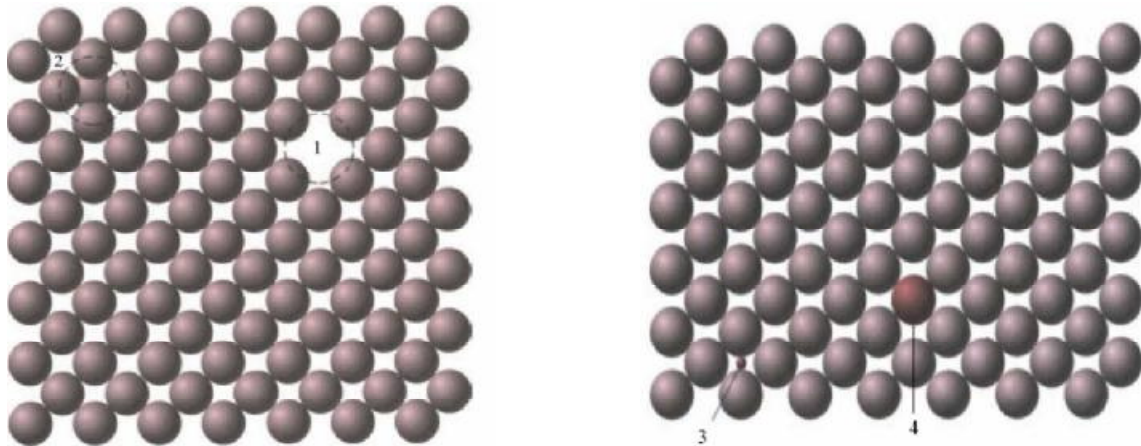
Το μέγεθος των κόκκων ποικίλλει. Για να δοθεί μία ιδέα για το μέγεθός τους, αναφέρουμε ότι η μέση διάμετρος στους χάλυβες κυμαίνεται από 0,022 mm μέχρι 0,25 mm. Οι χάλυβες με μέσο μέγεθος κόκκου μικρότερο από 0,088 mm ονομάζονται λεπτόκοκκοι, ενώ πάνω από αυτό το όριο ονομάζονται χοντρόκοκκοι.

#### **2.3 ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ**

Η δομή των πραγματικών κρυσταλλικών υλικών διαφέρει πολύ από την ιδανική τους δομή. Τα κρυσταλλικά υλικά παρουσιάζουν διαφορές ατέλειες οι οποίες επηρεάζουν τις ιδιότητες τους. Έτσι η θεωρητική αντοχή για παράδειγμα του ιδανικού κρυσταλλικού υλικού είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του πραγματικού. Οι ατέλειες που εμφανίζονται στη κρυσταλλική δομή διακρίνονται ανάλογα με τις διαστάσεις και τη γεωμετρική τους μορφή σε:

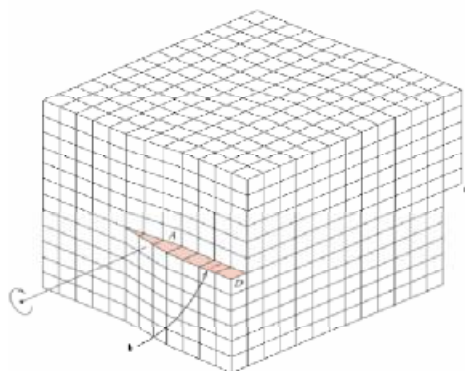
1. Σημειακές ατέλειες
2. Γραμμικές ατέλειες
3. Επιφανειακές ατέλειες
4. Χωρικές ατέλειες

**Σημειακές ατέλειες:** Είναι ατέλειες που περιορίζονται σε μικρό χώρο με διαστάσεις της τάξης των ατόμων του κρυστάλλου. Οι ατέλειες αυτές παρουσιάζονται όταν άτομα άλλης ύλης καταλαμβάνουν θέσεις μέσα στο πλέγμα του κρυστάλλου ή όταν κανονικές θέσεις ατόμων παραμένουν κενές ή όταν άτομα της ύλης διαχέονται σε ενδιάμεσες θέσεις του πλέγματος όπως φαίνεται στην εικόνα 2.4.



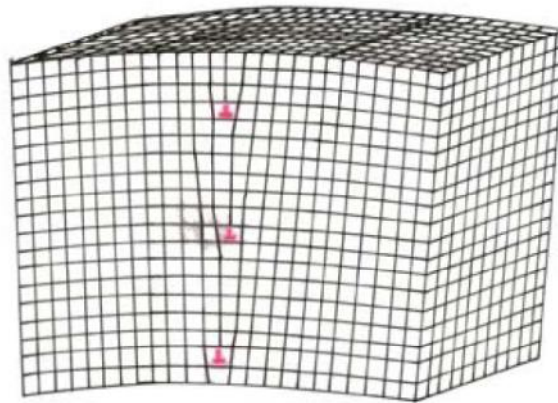
**Εικόνα 2.4:** 1: κενή θέση, 2: ενδιάμεσο άτομο, 3,4: ενδιάμεσα διαφορετικά άτομα (ακαθαρσίες)

**Γραμμικές ατέλειες:** Γραμμικές χαρακτηρίζονται εκείνες οι ατέλειες οι οποίες αναπτύσσονται μέσα στον κρύσταλλο κατά μήκος γραμμών όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5. Οι ατέλειες αυτές ονομάζονται και μεταστάσεις ή καταναγκασμοί. Οι γραμμικές ατέλειες δημιουργούνται στο στάδιο της κρυστάλλωσης και οφείλονται στις μεγάλες διαφορές τάσεων και θερμοκρασίες μέσα στην ύλη. Στην ύπαρξη των γραμμικών ατελειών οφείλει ένα μεταλλικό υλικό την ικανότητα του να μπορεί να διαμορφώνεται σε πρέσες. Επίσης στις ατέλειες αυτές οφείλεται η τόσο μεγάλη διαφορά της αντοχής από τους αντίστοιχους ιδανικούς κρυστάλλους



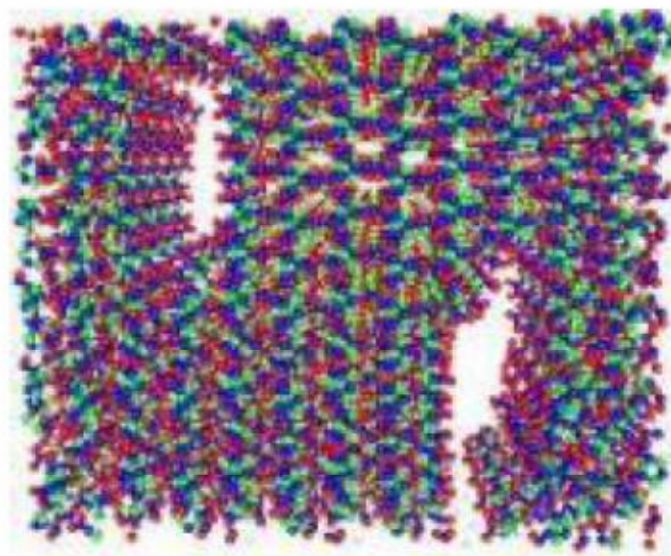
**Εικόνα 2.5:** Γραμμικές ατέλειες

**Επιφανειακές ατέλειες:** Στις ατέλειες αυτές ανήκουν τα όρια των κόκκων. Τα όρια των κόκκων είναι επιφάνειες οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν σαν ατέλειες του κρυσταλλικού πλέγματος όπως φαίνεται στην εικόνα 2.6. Οι ατέλειες αυτές παίζουν μεγάλο ρόλο σε πολλά φαινόμενα όπως στην πλαστική παραμόρφωση με ολίσθηση των κόκκων σε μεγάλες θερμοκρασίες. Ακόμα στις περιοχές αυτές συσσωρεύονται διάφορες ακαθαρσίες (άτομα άλλων στοιχείων) με αποτέλεσμα την αλλοίωση των ιδιοτήτων του υλικού.



**Εικόνα 2.6:** Επιφανειακές ατέλειες

**Χωρικές ατέλειες:** Οι ατέλειες αυτές εκτείνονται σε 3 διαστάσεις όπως είναι οι περιοχές συσσώρευσης κενών θέσεων ατόμων, ρωγμές, εγκλωβισμοί, κ.λ.π όπως φαίνεται στην εικόνα 2.7. Οι χωρικές ατέλειες προκύπτουν κατά την παραγωγή του υλικού και επηρεάζουν την μηχανική συμπεριφορά. Συντείνουν στη διάδοση ρωγμών και οδηγούν στη μηχανική θραύση του υλικού. [2]



**Εικόνα 2.7:** Χωρικές ατέλειες

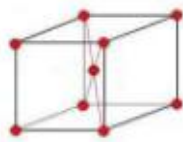
## 2.4 Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΠΡΟΣΜΙΞΕΩΝ

Η κρυσταλλική μορφή μέσα στον κάθε κόκκο διαταράσσεται εξαιτίας ξένων προσμίξεων. Δεν υπάρχει τρόπος παραγωγής απόλυτα καθαρού μετάλλου. Τα άτομα των προσμίξεων εισέρχονται στην κρυσταλλική δομή των κόκκων και την ανατρέπουν. Συχνά, επίσης, δημιουργούν χημικές ενώσεις οι οποίες διασπείρονται μέσα στη μάζα του μετάλλου.

Με τη χρήση των κατάλληλων προσμίξεων, βελτιώνονται οι ιδιότητες των μετάλλων και προκύπτουν κράματα διαφορετικών μηχανικών και χημικών ιδιοτήτων π.χ. παράγονται κράματα με μεγάλη μηχανική αντοχή ή με μεγάλη ελαστικότητα ή με αντοχή στην οξείδωση κτλ. Υπάρχουν όμως και ανεπιθύμητες προσμίξεις, οι οποίες ονομάζονται ακαθαρσίες και μειώνουν τη μηχανική αντοχή του μετάλλου.

## 2.5 ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΔΟΜΗ ΧΑΛΥΒΑ

Στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η κρυσταλλική δομή των ανθρακούχων χαλύβων είναι όπως του σχήματος (2.8), δηλαδή έχουμε ένα άτομο στο κέντρο ενός κύβου και από ένα σε κάθε ακμή. Η μορφή αυτή ονομάζεται σίδηρος «α». Στους 20°C, η περιεκτικότητα του σιδήρου «α» σε άνθρακα δεν υπερβαίνει το 0,006%. Το συνδυασμό αυτό του σιδήρου «α» με τον άνθρακα τον ονομάζουμε φερρίτη.

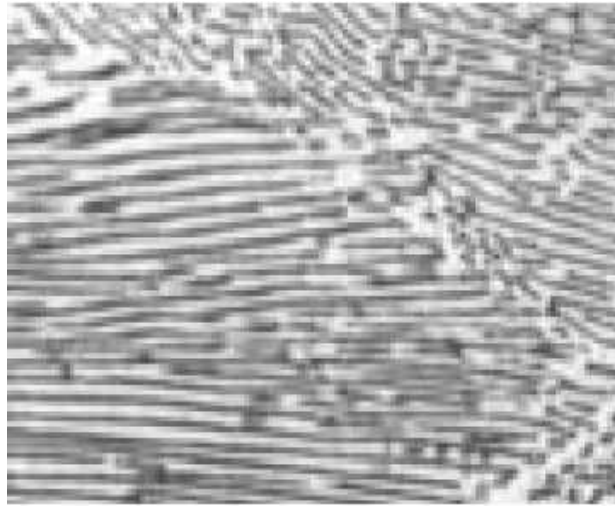


**Σχήμα 2.8:** Η κυψελίδα της κρυσταλλικής δομής του σιδήρου «α»

Η υπόλοιπη ποσότητα του άνθρακα είναι σε μορφή χημικής ένωσης με το σίδηρο ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) η οποία ονομάζεται σεμεντίτης. Οι χημικές ενώσεις των μετάλλων με τον άνθρακα, όπως είναι ο σεμεντίτης, ονομάζονται καρβίδια. Ο σεμεντίτης είναι πολύ σκληρό και εύθραυστο υλικό.

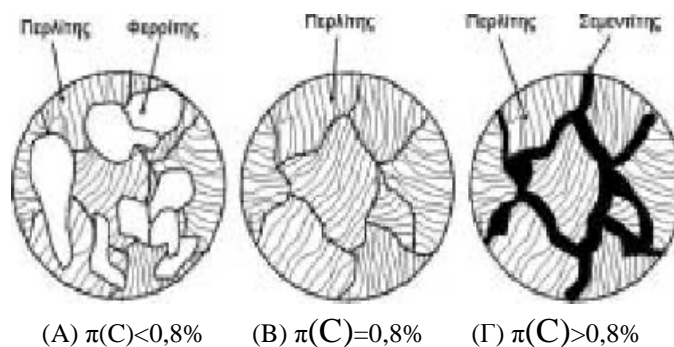
Ο φερρίτης και ο σεμεντίτης βρίσκονται ανακατεμένοι μεταξύ τους. Ο συνδυασμός αυτός ονομάζεται περλίτης. Η μορφή του περλίτη, κάτω από μικροσκόπιο, είναι όπως στο σχήμα (2.9). Διακρίνουμε ταινίες από φερρίτη και ταινίες από σεμεντίτη. Οι ταινίες του φερρίτη είναι παχύτερες από του σεμεντίτη. Η περιεκτικότητα του περλίτη σε άνθρακα είναι 0,8%.





**Σχήμα 2.9:** Η μορφή των κόκκων του περλίτη. Οι μαύρες ταινίες είναι ο σεμεντίτης και οι λευκές ο φερρίτης.

Οι ανθρακούχοι χάλυβες περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό πολύ μικρότερο του 0,8%. Κατά συνέπεια, αποτελούνται από δύο ειδών κόκκους: του φερρίτη και του περλίτη. Τη μορφή αυτή τη βλέπουμε στο σχήμα (2.10), περίπτωση (Α). Όταν η περιεκτικότητα είναι ακριβώς 0,8% σε άνθρακα, τότε θα έχουμε αποκλειστικά κόκκους περλίτη και η μορφή θα είναι όπως η περίπτωση (Β).



**Σχήμα 2.10:** Η μορφή των κόκκων των ανθρακούχων χαλύβων, ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα

Όταν υπερβεί και το 0,8%, θα έχουμε κόκκους περλίτη που θα περιβάλλονται από σεμεντίτη, όπως φαίνεται στην περίπτωση (Γ). Τότε έχουμε μία εύθραυστη αλλά σκληρή μορφή χάλυβα.

## **2.6 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ**

### **2.6.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Θερμική κατεργασία είναι σύνολο διεργασιών που περιλαμβάνει τη θέρμανση και ψύξη μεταλλικού προϊόντος σε στερεά κατάσταση και σε καθορισμένες θερμοκρασιακές και χρονικές συνθήκες.

Σκοπός μιας θερμικής κατεργασίας είναι η πρόσδοση στο μεταλλικό υλικό δομικής και εντατικής κατάστασης τέτοιας, που να οδηγεί στην εξασφάλιση συγκεκριμένων αναγκαίων και επιθυμητών ιδιοτήτων σ' αυτό. [7]

### **2.6.2 ΤΑΞΙΝΟΜΙΣΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

#### **A. Ανάλογα με την τροποποίηση των ιδιοτήτων του υλικού**

Προκαταρκτικές ή ενδιάμεσες, όταν τροποποιούνται οι τεχνολογικές ιδιότητες του υλικού που σχετίζονται με την κατεργασιμότητά του.

Δευτερεύουσες ή τελικές, όταν τροποποιούνται οι λειτουργικές ιδιότητες του υλικού που σχετίζονται με την χρηστικότητα του τελικού προϊόντος.

#### **B. Ανάλογα τη σταθερότητα της προσδιδόμενης δομής**

- Κατεργασίες ανόπτησης, που οδηγούν σε σταθερές δομές.
- Κατεργασίες σκλήρυνσης, που οδηγούν σε μετασταθείς δομές (εκτός ισορροπίας). [7]

### **2.6.3 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Σε μια θερμική κατεργασία μπορεί να συναντηθούν οι ακόλουθες διεργασίες:

- Θέρμανση σε μια υψηλή θερμοκρασία για χρονικό διάστημα αναγκαίο προς απόκτηση σταθερής δομής.
- Ψύξη μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ή μέχρι μια ενδιάμεση θερμοκρασία με βύθιση σε κάποιο λουτρό βαφής.
- Παραμονή σε ενδιάμεση θερμοκρασία για σχετικά ικανό χρονικό διάστημα.

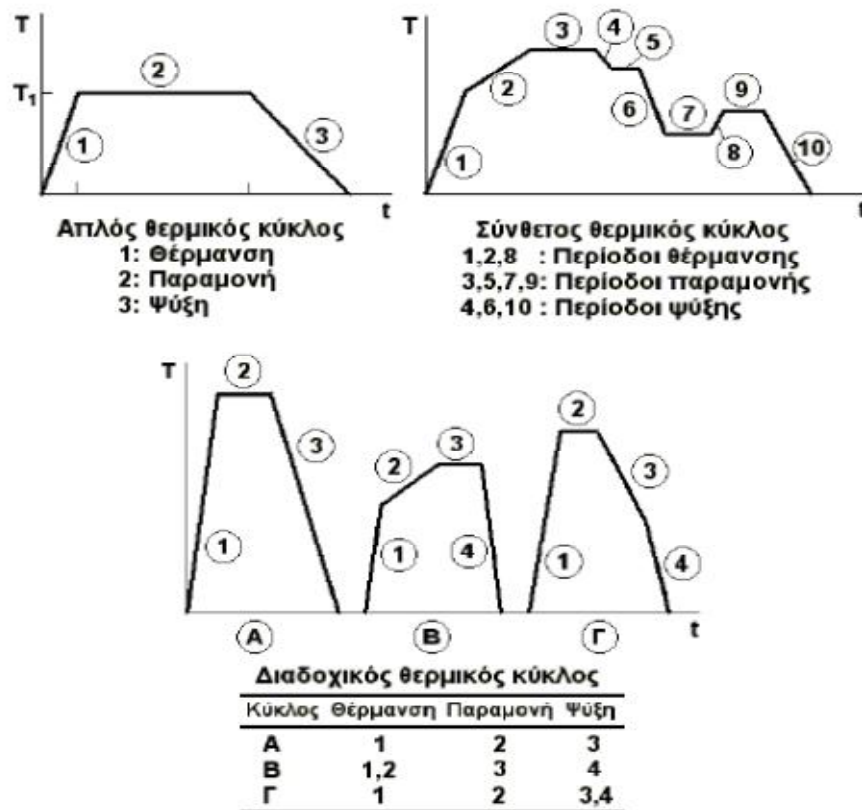
Θερμικός κύκλος μιας θερμικής κατεργασίας είναι το διάγραμμα θερμοκρασίας (T) - χρόνου (t) που αποτυπώνει/περιγράφει όλες τις χαρακτηριστικές

διεργασίες αυτής. Στο Σχ. 12 παρουσιάζονται χαρακτηριστικοί τύποι θερμικών κύκλων που εφαρμόζονται στην πράξη. [7]

**Παράμετροι θερμικής κατεργασίας:** Στον Πίνακα 2.11 παρουσιάζονται οι παράμετροι των φάσεων μιας θερμικής κατεργασίας (θέρμανση, παραμονή, ψύξη).

**Πίνακας 2.11:** παράμετροι θερμικής κατεργασίας [7]

Θέρμανση	Παραμονή	Ψύξη
$T_s$ ( $^{\circ}\text{C}$ ): θερμοκρασία θέρμανσης $t_s$ (min ή h): διάρκεια θέρμανσης $v_H = \Delta T / \Delta t$ : ταχύτητα θέρμανσης <b>Μέσο θέρμανσης</b> (κλίβανοι ή λουτρά αλάτων) <b>Χαρακτηριστικά τεμαχίου</b> (Μέγεθος, σχήμα, πολυπλοκότητα μορφής, φυσική κατάσταση, πλήθος)	$t$ (min ή h): διάρκεια παραμονής <b>Μέσο παραμονής</b> (ταυτόσημο με το μέσο θέρμανσης)	$t_w$ (min ή h): διάρκεια ψύξης $v_w = \Delta T / \Delta t$ : ταχύτητα ψύξης <b>Μέσο ψύξης</b> (νερό, λάδι, αέρας, ειδικοί κλίβανοι απόψυξης) <b>Χαρακτηριστικά τεμαχίου</b> (Μέγεθος, σχήμα, πολυπλοκότητα μορφής, φυσική κατάσταση, πλήθος)



**Σχήμα 2.12:** Χαρακτηριστικοί τύποι θερμικών κύκλων [7]

## 2.6.4 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ

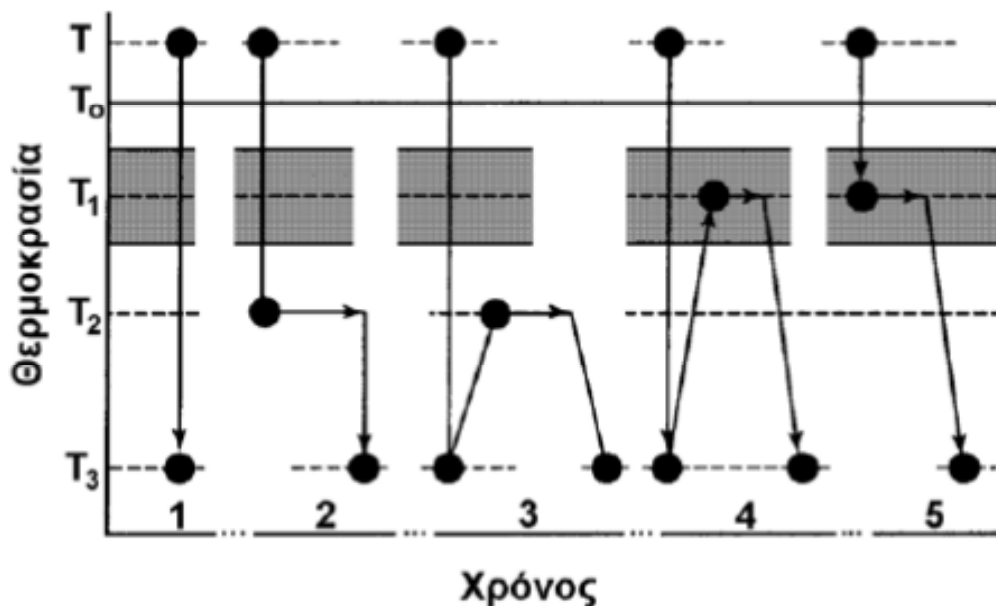
Χαρακτηριστικές θερμοκρασίες σε μια θερμική κατεργασία όπως βλέπουμε στο σχήμα 2.13.

$T_0$ : θερμοκρασία αντιστρεπτού μετασχηματισμού με αλλαγή φάσεων.

$T_1$ : θερμοκρασία μέγιστης ταχύτητας μετασχηματισμού.

$T_3$ : θερμοκρασία ολοκλήρωσης του μετασχηματισμού (ταχύτητα μετασχηματισμού μηδενική). Επίσης, σε μια θερμική διαδικασία διακρίνουμε τις ακόλουθες θερμοκρασίες:  $T > T_0$ , στην οποία φέρεται το μέταλλο και παραμένει για αρκετό χρόνο, μέχρις ότου αποκτήσει σταθερή κατάσταση.

$T_2$ : ενδιάμεση θερμοκρασία μεταξύ  $T_1$  και  $T_3$ , όπου φέρεται το μέταλλο σε κάποια ενδιάμεση διεργασία. [7]



**Σχήμα 2.13:** Χαρακτηριστικά είδη θερμικών κατεργασιών 1:βαφή, 2:κλιμακωτή βαφή, 3:επαναφορά, 4-5:ανόπτηση [7]

## 2.6.5 ΕΙΔΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Ανάλογα με τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των θερμοκρασιών  $T$  και  $T_3$ , καθώς επίσης και την ταχύτητα θέρμανσης και ψύξης σε κάθε φάση, οι θερμικές κατεργασίες των μεταλλικών υλικών διακρίνονται στις εξής μεγάλες ομάδες (Σχ. 2.13): 1:βαφή, 2:κλιμακωτή βαφή, 3: επαναφορά, 4-5:ανόπτηση.

## 2.6.6 Η ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΒΑΦΗΣ

### Φάσεις:

1. Το κράμα φέρεται σε κατάσταση ισορροπίας στη θερμοκρασία  $T$ .
2. Ακολουθεί ταχύτερη απόψυξη του κράματος με εμβάπτιση σε λουτρό βαφής (αέρας, νερό, λάδι, τήγματα μετάλλων), χαμηλής θερμοκρασίας  $T_3$ .

Με τον τρόπο αυτό, το κράμα δεν προλαβαίνει να υποστεί αντιστρεπτό μετασχηματισμό στην περιοχή γύρω από την θερμοκρασία  $T_1$ , και διατηρεί τελικά τη δομή ισορροπίας που είχε στη θερμοκρασία  $T$ , αλλά σε μετασταθή κατάσταση.

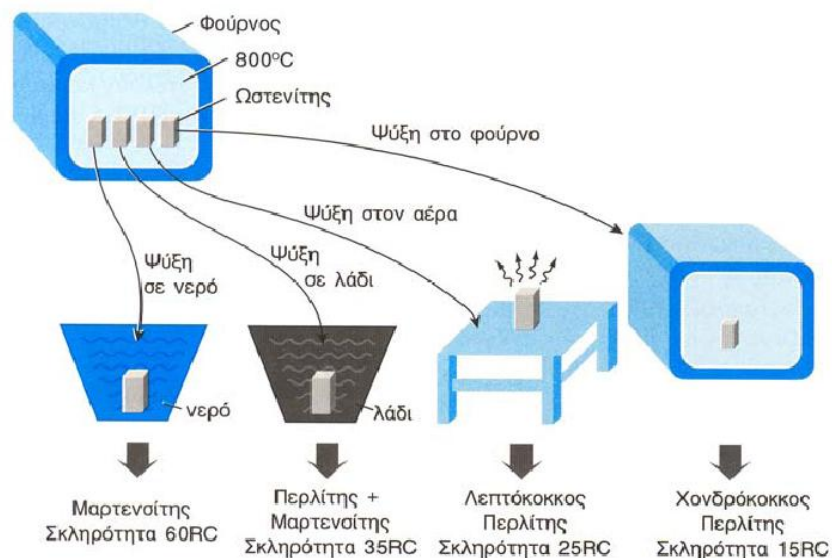
Τελικό αποτέλεσμα της βαφής είναι συνήθως αυξημένη σκληρότητα και μειωμένη ολκιμότητα. [7]

## 2.6.7 Η ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΚΩΤΗΣ ΒΑΦΗΣ

### Φάσεις:

1. Το κράμα φέρεται σε κατάσταση ισορροπίας στη θερμοκρασία  $T$ .
2. Ακολουθεί ταχύτερη απόψυξη του κράματος σε ενδιάμεση θερμοκρασία  $T_2$  ( $T_1, T_3$ ).
3. Παραμονή του κράματος σ' αυτή τη θερμοκρασία για μικρό χρονικό διάστημα.
4. Ολοκλήρωση της απόψυξης μέχρι τη θερμοκρασία  $T_3$ .

Με την κλιμακωτή βαφή επιτυγχάνεται μερικός μετασχηματισμός προς την



**Σχήμα 2.14:** Επίδραση του ψυκτικού μέσου στην θερμική κατεργασία της βαφής [2]

κατάσταση ισορροπίας, που εξαρτάται από τον χρόνο παραμονής στην ενδιάμεση θερμοκρασία.

Τελικό αποτέλεσμα είναι σχετικά μικρότερη σκληρότητα και μεγαλύτερη ολκιμότητα σε σύγκριση προς τη βαφή.

### **2.6.8 Η ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ**

Ακολουθεί πάντοτε μια κατεργασία βαφής.

Συνεπώς, συνολικά οι φάσεις κατεργασίας συνίστανται σε:

1. Το κράμα φέρεται σε κατάσταση ισορροπίας στη θερμοκρασία  $T$ .
2. Ακολουθεί ταχύτερη απόψυξη του κράματος σε θερμοκρασία  $T_3$ .
3. Αναθέρμανση του υλικού σε θερμοκρασία  $T_2$  ( $T_1, T_3$ ).
4. Παραμονή του κράματος σ' αυτή τη θερμοκρασία για ικανό χρονικό διάστημα.
5. Ολοκλήρωση της απόψυξης μέχρι τη θερμοκρασία  $T_3$  (αργή απόψυξη στον αέρα). Αποτέλεσμα της επαναφοράς είναι ο μερικός (αλλά σε ακόμη μεγαλύτερο βαθμό) μετασχηματισμός του υλικού, με συνέπεια τη δραστική μείωση της σκληρότητας και την αύξηση δυσθραυστότητας και ολκιμότητας. [7]

### **2.6.9 Η ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΝΟΠΤΗΣΗ**

Μπορεί να λάβει χώρα κατά δύο τρόπους, βλ. 4 και 5 στο Σχ. 2.13, αντίστοιχα:

- (i) Μετά από βαφή και επαναφορά σε θερμοκρασία  $T_3$ .
- (ii) Απ' ευθείας, εκκινώντας από τη σταθερή κατάσταση σε θερμοκρασία  $T$ .

Και στις δύο περιπτώσεις, η διαδικασία ανόπτησης ακολουθεί τις εξής φάσεις:

1. Το κράμα φέρεται στην περιοχή γρήγορου και αντιστρεπτού μετασχηματισμού περί τη θερμοκρασία  $T_1$ .
2. Παραμονή στη θερμοκρασία  $T_1$  για αρκετό χρονικό διάστημα, έως ότου επιτευχθεί ο πλήρης μετασχηματισμός.
3. Αργή απόψυξη σε θερμοκρασία  $T_3$ .

Αποτέλεσμα της ανόπτησης είναι η απόκτηση από το υλικό της κατάστασης ισορροπίας του, σε φυσικοχημικό επίπεδο και σε επίπεδο δομής. [7]

## 2.6.10 ΑΝΟΠΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ

Με την ανόπτηση η συσσωρευμένη ενέργεια μέσα στο μέταλλο υπό τη μορφή μηχανικού έργου παραμόρφωσης (πλαστικό έργο) ελευθερώνεται, με αποτέλεσμα την ελάττωση της πυκνότητας των διαταραχών και τη μετακίνησή τους σε σταθερότερες θέσεις.

Τούτο επιτυγχάνεται με τους εξής μηχανισμούς:

1. Μείωση των σημειακών ατελειών με μετανάστευση ή αμοιβαία εξουδετέρωσή τους.
2. Αλληλεξουδετέρωση των αντίθετων διαταραχών σε περιοχές πυκνές σε διαταραχές.
3. Επαναδιάταξη των διαταραχών (με ολίσθηση ή άνοδό τους) σε πιο σταθερή κατάσταση.
4. Σάρωση και απορρόφηση των διαταραχών λόγω μετακίνησης των ορίων των κόκκων ή/και της μείωσης της συνολικής επιφάνειας των κόκκων που μπορεί να προκληθεί από τη μετακίνηση των ορίων τους. [7]

Είδος ανόπτησης	Θερμοκρασία θέρμανσης	Χρόνος παραμονής	Ψύξη	Αποτελέσματα
Ανόπτηση κατεργασίας	Συνήθως $\theta > \theta_{\text{ανακρυστάλλωσης}}$ (550-600° C)		Βραδεία απόψυξη	Εξάλειψη εσωτερικών τάσεων από ψυχρή κατεργασία Αύξηση ολκιμότητας
Ανόπτηση εξομάλυνσης	$A_{c3} + \theta$ , $\theta = 55-85^\circ \text{ C}$ ή $A_{c2} + \theta$ ανάλογα με την $\pi(\text{C})$	~1h	Σχετικά γρήγορη ψύξη στον αέρα	Εκλέπτυνση των κόκκων χυτοχάλυβα ή υπερθερμανθέντα χάλυβα. Απόκτηση ομοιόμορφης κυτταροειδούς, λεπτοκρυσταλλικής φερριτοπερλιτικής δομής Εξαφάνιση ανισοτροπίας Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων
(Πλήρης) Ανόπτηση	$A_{c3} + \theta$ , $\theta = 15-40^\circ \text{ C}$	Αρκετός h	Ψύξη μέσα στον κλίβανο με τον ίδιο ρυθμό θέρμανσης (~20°C/h)	Αποκατάσταση μικροδομής Βελτίωση αντοχής και δυσθραυστότητας χυτοχάλυβων Βελτίωση κατεργασιμότητας Εξάλειψη παραμενουσών τάσεων μετά από μηχανική κατεργασία εν θερμώ ή μετά από συγκόλληση Αύξηση μεγέθους ωστενιτικών κόκκων προς διευκόλυνση της μαρτενιτικής βαφής
Ανόπτηση ανακρυστάλλωσης	$\theta > \theta_{\text{ανακρυστάλλωσης}}$ και στην φερριτική περιοχή (600-700° C)		Ελεγχόμενη αργή απόψυξη στον αέρα	Εξάλειψη ιστού ενδοτράχυνσης στους εν ψυχρώ παραμορφωμένους χάλυβες Βελτίωση κατεργασιμότητας
Ανόπτηση αποκατάστασης	$\theta < \theta_{\text{ανακρυστάλλωσης}}$ και στην περιοχή 450-600° C		Αργή απόψυξη	Δεν μεταβάλλεται η μικρογραφική μορφή
Αποτακτική ανόπτηση	$\theta = 400-450^\circ \text{ C}$ στη φερριτική περιοχή		Αργή απόψυξη	Εξάλειψη παραμενουσών τάσεων Δεν μεταβάλλεται η μικρογραφική μορφή
Ανόπτηση σφαιροποίησης	Λίγο μικρότερη της $A_{c1}$ (~700° C). Ενδεικτική τιμή: $A_{c1} - 50^\circ \text{ C}$ .	~25h	Αργή απόψυξη σε φούρνο για πολλές ώρες (έως 25h)	Σφαιροποίηση σεμεντίτη Βελτίωση κατεργασιμότητας σε κοπή (μαλακότερο και ολκιμότερο υλικό)
Ταλαντευτική ανόπτηση	Περιοδικά μεταβαλλόμενη θέρμανση στην περιοχή [ $A_{c1} - 50$ , $A_{c1} + 50$ ]			Σφαιροποίηση σεμεντίτη

Πίνακας 2.15: Ειδή ανόπτησης [7]

## 2.6.11 ΔΥΝΑΤΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΧΩΡΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΝΟΠΤΗΣΗ

Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την ανόπτηση εξαρτώνται από δύο παράγοντες: (α) Τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωση. Είναι η ελάχιστη θερμοκρασία, στην οποία το υλικό κατά την παραμονή του για ορισμένο χρόνο αλλάζει κρυσταλλική δομή. (β) Τη μέση ενέργεια σφαλμάτων επιστοίβασης  $\gamma_s$ . Μέταλλα με μικρή  $\gamma_s$ , οι διαταραχές δεν αναρριχώνται εύκολα και έτσι δεν παρατηρείται μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων αν δεν μεταβληθεί η κρυσταλλική του δομή, ενώ το αντίθετο συμβαίνει σε μέταλλα με μεγάλη τιμή του  $\gamma_s$ .

Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μπορεί να είναι:

1. Αποκατάσταση.
2. Ανακρυστάλλωση.
3. Ανάπτυξη των κόκκων (μετά από ανακρυστάλλωση).

### Ανακρυστάλλωση

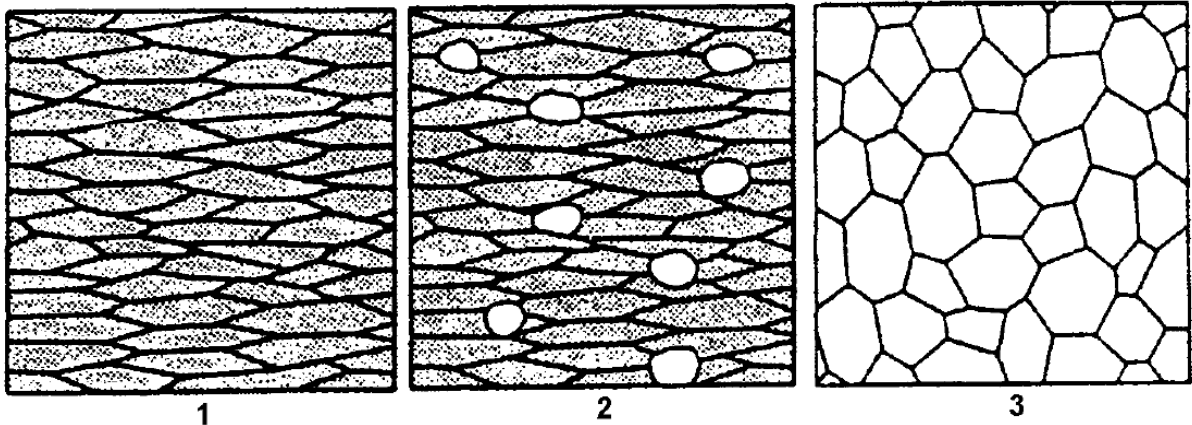
Πραγματοποιείται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης.

Χαρακτηρίζεται από ριζική αναγέννηση (ανάπλαση) των κόκκων που έχουν υποστεί ψυχρή πλαστική παραμόρφωση (ενδοτράχυνση) και από την ανάπτυξη νέου ιστού (υφής) κόκκων.

Παρατηρείται σημαντική μείωση της πυκνότητας των διαταραχών, επειδή απορροφώνται από τα όρια των κόκκων του νέου ιστού.

Ο μηχανισμός της ανακρυστάλλωσης συνίσταται σε εμφάνιση νέων πυρήνων κρυστάλλωσης διαφορετικού προσανατολισμού, οι οποίοι αναπτύσσονται βαθμιαία και συναντώνται μεταξύ τους, έως ότου ολόκληρος ο αρχικός ιστός του πλαστικά παραμορφωμένου μετάλλου μετατραπεί σε νέο ιστό με απαραμόρφωτους ισοαξονικούς κόκκους, που δεν έχουν κοινό προσανατολισμό, βλ. Σχ. 2.16. [7]





**Σχημα 2.16:** Στάδια εξέλιξης της ανακρυστάλλωσης: 1: αρχικός ιστός του πλαστικά παραμορφωμένου κρυστάλλου, 2: εμφάνιση πυρήνων κρυστάλλωσης, 3: νέος ιστός κόκκων μετά το πέρας της ανακρυστάλλωσης [7]

### Νόμοι της ανακρυστάλλωσης

1. Η ανακρυστάλλωση λαμβάνει χώρα όταν έχει προηγηθεί μια ελάχιστη κρίσιμη (πλαστική) παραμόρφωση του υλικού.
2. Όσο μικρότερη είναι η πλαστική παραμόρφωση, τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης.
3. Για την ίδια παραμόρφωση, η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης είναι αντιστρόφως ανάλογη του χρόνου ανόπτησης.
4. Το μέγεθος των κόκκων στο τέλος της ανακρυστάλλωσης είναι αντιστρόφως ανάλογο του βαθμού ενδοτράχυνσης (δηλ. του ποσοστού πλαστικής παραμόρφωσης) και ανάλογο της θερμοκρασίας.
5. Για δεδομένες θερμοκρασιακές και χρονικές συνθήκες, η κρίσιμη παραμόρφωση είναι ανάλογη του αρχικού μεγέθους των κόκκων του υλικού.
6. Η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης είναι αντιστρόφως ανάλογη της καθαρότητας του μετάλλου, διότι τα ξένα άτομα βρίσκονται στα όρια των κόκκων, όπου αναμένεται κυρίως η εμφάνιση νέων πυρήνων, με αποτέλεσμα να παρεμποδίζουν το σχηματισμό τους. [7]

### Στάδια της ανακρυστάλλωσης

Ο μηχανισμός της ανακρυστάλλωσης περιλαμβάνει δύο διακεκριμένα στάδια, βλ. Σχ. 2.16:

1. Το στάδιο πυρηνοποίησης (δηλ. εμφάνισης νέων πυρήνων).
2. Το στάδιο ανάπτυξης των νέων πυρήνων.

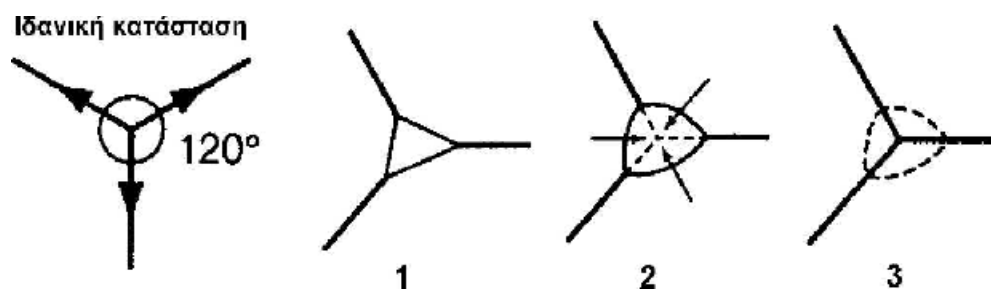
## Ανάπτυξη των κόκκων

Ακολουθεί αυθόρμητα την ολοκλήρωση της ανακρυστάλλωσης, εφ' όσον συνεχίζεται η ανόπτηση. Κινητήρια δύναμη είναι η επιφανειακή ενέργεια των ορίων των κόκκων, που τείνει προς τη συνολική της μείωση.

### Μηχανισμός

Στα τριπλά σημεία επαφής των κόκκων, οι σύνδεσμοι έχουν την τάση σχηματισμού ίδιας γωνίας ισορροπίας, δηλ. γωνία  $120^\circ$ . Τούτο προκαλεί καμπύλωση και επιμήκυνση των ορίων.

Η επιφανειακή τάση, όμως, για να μειωθεί, απαιτεί μετακίνηση των τριπλών σημείων προς το κέντρο καμπυλότητας, με αποτέλεσμα την εξαφάνιση κόκκων με λιγότερες από 6 πλευρές και την αύξηση του μεγέθους κόκκων με περισσότερες από 6 πλευρές.



**Σχήμα 2.17:** Μηχανισμός ανάπτυξης των κόκκων: 1: κόκκος με λιγότερες από 6 πλευρές, 2: καμπύλωση και επιμήκυνση των ορίων με ταυτόχρονη μετακίνηση των τριπλών σημείων προς τα μέσα, 3: κατάληξη στη ιδανική κατάσταση. [7]

### Κανόνες της ανάπτυξης των κόκκων

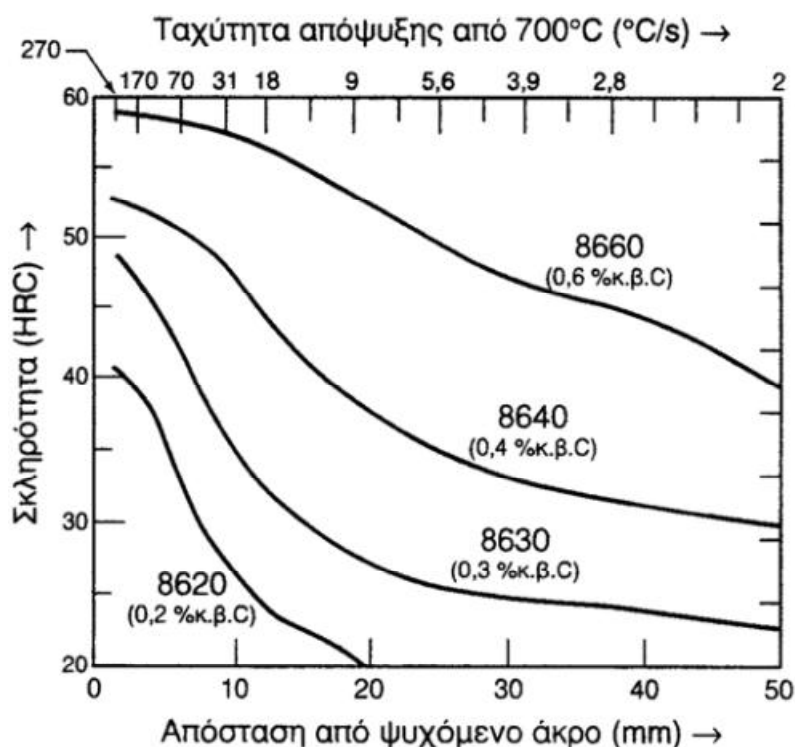
1. Η επιτάχυνση των κόκκων επιταχύνεται με αύξηση της θερμοκρασίας.
2. Η ανάπτυξη των κόκκων επιβραδύνεται σημαντικά ή/και σταματά τελείως λόγω της παρουσίας ακαθαρσιών ή κατακρημνισμάτων σε διασπορά μέσα στο στερεό διάλυμα.
3. Η ανάπτυξη των κόκκων μπορεί να είναι συνεχής (σύμφωνα με το μηχανισμό που περιγράφηκε ανωτέρω) ή ασυνεχής (λόγω διαταραχής του μηχανισμού ανακρυστάλλωσης). [7]

## 2.6.12 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΜΒΑΠΤΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΗΡΕΑΣΜΟΥ

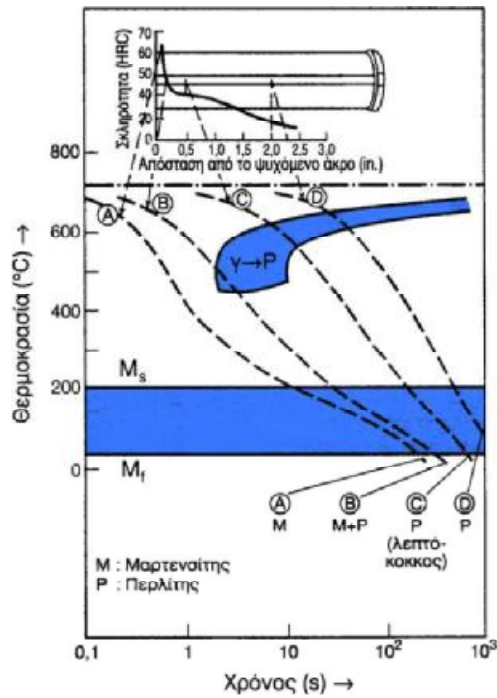
### Παράγοντες που επηρεάζουν βάθος βαφής και εμβαπτότητα

- Είναι φθίνουσα συνάρτηση της μάζας του χαλύβδινου τεμαχίου.
- Είναι αύξουσα συνάρτηση της δραστηρότητας του λουτρού ψύξης.
- Είναι φθίνουσα συνάρτηση της κρίσιμης ταχύτητας βαφής  $V_c$ , που αντιστοιχεί στην καμπύλη απόψυξης που εφάπτεται στην "μύτη" του διαγράμματος CCT (κραματικές προσθήκες στον χάλυβα μετατοπίζουν τις καμπύλες CCT και TTT προς τα δεξιά και οδηγούν σε μείωση της  $V_c$ ).
- Είναι αύξουσα συνάρτηση του μεγέθους των κόκκων του ωστενίτη  $\delta$  (αύξηση του μεγέθους των κόκκων του ωστενίτη μετατοπίζουν επίσης τις καμπύλες CCT και TTT προς τα δεξιά).

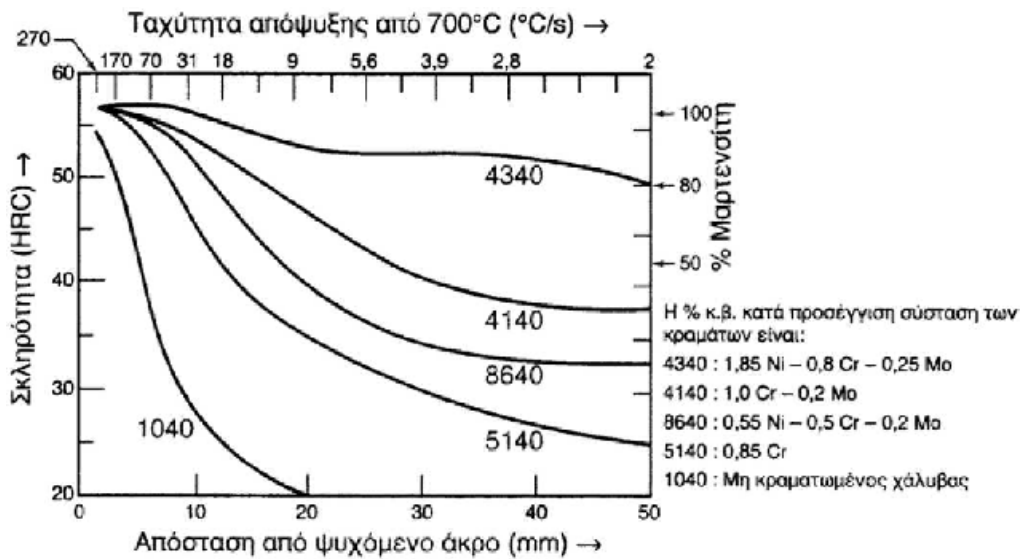
Χαρακτηριστικά παραδείγματα μεταβολής της εμβαπτότητας συναρτήσει των διαφόρων παραγόντων που την επηρεάζουν παρουσιάζονται στα Σχ.2.18-2.20



**Σχήμα 2.18:** Καμπύλες εμβαπτότητας για χάλυβες της σειράς 8600 με διαφορετική [7]



**Σχήμα 2.19:** Εξάρτηση της εμβαπτότητας από τις καμπύλες συνεχούς απόψυξης κοινού ευτηκτοειδούς χάλυβα



**Σχήμα 2.20:** Εξάρτηση της εμβαπτότητας χάλυβα με  $\pi(O)=0,4\%$  από το ποσοστό κραμάτωσης

### 3. ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ

#### 3.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα διάφορα στερεά σώματα που χρησιμοποιούμε στις κατασκευές (μέταλλα, ξύλα κλπ.) είναι πρακτικά χρήσιμα και εξυπηρετούν τον προορισμό τους όταν αφενός δεν θραύονται με την επενέργεια των εξωτερικών φορτίων αλλά ανθίσταται τόσο, ώστε αφετέρου, οι αναπόφευκτες παραμορφώσεις τους να μην υπερβαίνουν κάποια όρια τα οποία προκύπτουν, είτε από κατασκευαστικούς λόγους, είτε από λόγους αισθητικής.

Για τους παραπάνω λόγους είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε μέχρι ποιου ορίου μας επιτρέπεται να φορτίζουμε τα διάφορα υλικά έναντι των δύο κινδύνων που προαναφέραμε, δηλαδή έναντι του κινδύνου της θραύσης και έναντι της υπερβολικής παραμόρφωσης. Έτσι, η αντοχή των υλικών από πρακτική άποψη έχει ως αντικείμενο:

1. Να προσδιορίσει τα επικίνδυνα όρια φόρτισης των διαφόρων υλικών σε όλα τα είδη των καταπονήσεων και στη συνέχεια να καθορίσει τα επιτρεπτά όρια φόρτισης για κάθε ένα είδος φόρτισης ξεχωριστά.
2. Να καθορίσει το πλέον κατάλληλο σχήμα των φορέων και στη συνέχεια να υπολογίσει τις διαστάσεις τους, έτσι ώστε αυτοί να είναι σε θέση να παραλάβουν με ασφάλεια, (έναντι του κινδύνου θραύσης αλλά και έναντι της υπερβολικής παραμόρφωσης) και συγχρόνως κατά τον οικονομικότερο δυνατό τρόπο τη φόρτιση, η οποία είναι δυνατόν να προέρχεται:
  - i. Από εξωτερικές δυνάμεις τις οποίες προορίζονται να υποβαστάξουν και οι οποίες οφείλονται σε μόνιμα ή σε κινητά φορτία.

- ii. Από καταπονήσεις που προέρχονται από θερμοκρασιακές μεταβολές ή από υποχωρήσεις στηρίξεων ή από αυτεντατικές καταστάσεις λόγω κατασκευαστικής ατέλειας, κλπ.
  - iii. Από το ίδιο το βάρος της κατασκευής.
3. Να υπολογίσει το μέγιστο δυνατό φορτίο το οποίο μπορεί με ασφάλεια να αναλάβει ένας φορέας ή μια κατασκευή και να ελέγξει κατά πόσο αυτός είναι ασφαλής έναντι δεδομένης φόρτισης (στατικός έλεγχος) ή τέλος να ελέγξει κατά πόσο οι προκληθείσες παραμορφώσεις βρίσκονται εντός των παραδεκτών ορίων.

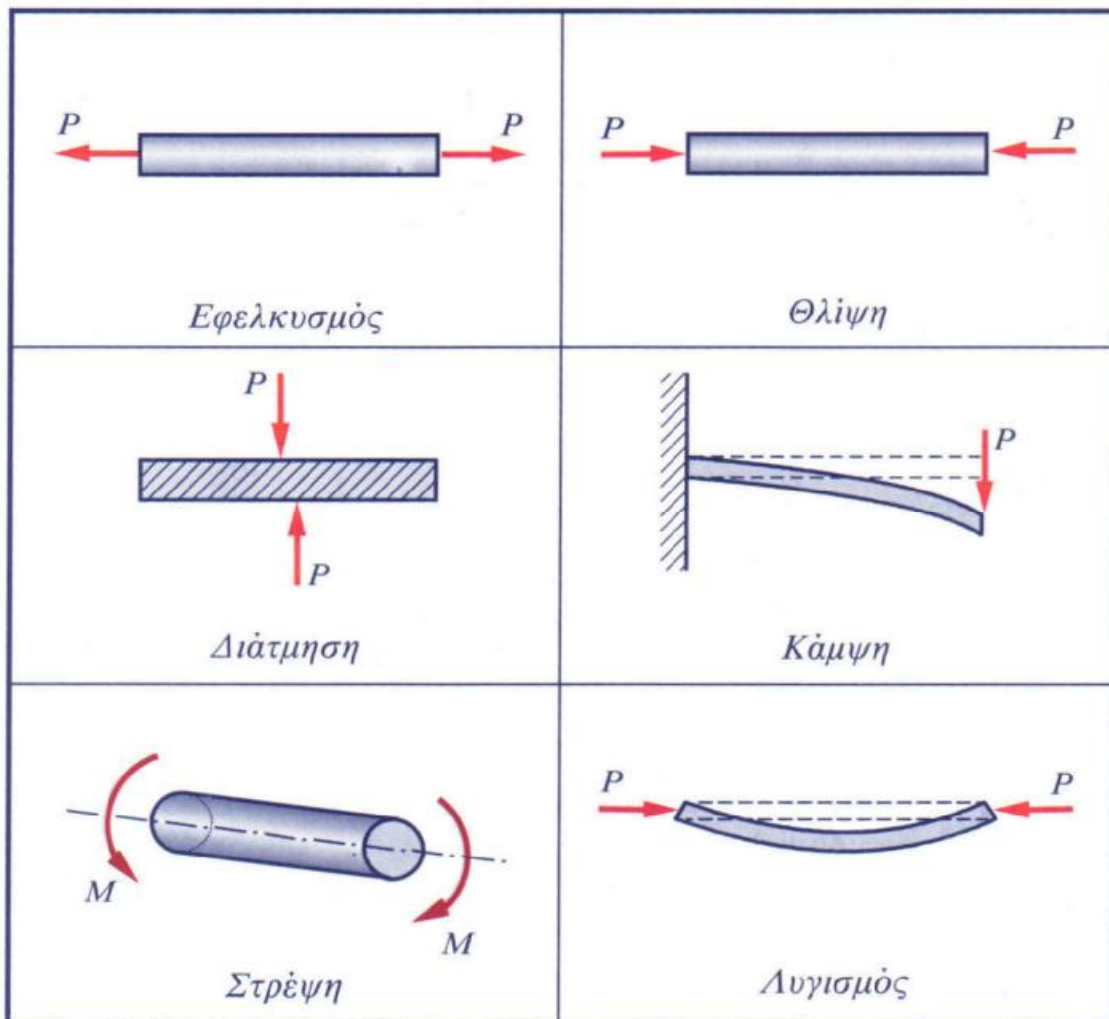
Έτσι μπορούμε να πούμε ότι η αντοχή των υλικών είναι η επιστήμη που υποδεικνύει αναλυτικές μεθόδους για τον υπολογισμό της αντοχής της ακαμψίας και της ευστάθειας (είναι η ιδιότητα των σωμάτων να μην λυγίζουν) των μελών μιας κατασκευής με γνώμονα το κόστος να είναι ελάχιστο δυνατό.[1]

### 3.2 ΕΙΔΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΩΝ

Γνωρίζουμε ότι τα διάφορα υλικά σώματα αποτελούνται από μικρότατα σωματίδια ύλης όπως είναι τα μόρια, τα άτομα, κλπ, μεταξύ των οποίων ασκούνται δυνάμεις συνοχής. Οι δυνάμεις αυτές εκδηλώνονται σαν αντίσταση του υλικού εναντίον των επιβαλλόμενων εξωτερικών δυνάμεων οι οποίες τείνουν να του προκαλέσουν παραμόρφωση ή ακόμη και λύση της συνέχειας του δηλαδή θραύση. Οι εξωτερικές δυνάμεις επενεργούν στα σώματα με διάφορους τρόπους και προκαλούν διάφορα είδη απλών και σύνθετων καταπονήσεων. Τα είδη των απλών καταπονήσεων είναι τα εξής:

1. **Εφελκυσμός:** ένα σώμα καταπονείται σε εφελκυσμό όταν επενεργούν δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις οι οποίες τείνουν να το διασπάσουν.
2. **Θλίψη:** ένα σώμα καταπονείται σε θλίψη όταν επάνω του επενεργούν δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις οι οποίες τείνουν να το συνθλίψουν.
3. **Διάτμηση:** ένα σώμα καταπονείται σε διάτμηση όταν δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις επενεργούν κάθετα στον άξονα του.
4. **Κάμψη:** ένα σώμα καταπονείται σε κάμψη όταν οι δυνάμεις ενεργούν κάθετα στον άξονα του. Αναπτύσσονται τότε ροπές κάμψης και προκαλείται καμπύλωση της δοκού.
5. **Στρέψη:** ένα σώμα καταπονείται σε στρέψη όταν οι δυνάμεις αποτελούν ζεύγος με επίπεδο κάθετο στον άξονα του το οποίο τείνουν να περιστρέψουν.
6. **Λυγισμός:** ο λυγισμός από άποψη δράσης των δυνάμεων μοιάζει με τη θλίψη από άποψη παραμορφώσεων μοιάζει με την κάμψη. Τελικά όμως

διαφέρει αρκετά από τις δύο προηγούμενες, αποτελώντας ιδιαίτερο τρόπο καταπόνησης, η οποία μάλιστα είναι πιο επικίνδυνη στις κατασκευές. [1]  
 Τα είδη των καταπονήσεων φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.1: Είδη καταπονήσεων [1]

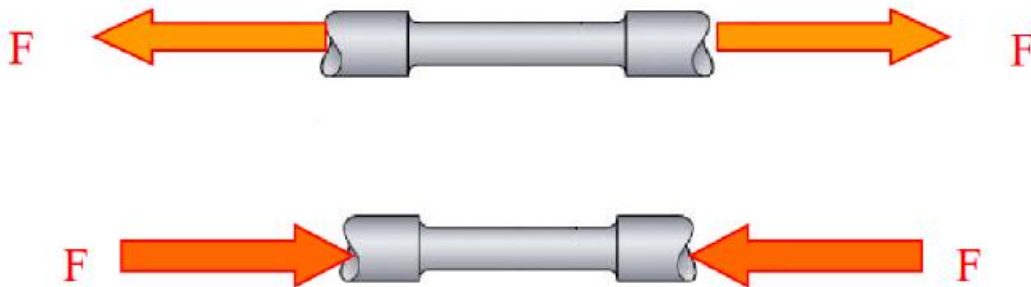
### 3.3 ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Εφελκυσμός είναι το φαινόμενο εκείνο που το δοκίμιο τείνει αρχικά να μηκυνθεί (αυξήσει το μήκος του) και μετά πιθανώς να διασπαστεί (υποστεί θραύση) υπό την επενέργεια δυο ίσων και αντίθετων δυνάμεων που επενεργούν στα αντίθετα άκρα του ή υπό την επενέργεια μιας δύναμης που επενεργεί στο ένα άκρο όταν το άλλο άκρο είναι πακτωμένο (σταθερά συνδεδεμένο) με κάποιο σώμα.

Σκοπός της δοκιμής του εφελκυσμού είναι ο καθορισμός της συμπεριφοράς των υλικών όταν καταπονούνται σε εφελκυστικά ή θλιπτικά φορτία και ο προσδιορισμός διαφόρων μηχανικών τους ιδιοτήτων όπως είναι η

τάση αναλογίας, η τάση διαρροής, η τάση θραύσεως, το μέτρο ελαστικότητας του Young, η ολκιμότητα, η επιμήκυνση θραύσεως και άλλες.

Επιπλέον σε μια τυπική δοκιμασία εφελκυσμού (ή θλίψης) προσδιορίζουμε το διάγραμμα συμβατικών τάσεων–συμβατικών παραμορφώσεων του εξεταζόμενου υλικού. Τα συνηθισμένα εργαστηριακά πειράματα γίνονται με τη βοήθεια είτε υδραυλικών (όπως και στη δική μας περίπτωση) είτε ηλεκτρικών μηχανών με τις οποίες μπορούμε να επιβάλουμε μέγιστο εφελκυστικό (ή θλιπτικό) φορτίο αρκετών τόνων στο δοκίμιο. Οι μετρήσεις των παραμορφώσεων γίνονται συνήθως με τη βοήθεια ηλεκτρονικών αισθητήρων μετατόπισης, ή και μηχανομετρών (strain gauge).



**Σχήμα 3.2:** Εφελκυσμός, θλίψη

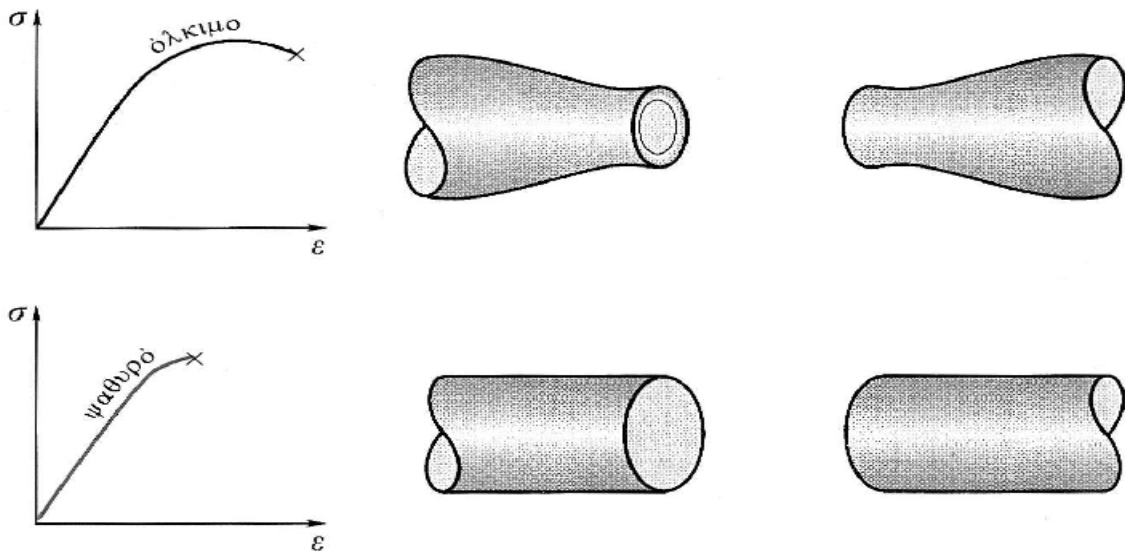
### 3.4 Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

#### 3.4.1 ΟΛΚΙΜΑ ΚΑΙ ΨΑΘΥΡΑ ΥΛΙΚΑ

Τα μεταλλικά υλικά, που χρησιμοποιούνται σε μηχανικές εφαρμογές διακρίνονται σε όλκιμα και ψαθυρά. Όλκιμο υλικό είναι αυτό που δέχεται σχετικά μεγάλη παραμόρφωση μέχρι το σημείο που θραύεται πριν αποκτήσει σχετικά μεγάλη παραμόρφωση. Μια ανηγμένη παραμόρφωση 0.05 θεωρείται συχνά σαν το διαχωριστικό όριο μεταξύ των δύο αυτών κατηγοριών υλικών. Ένας άλλος τρόπος διάκρισης των όλικμων από τα ψαθυρά υλικά είναι και ο τρόπος θραύσης τους. Στο πείραμα του εφελκυσμού τα όλκιμα υλικά ξεχωρίζουν από τη δημιουργία λαιμού, τις έντονες πλαστικές παραμορφώσεις γύρω από την περιοχή θραύσης και την ανομοιόμορφη και χοντρόκοκκη επιφάνεια θραύσης (Σχ. 3.3). Αντιθέτως τα ψαθυρά υλικά σπάνε κάθετα στη διεύθυνση φόρτισης τους, χωρίς σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις γύρω



από την περιοχή θραύσης, η δε επιφάνεια θραύσης είναι λεία και λεπτόκοκκη (Σχ. 3.3). Τόσο η ολκιμότητα όσο και η ψαθυρότητα, δεν είναι χαρακτηριστικές ιδιότητες ενός υλικού, αλλά μεταβάλλονται από εξωτερικές επιδράσεις όπως είναι η θερμοκρασία, το είδος της φόρτισης, η ταχύτητα καταπόνησης κ.α. [3]



**Σχήμα 3.3:** Όλκιμο και ψαθυρό υλικό

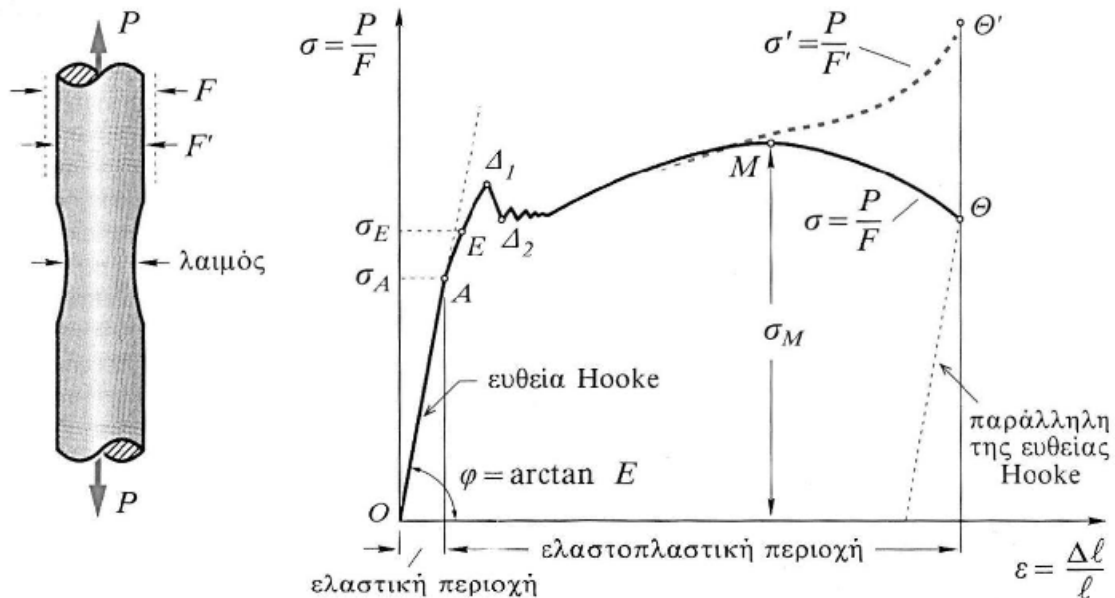
### 3.4.2 ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ HOOKE

Για οποιοδήποτε υλικό, που έχει καμπύλη τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης της μορφής του Σχ.3.4, η σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης είναι γραμμική για μικρές τιμές της παραμόρφωσης. Αυτή η γραμμική σχέση μεταξύ της επιμήκυνσης και του αξονικού φορτίου που την προκαλεί (αφού αυτές οι ποσότητες είναι ανάλογες αντίστοιχα προς την παραμόρφωση και την τάση με κάποιο σταθερό συντελεστή) παρατηρήθηκε πρώτα από τον Sir Robert Hooke το 1678 και καλείται νόμος του Hooke. Για να περιγράψουμε αυτή την αρχικά γραμμική σχέση που περιγράφει τη συμπεριφορά του υλικού, μπορούμε να γράψουμε  $\sigma = E \epsilon$  όπου το  $E$  παριστάνει την κλίση του ευθύγραμμου τμήματος ΟΑ της καμπύλης στο Σχ.3.4.

### 3.4.3 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η ποσότητα  $E$  δηλαδή ο λόγος της τάσης προς την ανηγμένη παραμόρφωση. Λέγεται μέτρο ελαστικότητας του υλικού σε εφελκυσμό ή και μέτρο του Young. Εφόσον η ανηγμένη παραμόρφωση είναι καθαρός αριθμός (είναι ο λόγος δύο μηκών), είναι φανερό ότι το  $E$  έχει τις ίδιες μονάδες με την

τάση. Για πολλά συνηθισμένα μηχανικά υλικά το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη είναι σχεδόν ίσο με αυτό που βρέθηκε σε εφελκυσμό.



**Σχήμα 3.4:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης σε εφελκυσμό

### 3.5 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η καμπύλη τάσης- ανηγμένης παραμόρφωσης που δίνεται στο Σχ. 2, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσουμε αρκετά χαρακτηριστικά της αντοχής του υλικού.

#### 3.5.1 ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

##### Όριο αναλογίας

Η τάση του σημείου A ονομάζεται όριο αναλογίας, δηλαδή είναι η μέγιστη τάση που μπορεί να αναπτυχθεί σε μια απλή δοκιμή εφελκυσμού, τέτοια ώστε η τάση να είναι γραμμική συνάρτηση της παραμόρφωσης.

##### Όριο ελαστικότητας

Η τάση του σημείου E, είναι γνωστή ως όριο ελαστικότητας. Αυτή είναι η μέγιστη τάση που μπορεί να επιβληθεί στη διάρκεια μιας απλής δοκιμής εφελκυσμού, τέτοια ώστε, όταν το φορτίο απομακρυνθεί εντελώς, να μην παραμείνει καμία μόνιμη παραμόρφωση. Για πολλά υλικά οι αριθμητικές τιμές

των ορίων ελαστικότητας και αναλογίας είναι σχεδόν ίδιες και οι όροι μερικές φορές χρησιμοποιούνται σαν συνώνυμοι. Στις περιπτώσεις όπου η διάκριση μεταξύ των δύο τιμών είναι αποδειγμένη, το όριο ελαστικότητας είναι σχεδόν πάντοτε μεγαλύτερο από το όριο αναλογίας.

### Ελαστική περιοχή

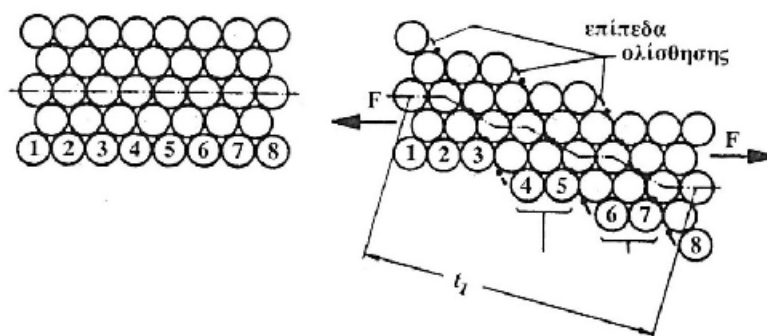
Το τμήμα της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης, που εκτείνεται από την αρχή μέχρι το όριο αναλογίας ονομάζεται ελαστική περιοχή. Το τμήμα της καμπύλης που εκτείνεται από το όριο αναλογίας μέχρι το σημείο της θραύσης ονομάζεται πλαστική περιοχή.

### 3.5.2 ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

#### Όριο διαρροής

Η τάση του σημείου  $\Delta_1$ , όπου αυξάνεται η παραμόρφωση χωρίς αύξηση της τάσης, ονομάζεται όριο διαρροής του υλικού. Όταν η φόρτιση περάσει το σημείο  $\Delta_1$ , λέμε ότι έχουμε διαρροή του υλικού. Μερικά υλικά παρουσιάζουν δύο σημεία στην καμπύλη τάσης- ανηγμένης παραμόρφωσης, στα οποία υπάρχει αύξηση της παραμόρφωσης χωρίς αύξηση της τάσης. Αυτά ονομάζονται κάτω και πάνω όριο διαρροής.

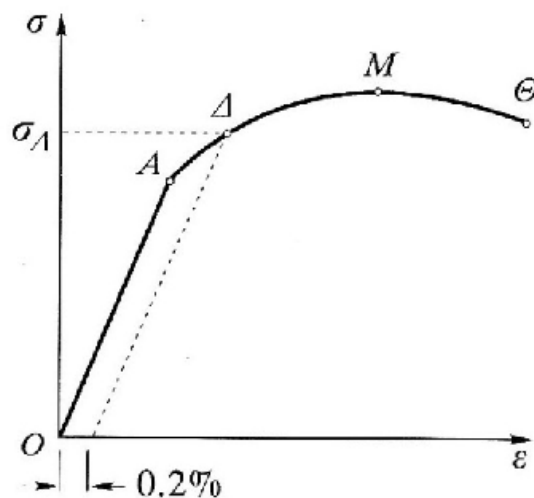
Επίπεδα ολίσθησης μετά το όριο διαρροής, που οφείλονται σε διατμητικές τάσεις



Σχήμα 3.5: Ολίσθηση υλικού κατά το όριο διαρροής

Ένα άλλο χαρακτηριστικό της περιοχής αυτής αλλά και αιτία της διαρροής είναι η εμφάνιση στην επιφάνεια του δοκιμίου ορατών λεπτών λωρίδων που είναι κεκλιμένες κατά  $45^\circ$  ως προς τον άξονα του δοκιμίου. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται γραμμές Luders και η εμφάνισή τους αποδεικνύει ότι η διαρροή του υλικού οφείλεται σε αστοχία του υλικού σε διάτμηση. Βέβαια υπάρχουν και υλικά όπου η έναρξη διαρροής δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί με μεγάλη

ακρίβεια, επειδή η αντίστοιχη καμπύλη του διαγράμματος εφελκυσμού δεν παρουσιάζει έκδηλα χαρακτηριστικά σημεία. Αντίθετα, παρατηρείται στα υλικά αυτά, ότι μετά το όριο διαρροής η τάση εξακολουθεί να αυξάνεται μη γραμμικά μέχρι τη μέγιστη τάση ώστε στη συνέχεια το υλικό να οδηγηθεί σε θραύση. Στην περίπτωση αυτή ορίζεται ένα τεχνητό όριο διαρροής, που βρίσκεται αν από ένα σημείο του άξονα των παραμορφώσεων, που αντιπροσωπεύει παραμόρφωση ίση με  $\varepsilon = 0.2\%$ , φέρουμε ευθεία παράλληλη προς το αρχικό ευθύγραμμο τμήμα του διαγράμματος. Η τεταγμένη του σημείου τομής της ευθείας αυτής με την καμπύλη ορίζει το τεχνητό όριο διαρροής (Σχ.3.6).



**Σχήμα 3.6:** Τεχνητό όριο διαρροής

### **Μέγιστη αντοχή ή αντοχή εφελκυσμού**

Η τάση του σημείου M, του υψηλότερου σημείου της καμπύλης, ονομάζεται μέγιστη αντοχή ή αντοχή εφελκυσμού του υλικού.

### **Αντοχή θραύσης**

Η τάση του σημείου Θ ονομάζεται αντοχή θραύσης του υλικού. Η τάση αυτή φαίνεται να είναι μικρότερη από την τάση του σημείου M, επειδή στον υπολογισμό της η διατομή του δοκιμίου θεωρείται σταθερή. Στην πραγματικότητα η διατομή μικραίνει κατά τον εφελκυσμό, ιδιαίτερα στο σημείο του δοκιμίου όπου λίγο πριν τη θραύση σχηματίζεται λαιμός.

### 3.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

#### Μέτρο ανάπλασης

Το έργο που παράγεται σε μοναδιαίο όγκο υλικού, όταν μια απλή εφελκυστική δύναμη αυξάνεται βαθμιαία από το μηδέν μέχρι το όριο αναλογίας του υλικού, ονομάζεται μέτρο ανάπλασης. Αυτό μπορεί να υπολογιστεί ως το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης από την αρχή μέχρι το όριο αναλογίας. Οι μονάδες αυτής της ποσότητας είναι  $N/mm^{-3}$ . Έτσι, ανάπλαση ενός υλικού είναι η ικανότητα του να απορροφά ενέργεια στην ελαστική περιοχή του.

#### Μέτρο σκλήρυνσης

Το έργο που παράγεται σε μοναδιαίο όγκο υλικού, καθώς μια απλή εφελκυστική δύναμη αυξάνεται βαθμιαία από το μηδέν μέχρι την τιμή που προκαλεί θραύση, ονομάζεται μέτρο σκλήρυνσης. Αυτό είναι ίσο με το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης από την αρχή μέχρι το σημείο θραύσης. Η σκλήρυνση ενός υλικού είναι η ικανότητα του να απορροφά ενέργεια στην πλαστική περιοχή του.

#### Εκατοστιαία μείωση διατομής

Η μείωση του εμβαδού της εγκάρσιας διατομής μέχρι τη στιγμή της θραύσης διαιρεμένη δια του αρχικού εμβαδού και πολλαπλασιασμένη επί 100 ονομάζεται εκατοστιαία μείωση της διατομής. Πρέπει να σημειωθεί ότι, όταν δρουν στη ράβδο εφελκυστικές δυνάμεις, το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής μικραίνει, αλλά οι υπολογισμοί για την τάση γίνονται με βάση το εμβαδόν της αρχικής διατομής. Έτσι προκύπτει η συνεχής καμπύλη του Σχ. 2. Όσο οι παραμορφώσεις γίνονται μεγαλύτερες, τόσο γίνεται ουσιαστικότερο να λαμβάνονται υπόψη οι μεταβαλλόμενες τιμές του εμβαδού της διατομής. Έτσι δημιουργείται η πραγματική καμπύλη τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή δείχνεται με διακεκομμένη γραμμή στο Σχ. 2.

#### Εκατοστιαία επιμήκυνση

Η αύξηση του μήκους μετά τη θραύση διαιρεμένη δια του αρχικού μήκους και πολλαπλασιασμένη επί 100 είναι η εκατοστιαία επιμήκυνση. Και οι δύο, η εκατοστιαία μείωση της διατομής και η εκατοστιαία επιμήκυνση του δοκιμίου εκφράζουν την ολκιμότητα του υλικού.

## **Τάση λειτουργίας**

Τα χαρακτηριστικά αντοχής, που αναφέρθηκαν προηγουμένως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκλέξουμε την ονομαζόμενη τάση λειτουργίας. Συχνά η τάση λειτουργίας καθορίζεται από τη διαίρεση της τάσης στο σημείο διαρροής ή μέγιστης αντοχής δια ενός αριθμού, που ονομάζεται συντελεστής ασφαλείας. Η εκλογή του συντελεστή ασφαλείας βασίζεται στην κρίση και την εμπειρία του μελετητή. Μερικές φορές επιβάλλονται ιδιαίτεροι συντελεστές ασφαλείας από τις προδιαγραφές δόμησης.

## **Κράτωση**

Κράτωση όλκιμου υλικού έχουμε όταν η τάση αυξάνεται σημαντικά πέρα από το όριο διαρροής του υλικού χωρίς να επέλθει θραύση.

## **Αντοχή διαρροής**

Αντοχή διαρροής του υλικού ονομάζεται η τάση στο σημείο της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης, στο οποίο όταν το φορτίο απομακρυνθεί, το υλικό διατηρεί μια προκαθορισμένη μόνιμη «πλαστική παραμόρφωση». Αυτή η παραμόρφωση λαμβάνεται συχνά ίση με 0.002 ή με 0.0035. αυτές οι τιμές έχουν οριστεί φυσικά αυθαίρετα. Στο Σχ.3.6 σημειώνεται μια μόνιμη παραμόρφωση πάνω στον άξονα των ανηγμένων παραμορφώσεων και η διακεκομμένη γραμμή έχει σχεδιαστεί παράλληλη προς την εφαπτομένη του υλικού, που μερικές φορές ονομάζεται τάση δοκιμής.

## **Εφαπτομενικό μέτρο**

Η μεταβολή της τάσης σε συσχετισμό με την ανηγμένη παραμόρφωση ονομάζεται εφαπτομενικό μέτρο του υλικού και δίνεται από τον τύπο

$$E_t = d\sigma/d\varepsilon$$

Προφανώς το μέγεθος αυτό μεταβάλλεται κατά μήκος της καμπύλης.

## **Συντελεστής γραμμικής διαστολής**

Ο συντελεστής γραμμικής διαστολής ορίζεται ως η μεταβολή μήκους ανά μονάδα μήκους μιας ευθείας ράβδου, που υπόκειται σε θερμοκρασιακή μεταβολή ενός βαθμού της κλίμακας Kelvin (K). η τιμή αυτού του συντελεστή είναι ανεξάρτητη από τη μονάδα μήκους, αλλά εξαρτάται από την θερμοκρασιακή κλίμακα, που χρησιμοποιείται. Συνήθως αναφερόμαστε στην κλίμακα Kelvin, οπότε ο συντελεστής, που συμβολίζεται με  $\alpha$ , είναι π.χ. για το χάλυβα ίσος με  $12 \times 10^{-6} K^{-1}$ . Η μεταβολή της θερμοκρασίας σε μια

κατασκευή προκαλεί αύξηση των εσωτερικών τάσεων, όπως ακριβώς τα εφαρμοζόμενα φορτία.

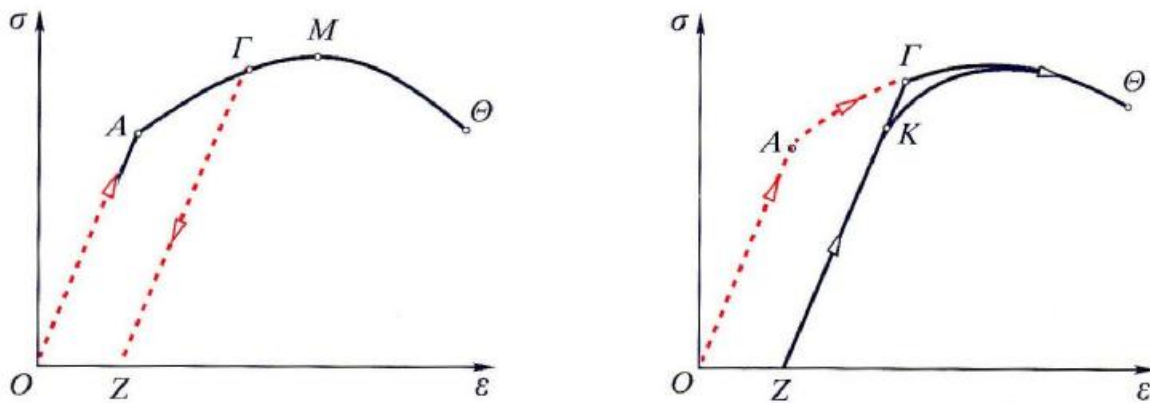
### Λόγος του Poisson

Όταν μια ράβδος καταπονείται με απλό εφελκυσμό, αυξάνεται το μήκος της κατά τη διεύθυνση του φορτίου, αλλά μειώνονται οι άλλες διαστάσεις κάθετα στη διεύθυνση του φορτίου. Ο λόγος της εγκάρσιας ανηγμένη παραμόρφωσης προς την αξονική ονομάζεται λόγος του Poisson και συμβολίζεται με  $\mu$ . για τα περισσότερα μέταλλα έχει τιμές μεταξύ 0.25 και 0.35.

### Αποφόρτιση στην ελαστοπλαστική περιοχή

Αν φορτίσουμε το υλικό μέχρι ένα σημείο  $\Gamma$  (Σχ.3.7) της ελαστοπλαστικής περιοχής και στην συνέχεια επέλθει αποφόρτιση, η μεταβολή της τάσης και της παραμόρφωσης ακολουθεί περίπου μία ευθεία ( $\Gamma Z$ ), η οποία είναι παράλληλη στο αρχικό ευθύγραμμο τμήμα  $OA$ .

Στο σημείο  $Z$ , όπου το φορτίο έχει μηδενιστεί, παρατηρείται μία παραμένουσα παραμόρφωση ( $OZ$ ) στο δοκίμιο που χαρακτηρίζεται και ως πλαστική παραμόρφωση. [4]



**Σχήμα 3.7:** Φόρτιση-αποφόρτιση υλικού, επαναφόρτιση υλικού

Αν το δοκίμιο που αποφορτίσαμε προηγούμενα, το επαναφορτίσουμε με εφελκυστικό φορτίο (Σχ.3.7), παρατηρούμε ότι η καμπύλη επαναφόρτισης ( $Z\Gamma$ ) ακολουθεί σχεδόν την καμπύλη αποφόρτισης ( $\Gamma Z$ ). Στο διάγραμμα του σχήματος 5 γίνεται φανερό ακόμα ότι, κατά την επαναφόρτιση το ευθύγραμμο τμήμα ( $ZK$ ) είναι μεγαλύτερο από το αρχικό ( $OA$ ) και ότι μετά το σημείο  $K$  η καμπύλη ακολουθεί την πορεία της αρχικής καμπύλης ( $OAG$ ) μέχρι τη θραύση του υλικού (σημείο  $\Theta$ ).

Τα προηγούμενα σημαίνουν πως με την αποφόρτιση και στη συνέχεια με την επαναφόρτιση του υλικού, το όριο αναλογίας, όπως και το όριο ελαστικότητας, αυξάνονται σε σχέση με τα αντίστοιχα αρχικά, ενώ το όριο θραύσης παραμένει το ίδιο.

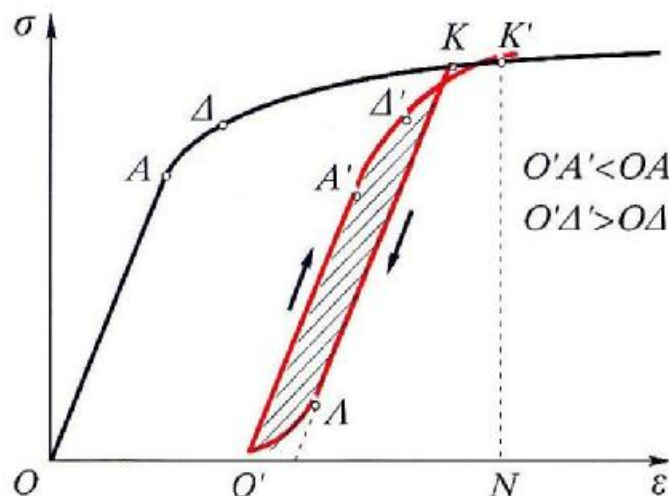
### Βρόγχος υστέρησης

Στο παραπάνω κομμάτι που μιλήσαμε για αποφόρτιση και επαναφόρτιση, λάβαμε υπόψη ότι ο νόμος του Hooke είναι μια μονοσήμαντη σχέση ανάμεσα σε  $\sigma$  και  $\epsilon$  που ισχύει μέσα στην αναλογική περιοχή, εφόσον το εξωτερικό φορτίο αυξάνει πολύ αργά, ώστε οι παραμορφώσεις του δοκιμίου να έχουν το χρόνο να ακολουθήσουν τις αυξήσεις των τάσεων.

Δηλαδή αλλάζουν στιγμιαία παραμορφώσεις και τάσεις. Κάτω από αυτές τις προϋποθέσεις φορτίσεις και αποφορτίσεις είναι από ενεργειακή άποψη αντιστρεπτές, που σημαίνει ότι τόσο η φόρτιση όσο και η αποφόρτιση περιγράφονται από την ίδια γραμμή.

Σε πραγματικές καταστάσεις και υλικά, δυστυχώς παύει να ισχύει η μονοσήμαντη σχέση μεταξύ τάσεων-επιμηκύνσεων και εμφανίζονται τα λεγόμενα ανελαστικά φαινόμενα εσωτερικής τριβής. Τυπικό παράδειγμα ανελαστικού φαινομένου είναι ο βρόγχος υστέρησης.

Αν θεωρήσουμε ένα υλικό που εφελκύεται μέχρι το σημείο  $K$ , πέρα από το όριο διαρροής  $\Delta$ , και στη συνέχεια το αποφορτίσουμε θα ακολουθήσει μια διαδρομή  $K\Lambda O'$  η οποία κατά το μεγαλύτερο τμήμα της είναι παράλληλη στην αρχική ευθεία  $OA$ , εκτός από το τελευταίο κομμάτι  $\Lambda O$  που παρουσιάζει καμπύλωση ώστε οι δύο καμπύλες  $O\Lambda\Delta$  και  $K\Lambda O'$  να έχουν την ίδια μορφή.



Σχήμα 3.8: Βρόγχος υστέρησης



Το τμήμα  $OO'$  είναι η μόνιμη παραμόρφωση. Αν στη συνέχεια επαναφορτίσουμε εφελκυστικά το δοκίμιο θα διαγραφεί η διαδρομή  $O'A'D'K'$  που είναι παρόμοια με την  $OAD$ , όμως τώρα το όριο αναλογίας είναι μικρότερο αλλά το όριο διαρροής είναι μεγαλύτερο από τα αρχικό. Το σημείο  $K'$  βρίσκεται στην καμπύλη που θα διέγραφε το δοκίμιο χωρίς αποφόρτιση.

Η γραμμοσκιασμένη επιφάνεια του διαγράμματος ονομάζεται βρόγχος υστέρησης. Η επιφάνεια αυτή είναι ανάλογη του μηχανικού έργου που υπό μορφή θερμότητας αυξάνει την θερμοκρασία του δοκιμίου ή αποβάλλεται. Είναι χαρακτηριστικό μέγεθος του υλικού. [4]

## **4. ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ**

### **4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Σήμερα περισσότερο από ποτέ είναι σημαντική η γνώση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών. Μία από αυτές είναι η αντοχή του στον εφελκυσμό ή σε θλίψη. Γνωρίζοντας αυτή την ιδιαίτερα σημαντική ιδιότητα μπορούμε να κατασκευάσουμε προϊόντα ποιοτικά, ασφαλή και οικονομικά. Με τη γνώση των αντοχών των εξαρτημάτων που κατασκευάζουμε είμαστε σε θέση να εγγυηθούμε την ομαλή και ασφαλή λειτουργία τους. Αυτός είναι ο σημαντικότερος παράγοντας όταν πρόκειται για προϊόντα που σχετίζονται άμεσα με την υγιεινή και την ασφάλεια. Ακόμα έχοντας αυτές τις γνώσεις μπορούμε να επέμβουμε στη διαδικασία παραγωγής και να βελτιώσουμε την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων.

### **4.2 ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ**

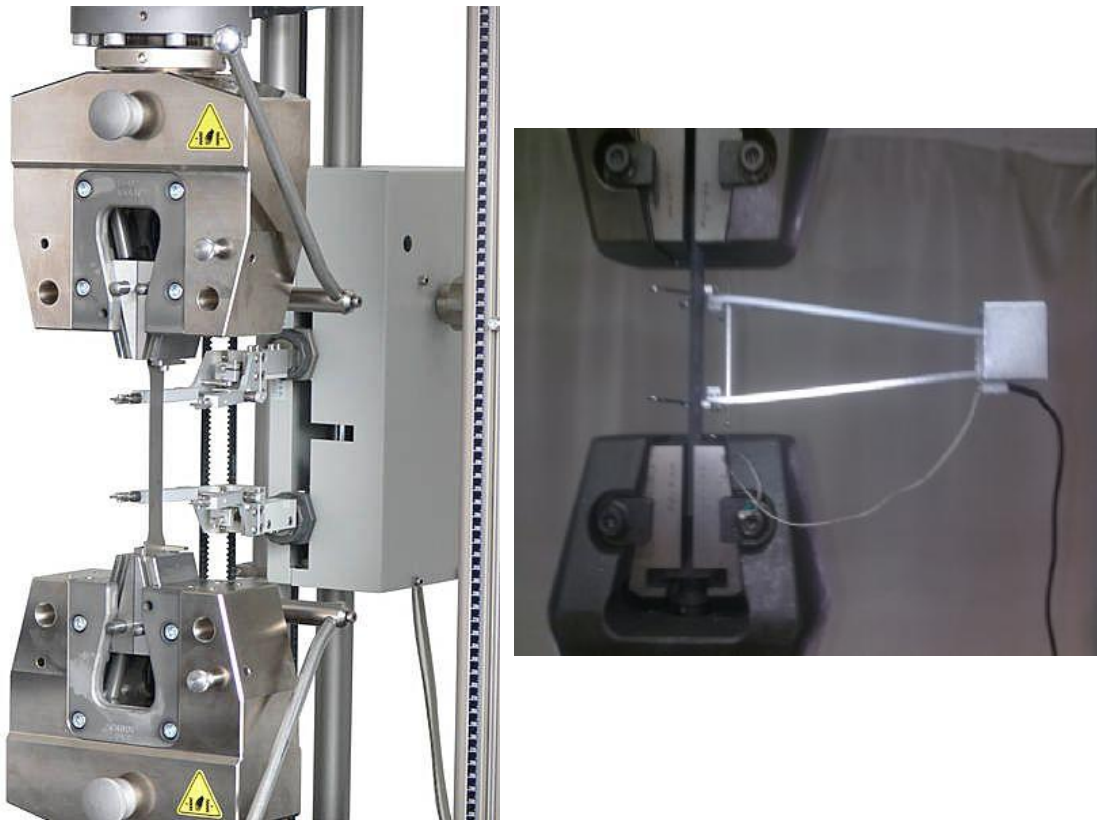
Η πιο συνηθισμένη συσκευή εφελκυσμού είναι η universal testing machine. Αυτός ο τύπος μηχανής έχει δύο κεφαλές. Οι δύο αυτές κεφαλές είναι προσαρμοσμένες στη διάταξη της μηχανής, έτσι ώστε η μία να είναι πακτωμένη στο πλαίσιο της μηχανής ενώ η δεύτερη είναι κινητή και χρησιμοποιείται για να ασκήσει ομοαξονική εφελκυστική-θλιπτική τάση στο δοκίμιο. Υπάρχουν δύο τύποι μηχανών, οι υδραυλικές και οι ηλεκτρικές.

Υπάρχουν τρεις παράμετροι με βάση τις οποίες επιλέγουμε το είδος της μηχανής που θα χρησιμοποιήσουμε, τη δύναμη, την ταχύτητα και την ακρίβεια. Η δύναμη αναφέρεται στο γεγονός ότι η μηχανή πρέπει να είναι σε θέση να παράξει αρκετή δύναμη (pull strength) ώστε να επέλθει θραύση στο δοκίμιο. Η μηχανή πρέπει να είναι σε θέση να εφαρμόσει τον κατάλληλο ρυθμό μεταβολής της δύναμης, ανάλογα με τις ανάγκες του πειράματος. Τέλος η μηχανή θα πρέπει να είναι σε θέση να μετρά με ακρίβεια την εφελκυστική-θλιπτική δύναμη και την επιμήκυνση.

Σημαντικό ρόλο στο πείραμα έχει η ευθυγράμμιση του δοκιμίου στην τοποθέτηση του στη μηχανή, γιατί σε διαφορετική περίπτωση η μηχανή ασκεί στο δοκίμιο καμπτικές ή διατμητικές δυνάμεις, οι οποίες αλλοιώνουν τα αποτελέσματα.

Στο πείραμα του εφελκυσμού λόγω των μικρών μετατοπίσεων και της ακρίβειας που χρειάζεται, χρησιμοποιούμε ειδικές μετρητικές συσκευές που ονομάζονται μηκυνσιόμετρα. Υπάρχουν δύο είδη μηκυνσιομέτρων, τα επαφής και τα μη επαφής.

Τα επαφής είναι τα πιο παλιά και χωρίζονται σε δυο ακόμη κατηγορίες. Το πρώτο είδος μηκυνσιόμετρου ονομάζεται clip-on. Αυτού του είδους τα μηκυνσιόμετρα παράγονται σε διάφορες παραλλαγές και μπορούν να μετρήσουν διάφορα εύρη μετατοπίσεων. Έχουν το πλεονέκτημα του χαμηλού κόστους και



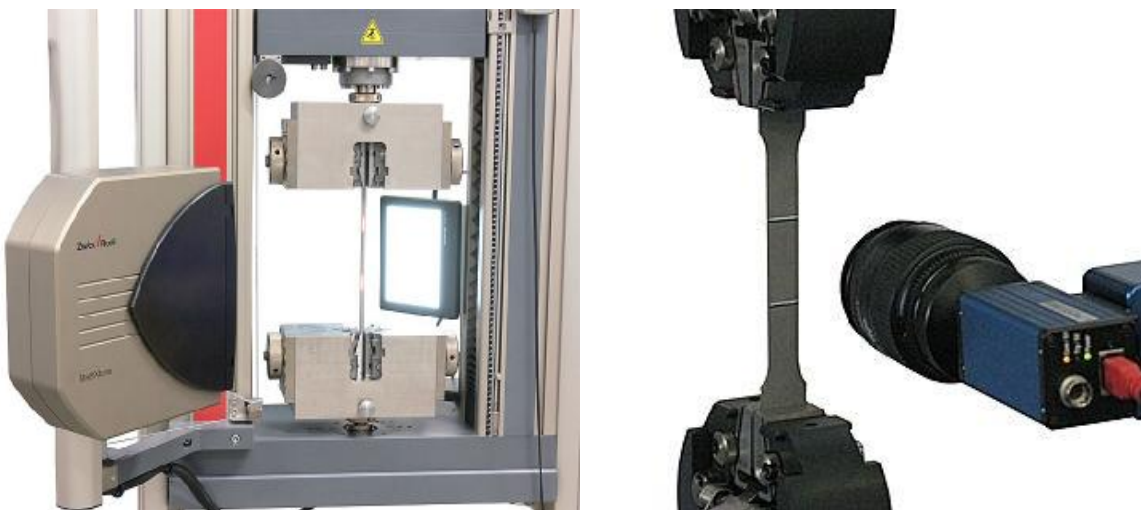
**Σχήμα 4.1:** Μηκυνσιόμετρο τύπου sensor arm, και τύπου clip on

της ευκολίας στη χρήση τους, αλλά μπορεί να επηρεάσουν τα αποτελέσματα σε μικρά-λεπτά δοκίμια. Το δεύτερο είδος αυτής της κατηγορίας είναι τα ψηφιακά μηκυνσιόμετρα που ονομάζονται sensor arm. Αυτά μπορούν να εφαρμοστούν στο δοκίμιο αυτόματα, και για αυτό το λόγο έχουμε ακριβέστερα και περισσότερα επαναλαμβανόμενα αποτελέσματα σε σχέση με το μηκυνσιόμετρα

τύπου clip-on. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να παραμείνουν στο δοκίμιο μέχρι την θραύση του, και ότι έχουν τη δυνατότητα μέτρησης μεγάλων μετατοπίσεων.

Τα μηκυνσιόμετρα χωρίς επαφή χωρίζονται και αυτά σε δυο κατηγορίες. Το πρώτο είδος είναι τα τύπου laser. Η αρχή λειτουργίας τους είναι αρχικά ο φωτισμός της επιφάνειας του δοκιμίου, στη συνέχεια η αντανάκλαση λαμβάνεται από μια κάμερα CCD και η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται από σύνθετους αλγορίθμους. Επιπλέον με αυτού του είδους τα μηκυνσιόμετρα δεν είναι απαραίτητο να προσδιορίζονται τα σημεία πρόσδεσης του μηκυνσιομέτρου στο δοκίμιο, αφού αυτό γίνεται αυτόματα από το μηκυνσιόμετρο.

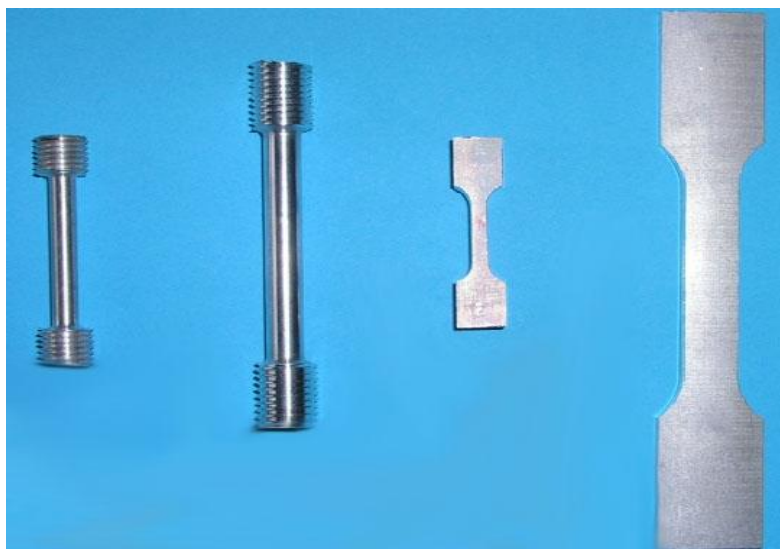
Το δεύτερο είδος είναι τα τύπου βίντεο. Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται με τα συγκεκριμένα μηκυνσιόμετρα, έχουν ειδικό σχήμα και κατάλληλες διαβαθμίσεις στην επιφάνεια τους. Στη συνέχεια μια ειδική φωτογραφική μηχανή καταγράφει συνεχώς τις μετατοπίσεις των διαβαθμίσεων αυτών και με αυτό τον τρόπο προκύπτει η συνολική μετατόπιση. [9]



**Σχήμα 4.2:** Μηκυνσιόμετρο τύπου laser, και τύπου video

### **4.3 ΔΟΚΙΜΙΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ**

Υπάρχουν δυο κατηγορίες δοκιμών με βάση τα διεθνή πρότυπα, τα κυκλικής διατομής και τα ορθογωνικής διατομής. Η διαστασιολόγηση των δοκιμών του πειράματος εφελκυσμού γίνεται από συγκεκριμένους πίνακες που προέρχονται τα διεθνή πρότυπα. Τα πρότυπα αυτά προσδιορίζουν εκτός από τις διαστάσεις των δοκιμών και της παραμέτρους εκτέλεσης των πειραμάτων, όπως ταχύτητα, εύρος αποδεκτών τιμών στα πειράματα μας. Αναφορικά τα είδη των προτύπων είναι ASTM, DIN.



**Σχήμα 4.3:** Δοκίμια εφελκυσμού τύπου dog bone

#### **4.4 ΜΗΧΑΝΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ (WDW-50E)**

Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματά μας είναι μια μηχανή τύπου (computer controlled electronic universal testing machine) μοντέλο WDW-50E της εταιρίας TIME GROUP Inc. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Δομικών Υλικών του τμήματος Ανακαίνισης και Αποκατάστασης Κτηρίων. Η μηχανή είναι σχεδιασμένη για εφελκυσμό, κάμψη και θλίψη. Είναι ηλεκτρονικά ελεγχόμενη μέσω υπολογιστή με ιδικό hardware και software. Το πρόγραμμα οδήγησης της μηχανής είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την εκπόνηση των πειραμάτων μας. Η λειτουργικότητα του λογισμικού της μηχανής είναι τέτοια ώστε να μας βοηθήσει αρκετά τόσο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων όσο και στη μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφέρουμε ότι η συγκεκριμένη μηχανή χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά για τις ανάγκες της συγκεκριμένης πτυχιακής. [8]

Τα κύρια χαρακτηριστικά της μηχανής είναι:

No.	Χαρακτηριστικά	Τεχνικές παράμετροι
1	Max load capacity	50kN
2	Accuracy of load	Grade 0.5
3	Measuring range of load	200N~50kN
4	Resolution of load	0.001%FN
5	Deformation measuring range	2%~100%
6	Deformation measuring accuracy	Grade 1

7	Resolution of displacement	0.001mm
8	Relative error of indicating value of crosshead displacement	$\pm 0.5\%$
9	Rate range	0.005mm/min~500mm/min
10	Relative error of crosshead rate	$\pm 1\%$
11	Max. Tensile travel	700mm
12	Max. compression travel	600mm
13	Width for test space	575mm
14	Max. travel of crosshead	1150mm
15	Overall dimension	<b>945mm × 654mm</b> × <b>2176mm</b>
16	Weight of load frame	700kg
17	Power supply	1.5kW τριφασικό 380V

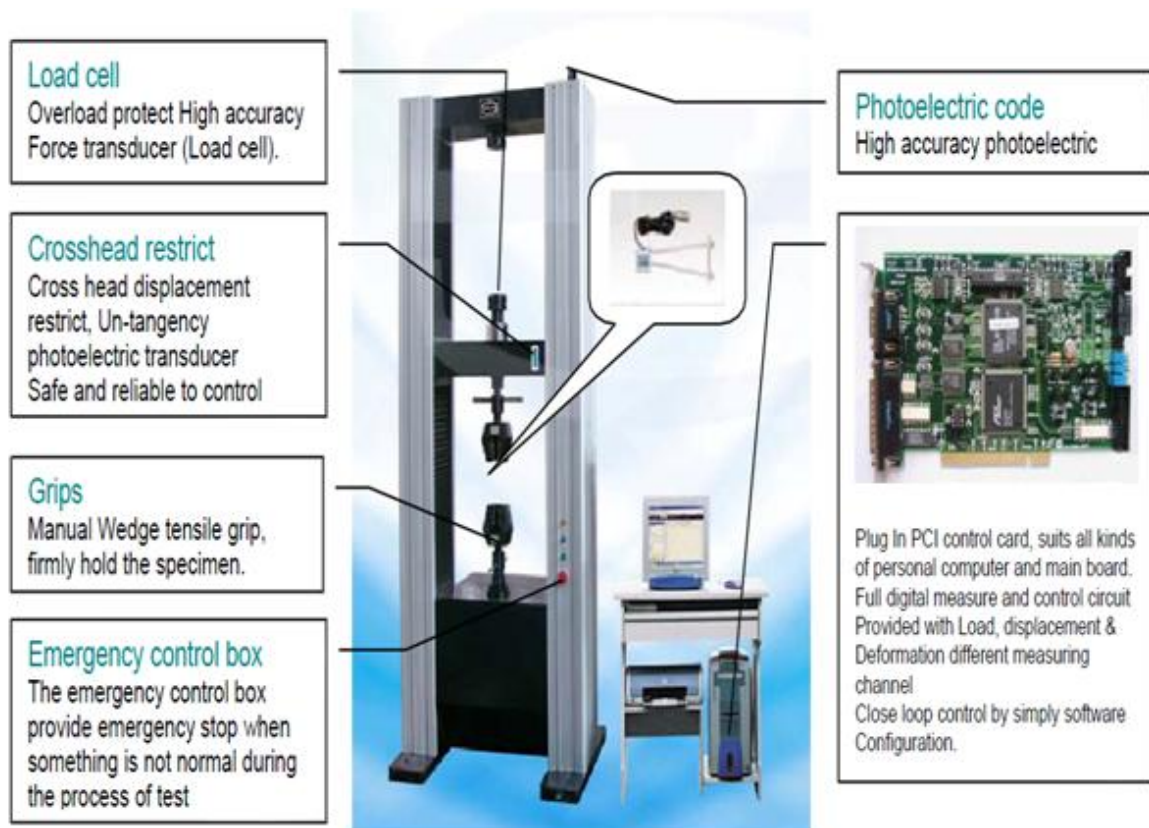
### Συνθήκες λειτουργίας της μηχανής:

- Θερμοκρασία περιβάλλοντος: 10~350°C
- Σχετική υγρασία:  $\leq 80\%$
- Χώρος χωρίς δονήσεις, διαβρωτικά μέσα, δυνατά ηλεκτρομαγνητικά πεδία
- Η διακύμανση της τάσης να μην υπερβαίνει το  $\pm 10\%$  της ονομαστικής τάσης
- Απαιτείται τοποθέτηση σε στέρεα βάση με επιπεδότητα 0.2/1000μm

Η μηχανή αποτελείται από 3 μέρη:

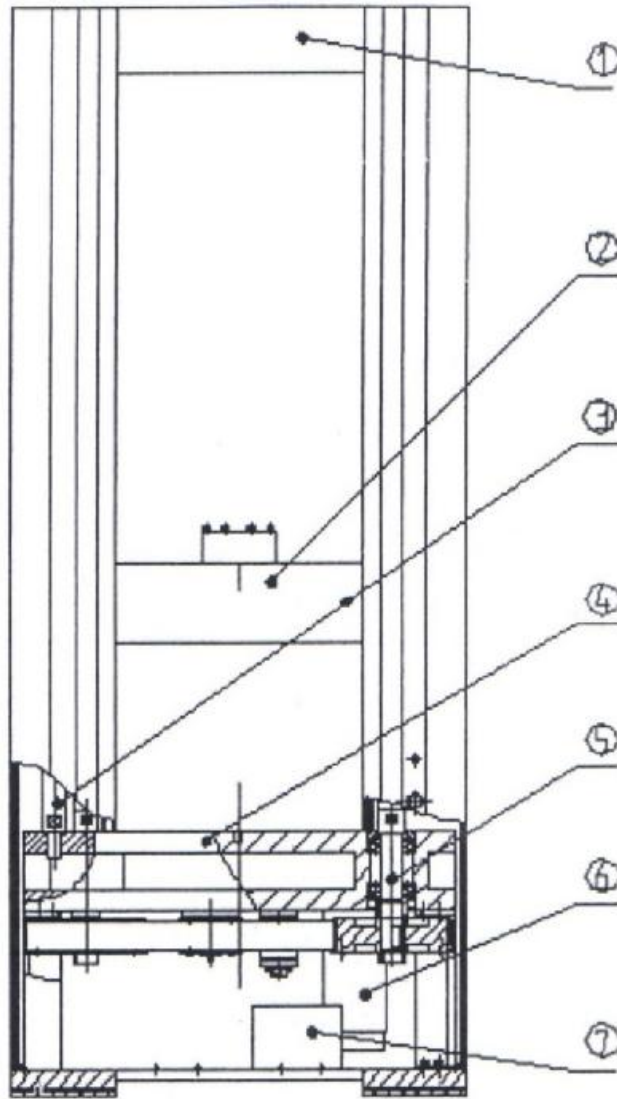
- Σύστημα εφαρμογής φορτίου: το πλαίσιο και οι κεφαλές αποτελούν το σύστημα εφαρμογής φορτίου.
- Σύστημα οδήγησης: AC σερβοκινητήρας και σύστημα μειωτήρα αποτελούν το σύστημα οδήγησης.
- Το σύστημα μέτρησης, καταγραφής και ανάλυσης του φορτίου αποτελείται από ειδική κάρτα H/Y και κατάλληλο λογισμικό.

Η διάταξη της μηχανής είναι ως εξής όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:



**Σχήμα 4.4:** Μηχανή εφελκυσμού WDW-50E

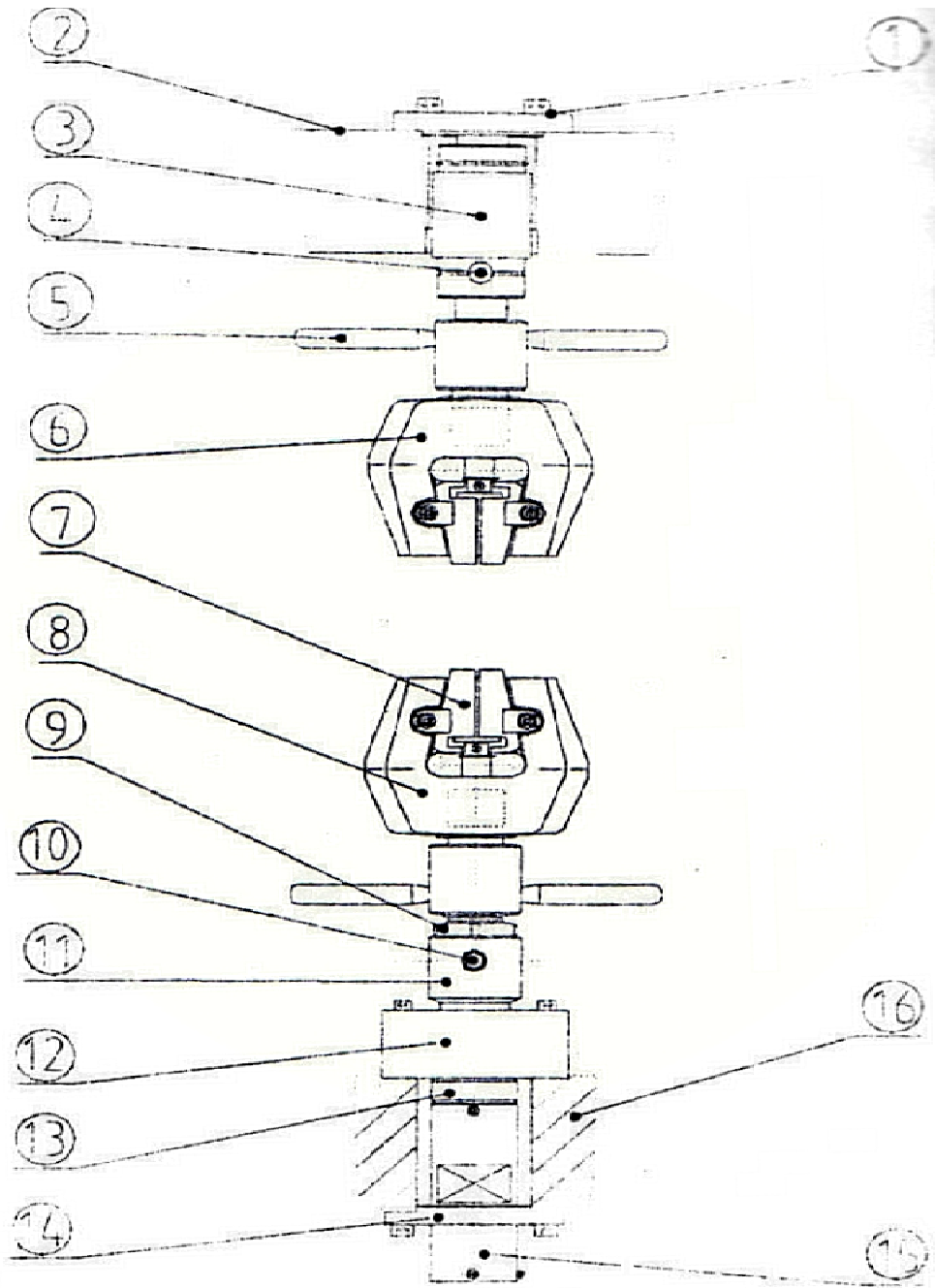
Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται τα βασικά μέρη της μηχανής που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα μας. Αρχικά βλέπουμε τα grips, τα οποία σφίγγουν με μηχανικό τρόπο. Στη συνέχεια βλέπουμε το δυναμόμετρο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του φορτίου εφελκυσμού/θλίψης. Τέλος βλέπουμε την PCI κάρτα ελέγχου της μηχανής η οποία διαχειρίζεται όλες τις λειτουργίες της μηχανής.



**Σχήμα 4.5:** Πλαίσιο μηχανής εφελκυσμού WDW-50E

1. Upper crosshead
2. Medium crosshead
3. Pilot column
4. Working bench
5. Ball screw -lead
6. Servo motor
7. Governing speed system





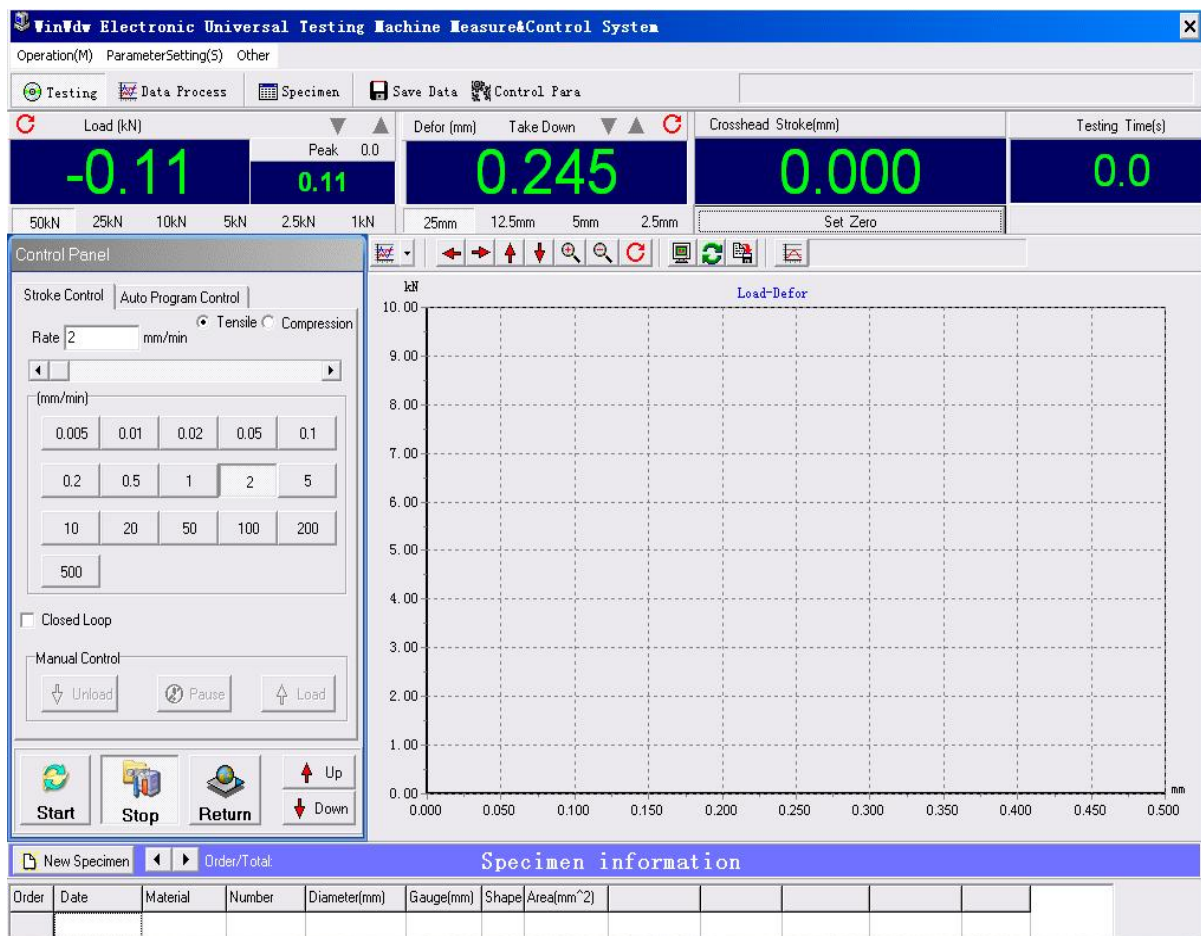
**Σχήμα 4.6:** Grips μηχανής εφελκυσμού WDW-50E

1. Upper connector
2. Upper crosshead
3. Universal joint
4. Fixing pin
5. Turning handle
6. Upper grip body
7. Jaw
8. Lower grip body

9. Locking nut
10. Fixing pin
11. Connecting shaft
12. Load cell
13. Connecting nut
14. Covering plate
15. Guide rod
16. Medium crosshead

#### 4.5 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

Το πρόγραμμα οδήγησης της μηχανής, δείχνει συνεχώς τις μεταβολές του φορτίου, της παραμόρφωσης και του χρόνου. Δίνει επίσης τη δυνατότητα στο χρήστη να εκτελεί το πείραμα σε κλειστό βρόγχο ελέγχου, καθώς και να τερματίζει τη διαδικασία του πειράματος μετά τη θραύση του δοκιμίου. Τέλος το πρόγραμμα μπορεί να εκτελεί το πείραμα με βάση τα διεθνή πρότυπα όπως ISO, ASTM, EN κ.λ.π. [8]




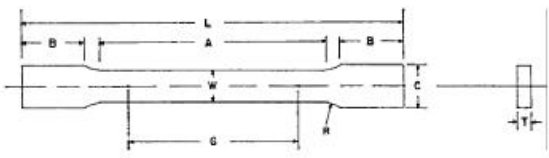
Σχήμα 4.7: Πρόγραμμα οδήγησης μηχανής

## 5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟ

### 5.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ST37 ΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Τα πρώτα δοκίμια κατασκευάστηκαν με τα αμερικανικά πρότυπα (astm), όπως φαίνεται στις παρακάτω φωτογραφίες.

 A 370 – 06



DIMENSIONS

	Standard Specimens				Subsize Specimen	
	Plate-Type, 1½-in. Wide		Sheet-Type, ½-in. Wide		¼-in. Wide	
	in.	mm	in.	mm	in.	mm
G—Gage length (Notes 1 and 2)	8.00 ± 0.01	200 ± 0.25	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10	1.000 ± 0.003	25.0 ± 0.08
W—Width (Notes 3, 5, and 6)	1½ + ¼ – ¼	40 + 3 – 6	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.250 ± 0.002	6.25 ± 0.05
T—Thickness (Note 7)			Thickness of Material			
R—Radius of fillet, min (Note 4)	½	13	½	13	¼	6
L—Over-all length, min (Notes 2 and 8)	18	450	8	200	4	100
A—Length of reduced section, min	9	225	2¼	60	1¼	32
B—Length of grip section, min (Note 9)	3	75	2	50	1¼	32
C—Width of grip section, approximate (Notes 4, 10, and 11)	2	50	¾	20	¾	10

**Πίνακας 5.1:** Πρισματικά δοκίμια ASTM



**Σχήμα 5.2:** Κατασκευή πρισματικών δοκιμίων σε εργαλειομηχανή C.N.C.




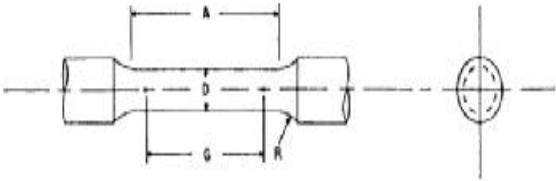
**Σχήμα 5.3: Πρισματικά δοκίμια**

Η μορφή των δοκιμίων παρόλο που ενδείκνυται από τα αμερικανικά πρότυπα σύντομα εγκαταλείφτηκε στην περίπτωση μας διότι το μηκυνσιόμετρο που είχαμε στη διάθεση μας υποστήριζε μόνο κυλινδρικά δοκίμια. Το μηκυνσιόμετρο αυτό ήταν τύπου clip-on και στη διάθεση μας είχαμε μόνο ένα ζεύγος ελατηρίων που ήταν για δοκίμια κυλινδρικής διατομής και συγκεκριμένων διαμέτρων.

Τα αρχικά δοκίμια είχαν πρισματική μορφή με αποτέλεσμα τα ελατήρια του μηκυνσιόμετρο να μην μπορούν να εφαρμόσουν σωστά στην επιφάνεια του δοκιμίου με συνέπεια να έχουμε το φαινόμενο του «γλιστρήματος» (slipping effect) και να έχουμε μεγάλο σφάλμα στα αποτελέσματα μας.

Μετά από αυτή την παρατήρηση, δοκιμάσαμε δοκίμια κυλινδρικής διατομής για τη σωστή λειτουργία του μηκυνσιόμετρο. Λόγω του ότι στη διάθεση μας είχαμε μόνο ένα ζεύγος ελατηρίων αναγκαστήκαμε να κάνουμε δοκιμές με διάφορες διαμέτρους προκειμένου να βρούμε την κατάλληλη διάσταση. Έτσι καταλήξαμε στη διάμετρο των 8mm όπου οι τιμές των αποτελεσμάτων ήταν πιο αποδεκτές, σύμφωνα με τιμές που προσδιορίζουν το υλικό των πειραμάτων μας St37. Η μορφή των δοκιμίων κυλινδρικής διατομής σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM έχει συγκεκριμένη διαμόρφωση όπως φαίνεται στο παρακάτω πίνακα 5.4. Λόγω όμως της μικρής διαμέτρου (8mm) κατέστη αδύνατο να τα επεξεργαστούμε σε τόρνο με αποτέλεσμα να εγκαταλειφτεί αυτή η ιδέα και να καταλήξουμε στα δοκίμια της φωτογραφίας 5.5.

 A 370



**DIMENSIONS**

Nominal Diameter	Standard Specimen				Small-Size Specimens Proportional to Standard					
	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm
G—Gage length	2.00 ± 0.005	50.0 ± 0.10	1.400 ± 0.005	35.0 ± 0.10	1.000 ± 0.005	25.0 ± 0.10	0.640 ± 0.005	16.0 ± 0.10	0.450 ± 0.005	10.0 ± 0.10
D—Diameter (Note 1)	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.350 ± 0.007	8.75 ± 0.18	0.250 ± 0.005	6.25 ± 0.12	0.160 ± 0.003	4.00 ± 0.08	0.113 ± 0.002	2.50 ± 0.05
R—Radius of fillet, min	3/8	10	1/4	6	3/16	5	5/32	4	3/16	2
A—Length of reduced section, min (Note 2)	2 1/4	60	1 3/4	45	1 1/4	32	3/4	20	3/8	16

**Πίνακας 5.4:** Κυλινδρικά δοκίμια ASTM



**Εικόνα 5.5:** Τελική μορφή δοκιμίων

Μετά την εύρεση της τελικής διατομής των δοκιμίων, ήταν αναγκαίο να προσδιοριστούν κάποιες άλλες παράμετροι, όπως το μήκος των δοκιμίων και η ταχύτητα των πειραμάτων. Έτσι το αρχικό μήκος του δοκιμίου είναι 15mm. Αυτό προσδιορίστηκε με βάση το gauge length που υπάρχει σαν input στο πρόγραμμα της μηχανής το οποίο είναι 5mm δηλαδή όσο είναι το μήκος μεταξύ των δύο άκρων του μηκυσιομέτρου όταν αυτό είναι στη μορφή της εικόνας 5.6



**Εικόνα 5.6:** Μηκυνσιόμετρο σε κλειστή μορφή

## 5.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΣΕ ΧΑΛΥΒΑ ST37 ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ

### 5.2.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΤΩΝ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ

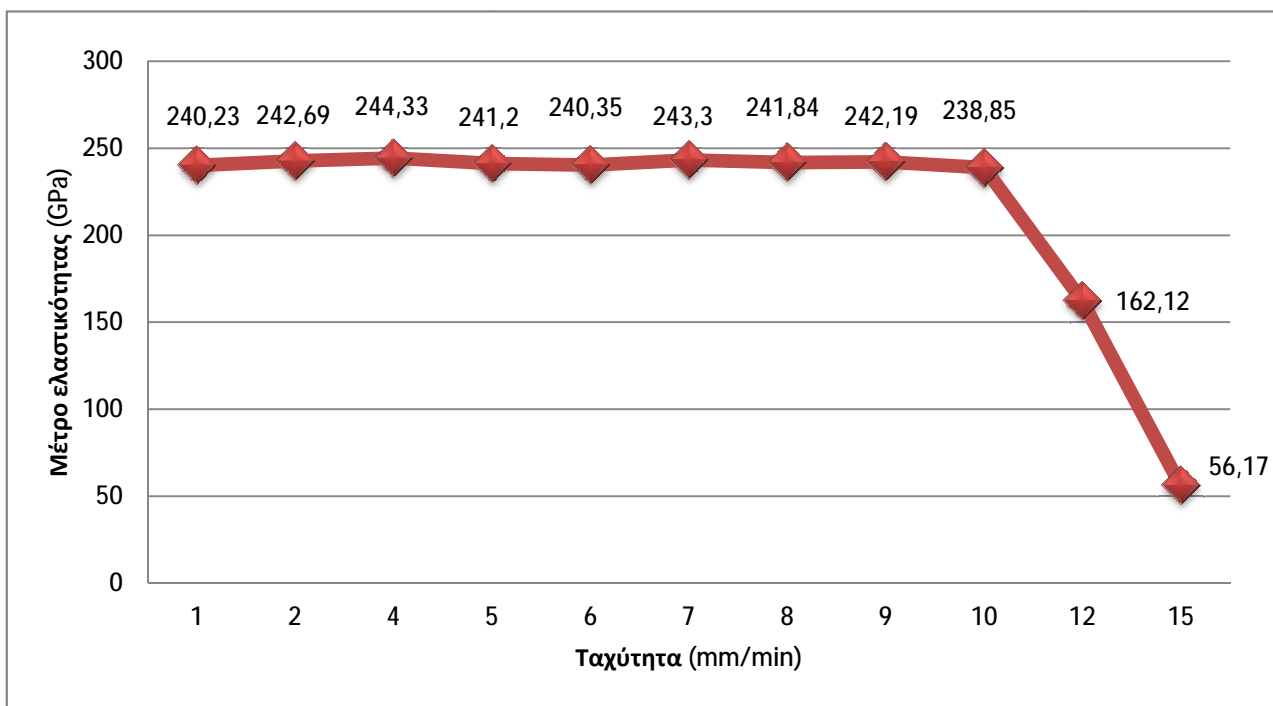
Η σειρά αυτών των πειραμάτων έχει σκοπό τον προσδιορισμό της παραμέτρου της ταχύτητας η οποία θα χρησιμοποιηθεί στο σύνολο των υπολοίπων πειραμάτων. Ο παρακάτω πίνακας αναφέρει τα αποτελέσματα των πειραμάτων που εκτελεστήκαν με διαφορετικές ταχύτητες.

α/α	Μέγιστο φορτίο	Μέγιστη τάση εφελκυσμού (Rm)	Μέτρο ελαστικότητας	Άνω όριο διαρροής	Κάτω όριο διαρροής	Μέγιστη παραμόρφωση	At	Agt	Ταχύτητα
	kN	Mpa	Gpa	Mpa	Mpa	mm	%	%	mm/min
1	23,96	475	240,23	396	385	26,158	52,5	33,5	1
2	24,36	485	242,69	402	392	16,267	32,5	20	2
3	24,48	485	244,33	419	407	27,204	54,5	34	4
4	24,19	480	241,2	398,5	390	15,736	31,5	20,5	5
5	24,52	490	240,35	422	409	25,021	50	32	6
6	24,29	485	243,3	408	393	18,973	38	20,5	7
7	24,22	480	241,84	409	391	23,001	46	27	8
8	24,48	485	242,19	418,5	405	18,182	36,5	20,5	9
9	24,34	485	238,85	408	395	25,919	52	30	10
10	24,4	485	162,12	410	395	18,116	36,5	20	12
11	24,24	480	56,17	405	395	18,395	37	20,5	15

**Πίνακας 5.7 :** Πειραματικά αποτελέσματα για διαφορετικές ταχύτητες

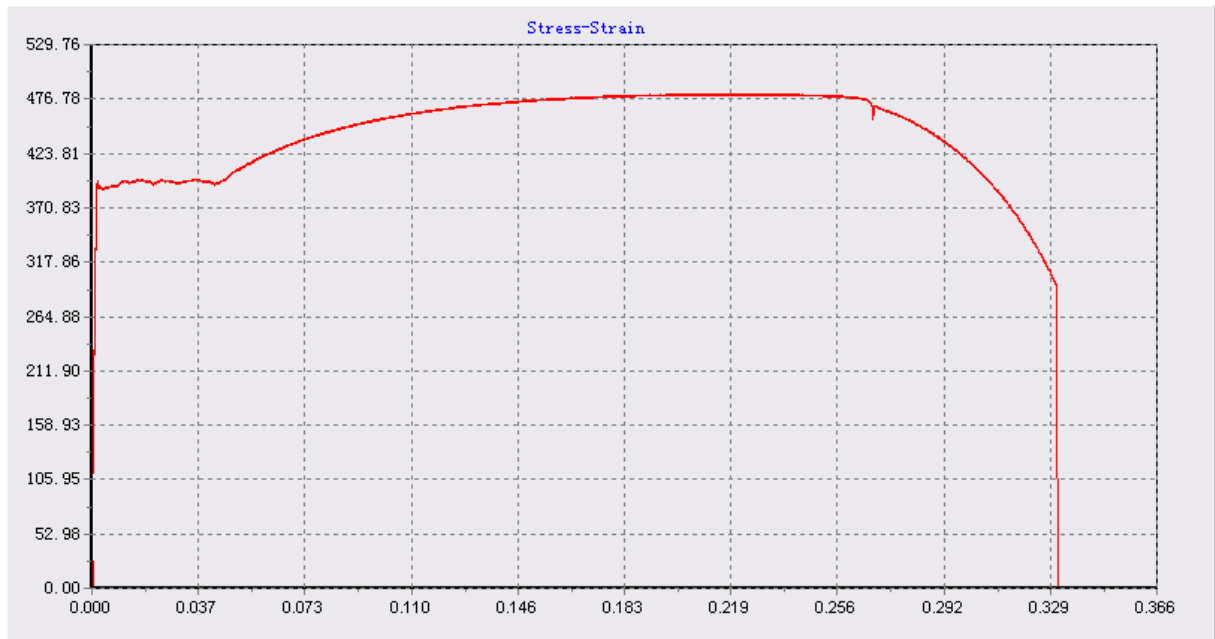
## 5.2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Η παρακάτω γραφική παράσταση μας δίνει μια απεικόνιση των τιμών του μέτρου ελαστικότητας σε συνάρτηση με την παράμετρο της ταχύτητας. Το συμπέρασμα που βγάζουμε από αυτή τη γραφική παράσταση, είναι ότι υπάρχει μια φθίνουσα πορεία της τιμής του μέτρου ελαστικότητας, όταν η ταχύτητα αυξάνεται επίσης υπάρχουν και κάποιες τιμές οι οποίες δεν είναι αποδεκτές και προέρχονται από κάποιο σφάλμα κατά την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας. Έτσι καταλήγουμε στην επιλογή ταχύτητας στο πεδίο των τιμών το οποίο βρίσκεται μεταξύ των τιμών της ταχύτητας από 1mm/min έως 10mm/min. Πιο συγκεκριμένα η ταχύτητα που επιλέξαμε για την διεξαγωγή των πειραμάτων είναι αυτή των 2mm/min, αφού και οι τιμές που έχουμε είναι αποδεκτές και δεν παρατηρείται εμφάνιση του φαινομένου «γλιστρήματος» που επηρεάζει κατά πολύ τις τιμές των αποτελεσμάτων.

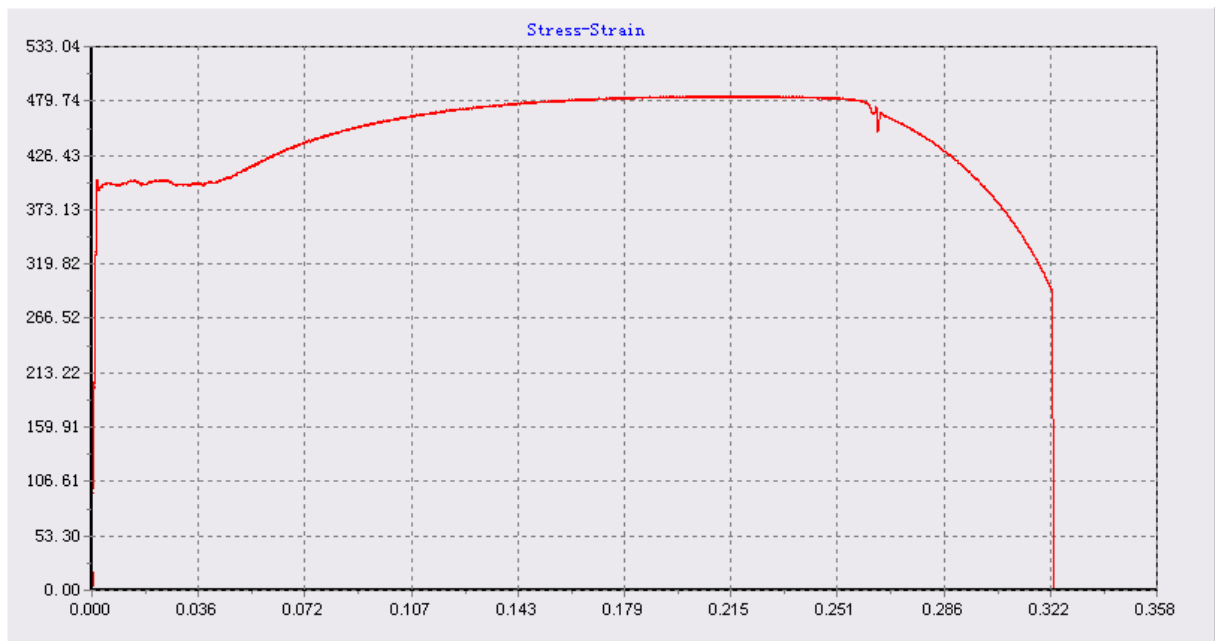


**Εικόνα 5.8:** Γραφική παράσταση μέτρου ελαστικότητας(E) –ταχύτητας(U)

Παρακάτω απεικονίζονται οι γραφικές παραστάσεις τάσης-παραμόρφωσης για τα πειράματα που έγιναν με διαφορετικές ταχύτητες

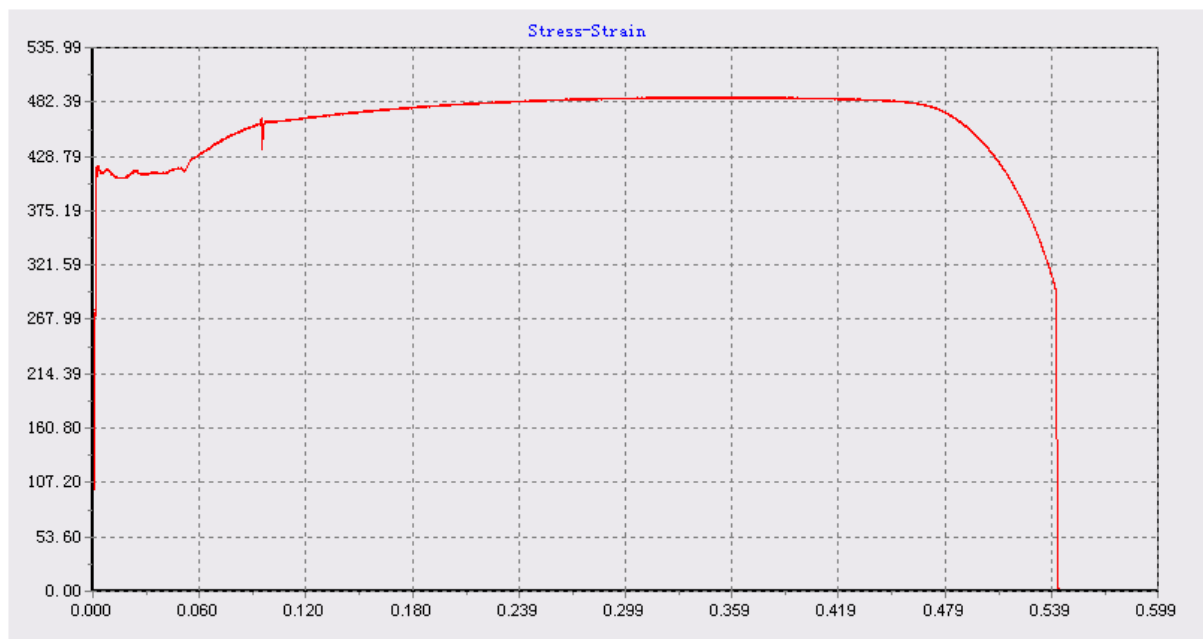


**Διάγραμμα 5.9:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 1

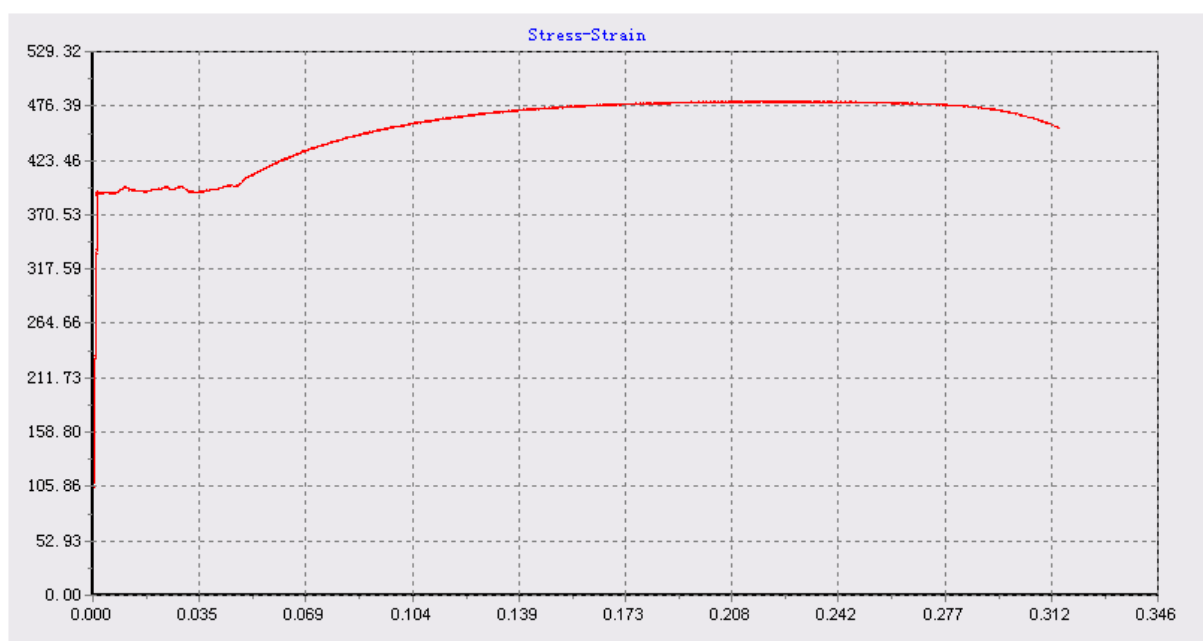


**Διάγραμμα 5.10:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 2

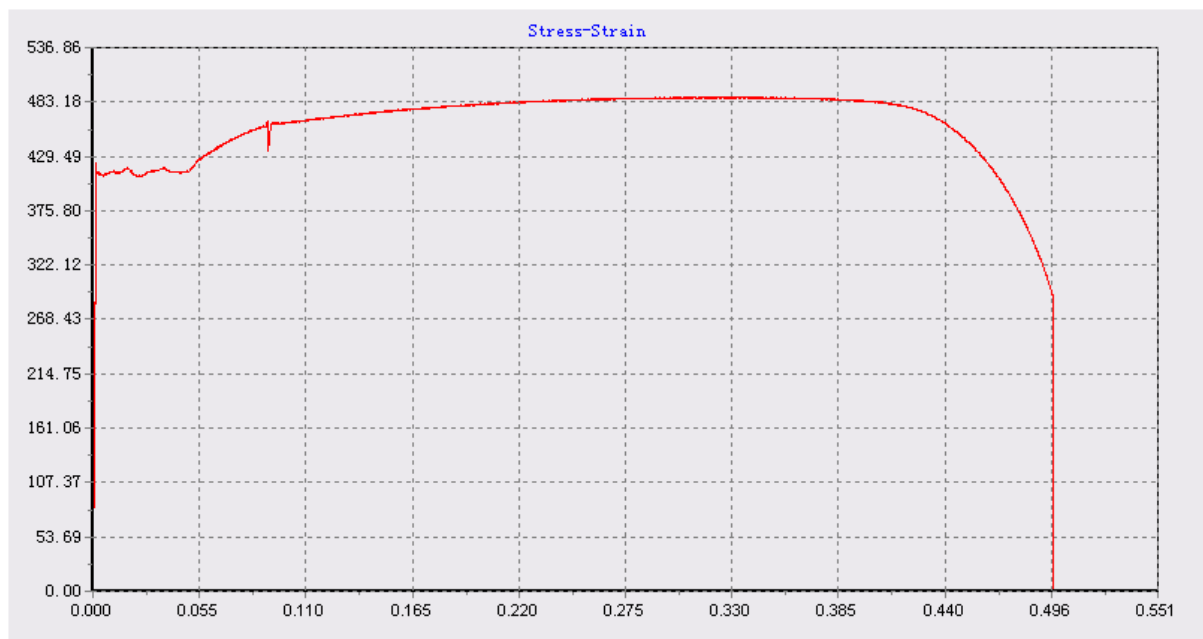




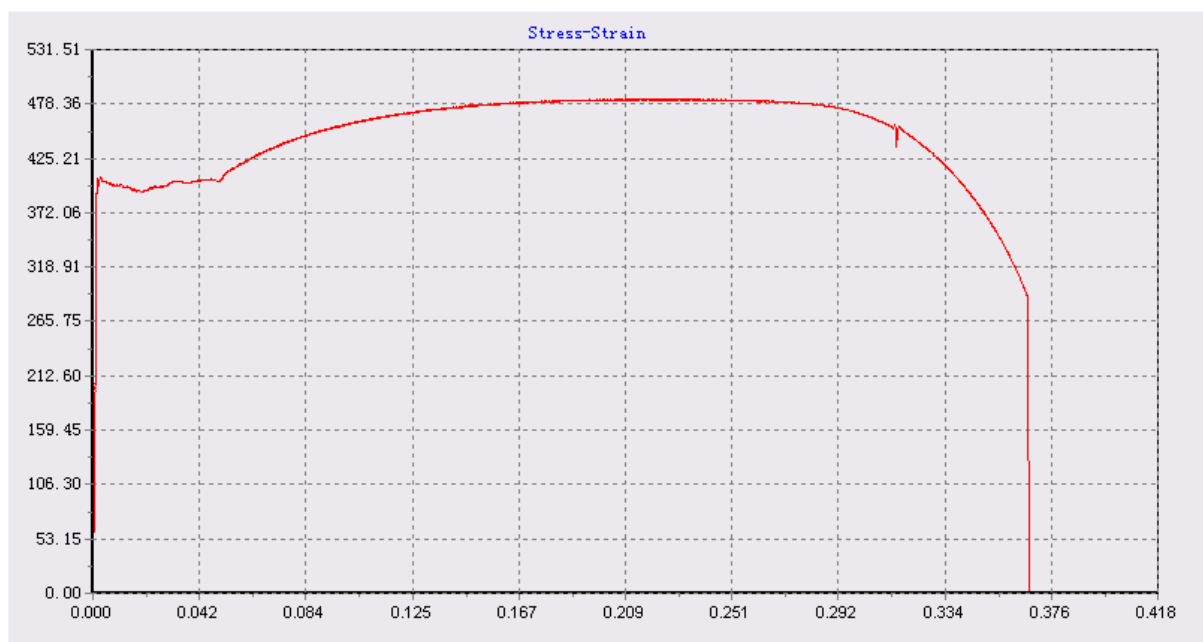
**Διάγραμμα 5.11:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 3



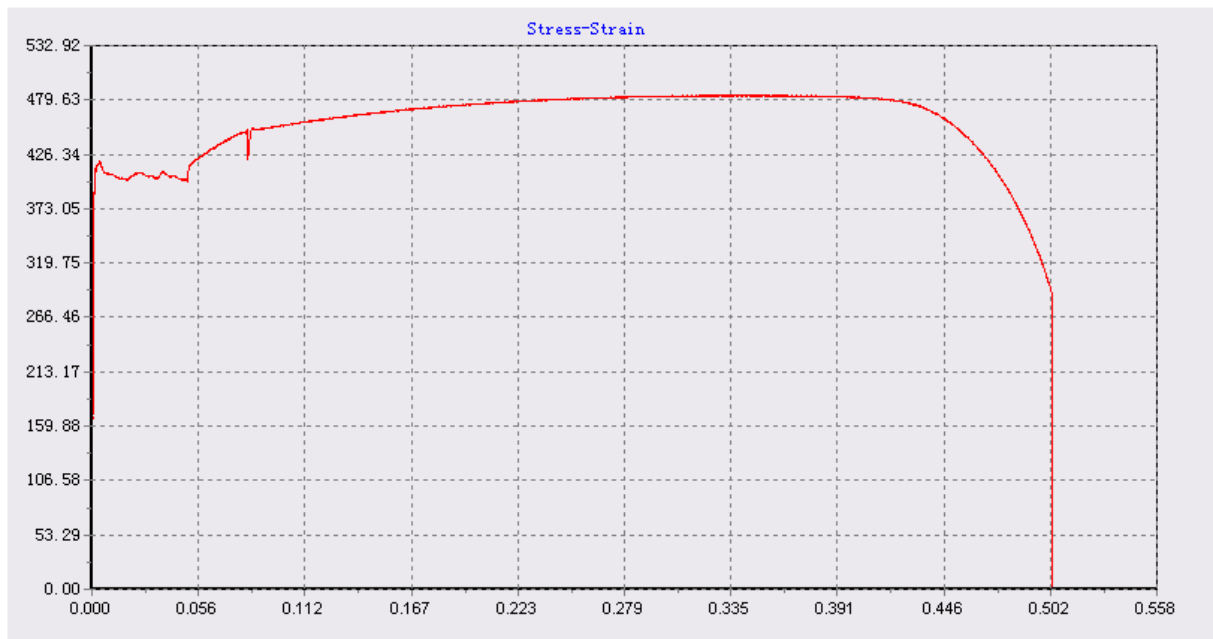
**Διάγραμμα 5.12:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 4



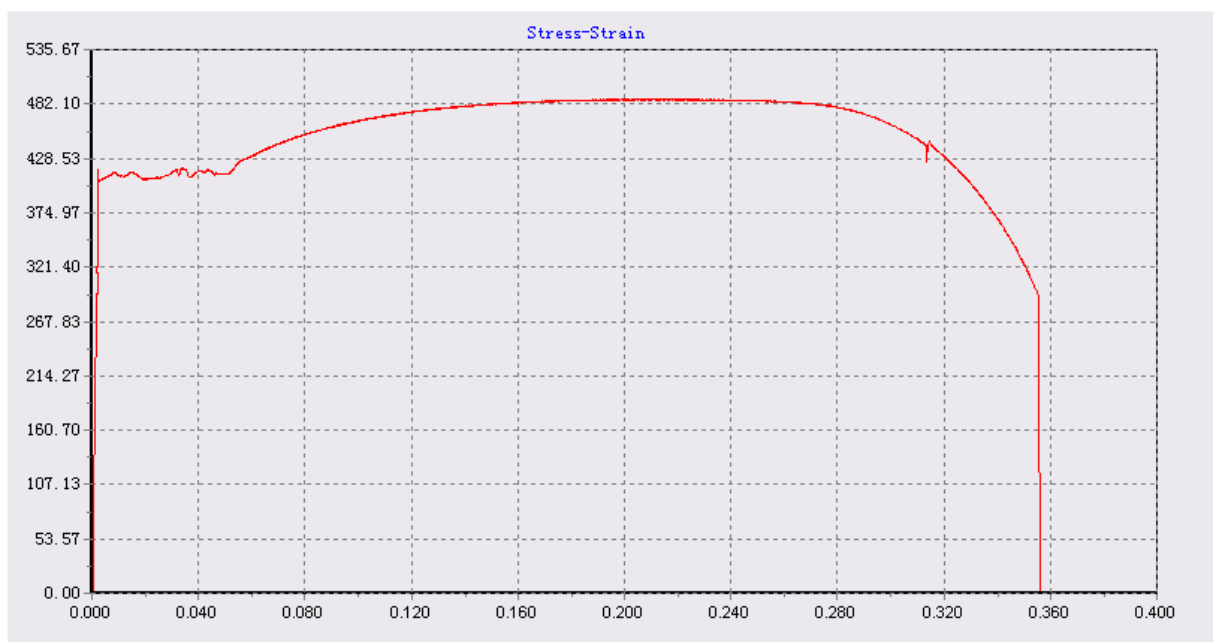
**Διάγραμμα 5.13:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 5



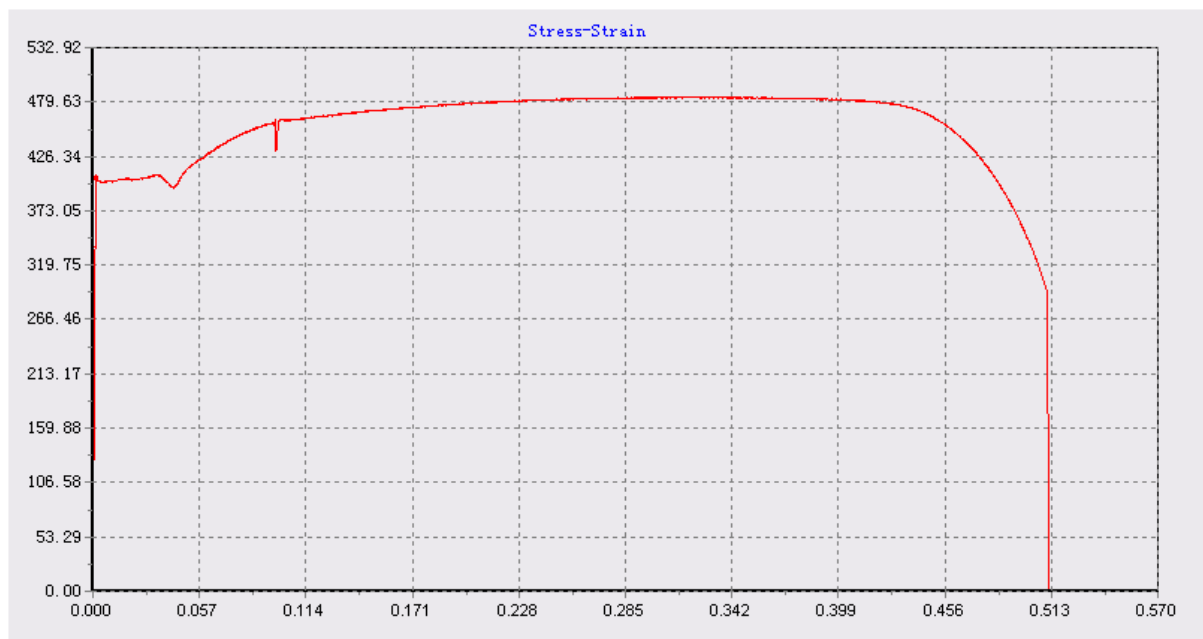
**Διάγραμμα 5.14:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 6



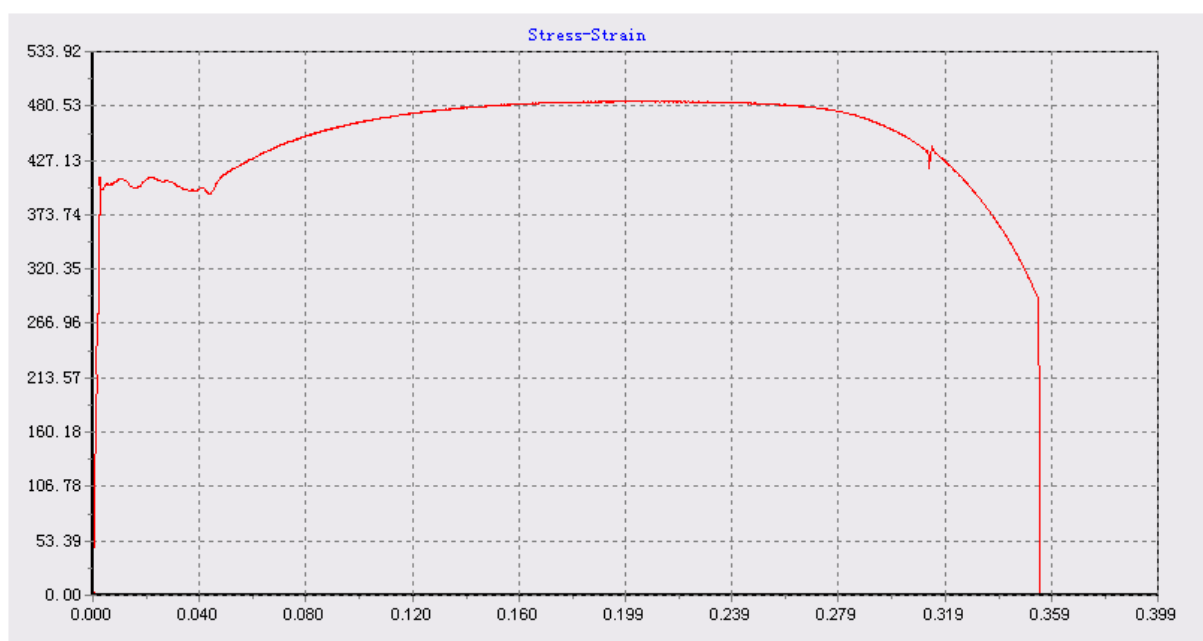
**Διάγραμμα 5.15:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 7



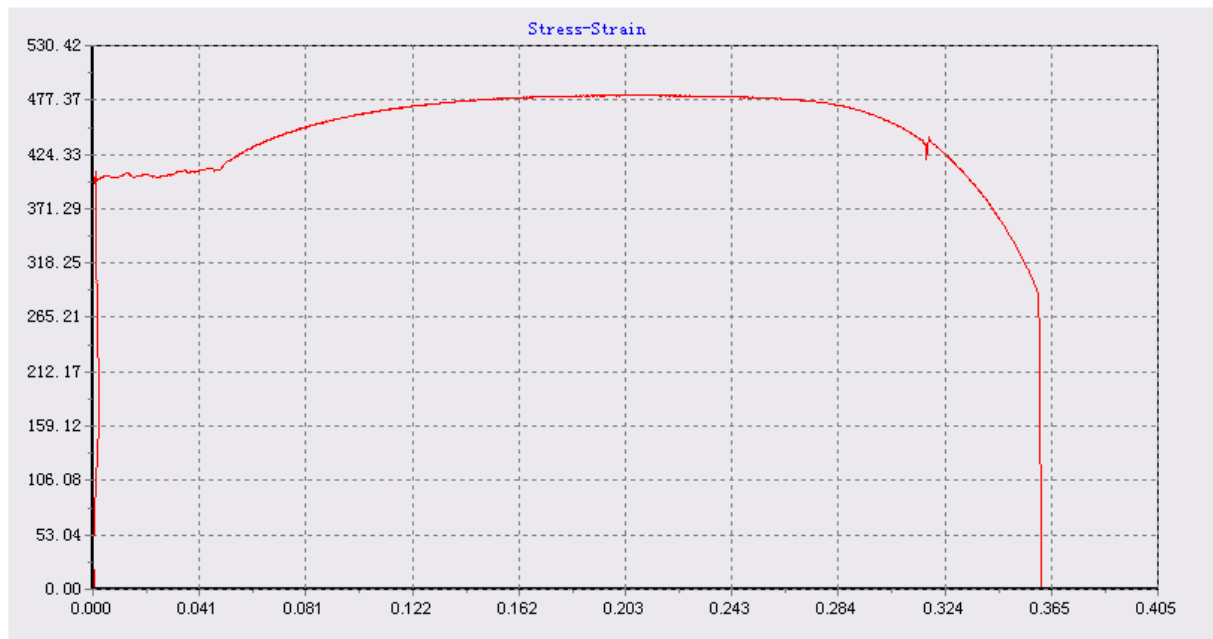
**Διάγραμμα 5.16:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 8



**Διάγραμμα 5.17:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 9



**Διάγραμμα 5.18:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 10



**Διάγραμμα 5.19:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 11

## 5.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΣΕ ΧΑΛΥΒΑ ST37 ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ

### 5.3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ

Σε αυτή τη σειρά πειραμάτων σκοπός μας ήταν να επαληθεύσουμε τις τιμές που χαρακτηρίζουν το χάλυβα st37 σε εφελκυστικά φορτία. Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε τα αποτελέσματα που βρήκαμε από τα πειράματα για σταθερή ταχύτητα και παρατηρούμε ότι οι τιμές αυτές ακολουθούν σε μεγάλο βαθμό τη βιβλιογραφία που είχαμε στη διάθεση μας. Βεβαίως υπάρχουν μικρές διαφορές σε σχέση με τις ενδεικτικές τιμές από τους πίνακες της βιβλιογραφίας, διότι υπάρχουν διαφορές στη χημική σύσταση του χάλυβα, υπάρχουν ατέλειες στο υλικό και οι συνθήκες του πειράματος δεν είναι πάντοτε σταθερές.

α/α	Μέγιστο φορτίο	Μέγιστη τάση εφελκυσμού (Rm)	Μέτρο ελαστικότητας	Άνω όριο διαρροής	Κάτω όριο διαρροής	Μέγιστη παραμόρφωση	At	Agt	Rp0.2
	kN	Mpa	Gpa	Mpa	Mpa	mm	%	%	N/mm <sup>2</sup>
1	24,15	480	239,35	404	392	29,654	59,5	39	395
2	24,48	485	243,83	420	405	24,125	48,5	28,5	420
3	24,15	480	241,34	401	390	22,979	46	29,5	400
4	24,16	480	241,34	404	390	23,839	47,5	15	400
5	24,1	480	239,85	401	389	26,955	54	38,5	390
6	24,09	480	192,28	401	390	26,991	54	37,5	400
7	24,15	480	240,35	397	390	28,411	57	38	390
8	24,81	495	247,17	390	385	18,746	37,5	21	380

**Πινάκας 5.20:** Πειράματα με σταθερή ταχύτητα 2mm/min

Οι μέσες τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών του χάλυβα st37 σε εφελκυσμό είναι :

Μέγιστη τάση εφελκυσμού =480,71 Mpa

Μέτρο ελαστικότητας =234.04 Gpa

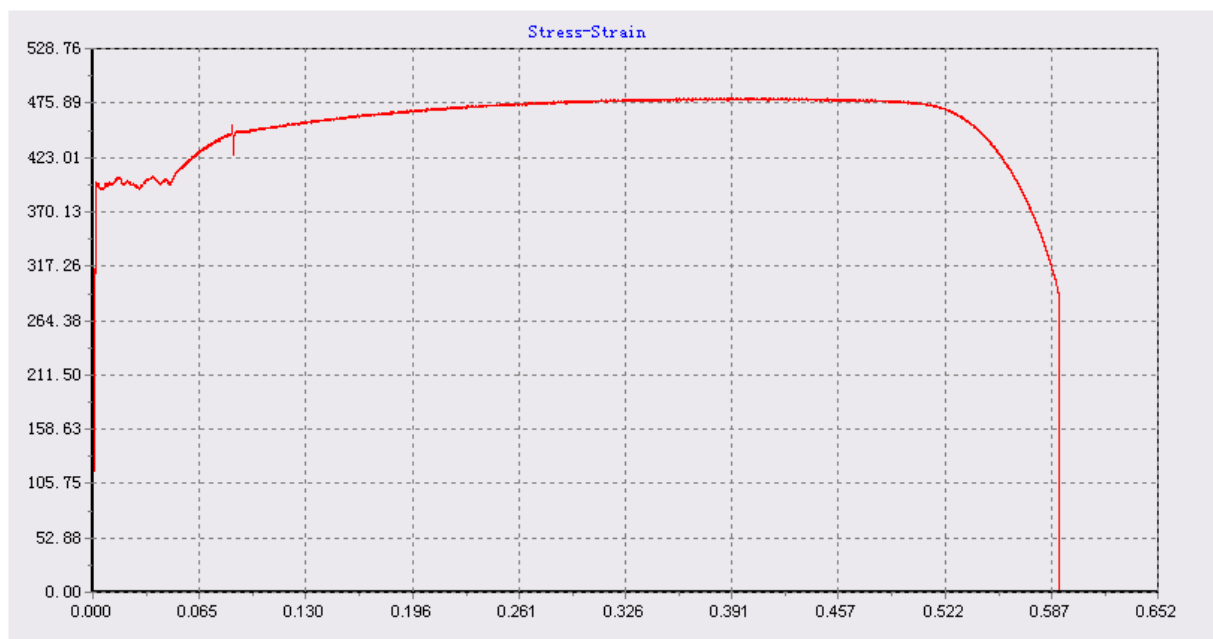
Άνω όριο διαρροής =404 Mpa

Κάτω όριο διαρροής=392 Mpa

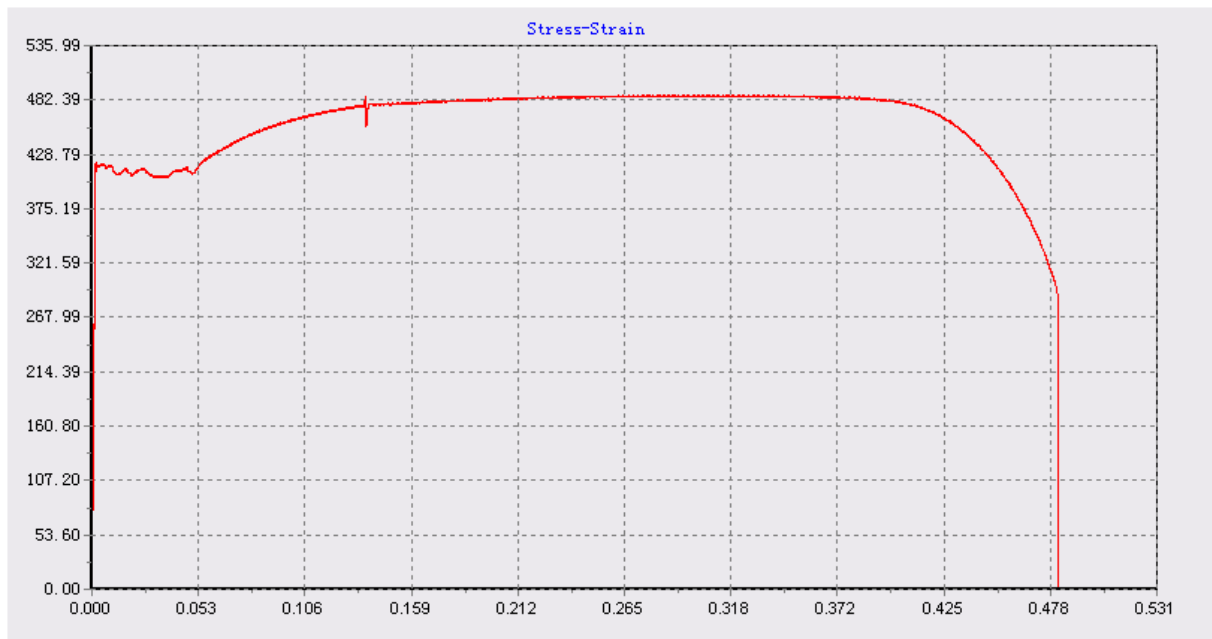
Στο παρακάτω πίνακα επιλεγούμε τη στήλη (NBK) η οποία αναφέρεται στο είδος κατεργασίας που έχει δεχτεί ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε χάλυβας της κατηγορίας (NBK) η οποία αφορά τύπο χάλυβα ο οποίος έχει δεχτεί ανόπτηση πάνω από το υψηλότερο σημείο μετασχηματισμού, σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα ή υπό κενό.

Steel grade		Condition on delivery								
		Cold-finished/soft (BK) 3)		Cold-finished/soft (BKM) 3)		Annealed (GBK) 3)		Normalized (NBK)		
Code number	Material number	Tensile strength	Elongation at reapture	Tensile strength	Elongation at reapture	Tensile strength	Elongation at reapture	Tensile strength	Upper yield point	Elongation at reapture
		$R_m$ N/mm <sup>2</sup> min	$A_5$ % min	$R_m$ N/mm <sup>2</sup> min	$A_5$ % min	$R_m$ N/mm <sup>2</sup> min	$A_5$ % min	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	$R_{eH}$ N/mm <sup>2</sup> min	$A_5$ % min
St 28	-									
USt 28	1.0357	400	8	320	12	260	32	270 to 380	180	32
RSt 28	1.0326									
St 34-2	-									
USt 34-2	1.0028	410	6	350	12	300	28	310 to 410	205	28
RSt 34-2	1.0034									
St37-2	1.0037									
USt37-2	1.0036	440	6	370	10	315	25	340 to 470	235	25
RSt 37-2	1.0038									
St 44-2	1.0044	520	5	450	8	390	21	410 to 540	255	21
St 52-3	1.0570	590	4	540	6	490	22	490 to 630	355	22

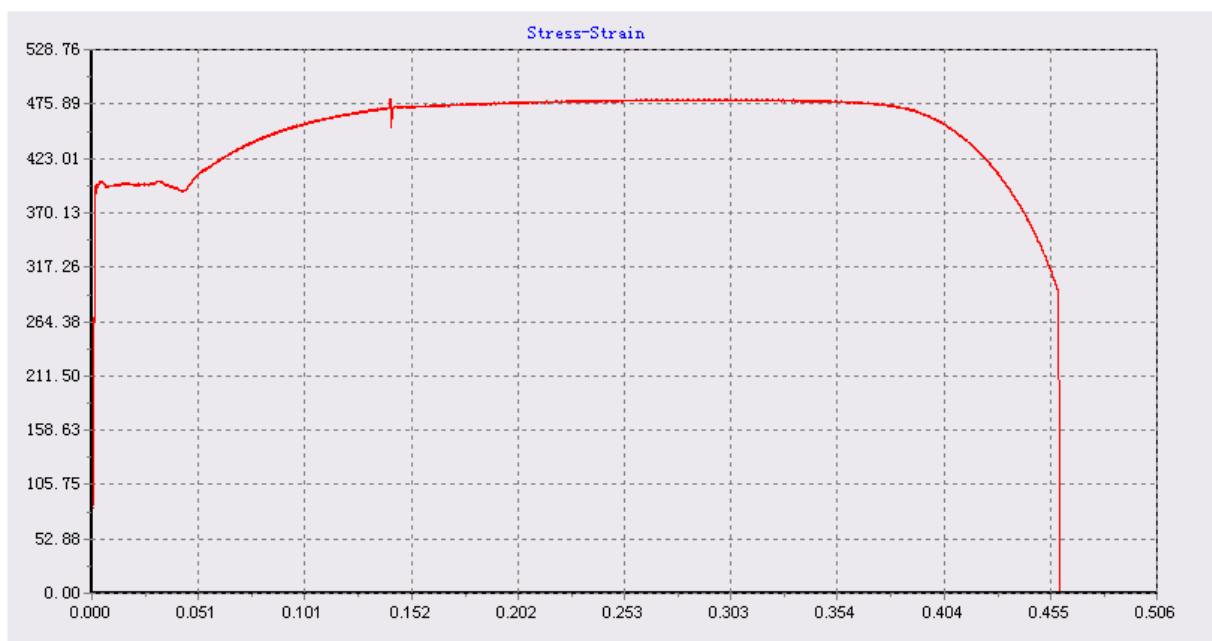
**Πίνακας 5.21:** Ενδεικτικές τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών για st37 κατά DIN



**Διάγραμμα 5.22:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 1

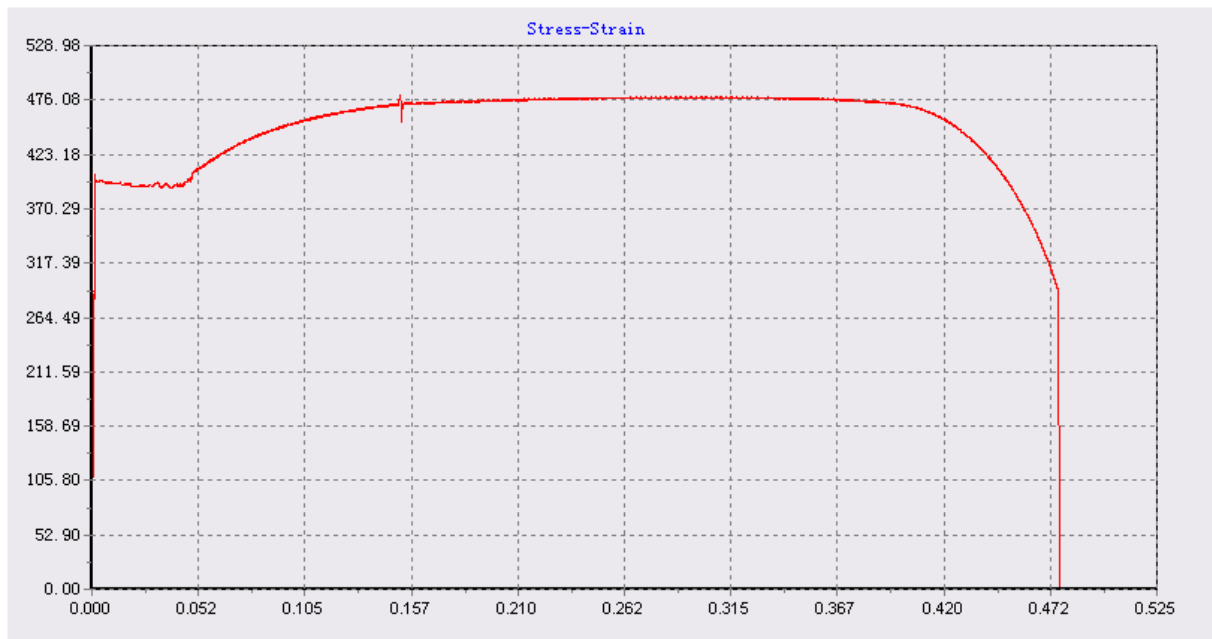


**Διάγραμμα 5.23:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 2

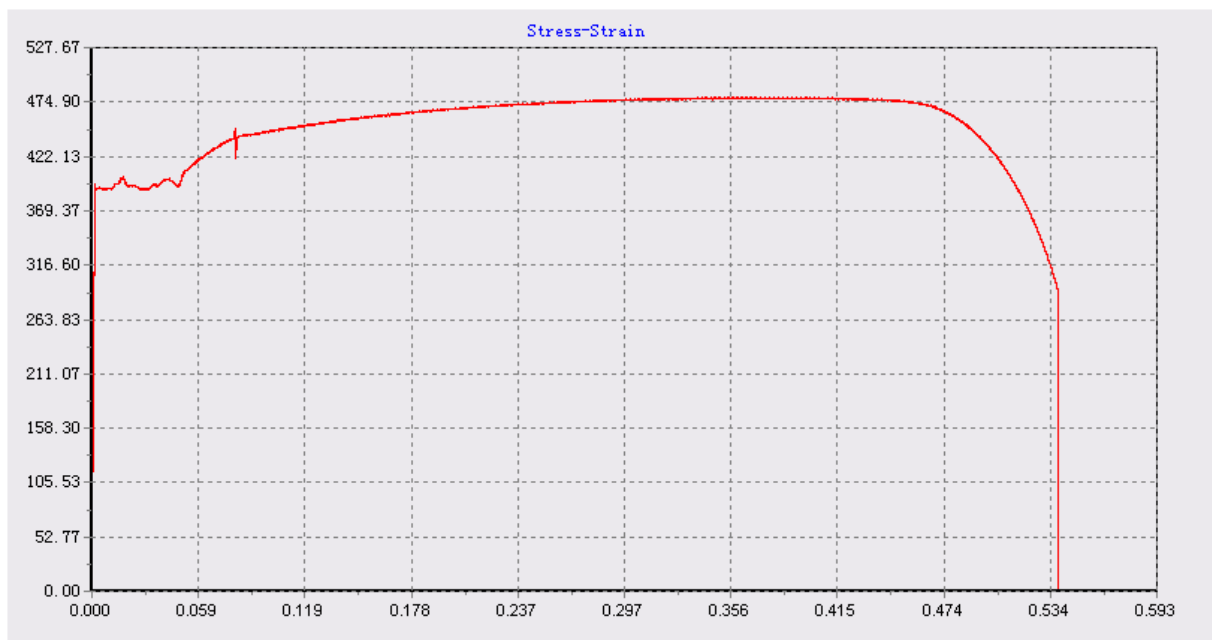


**Διάγραμμα 5.24:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 3

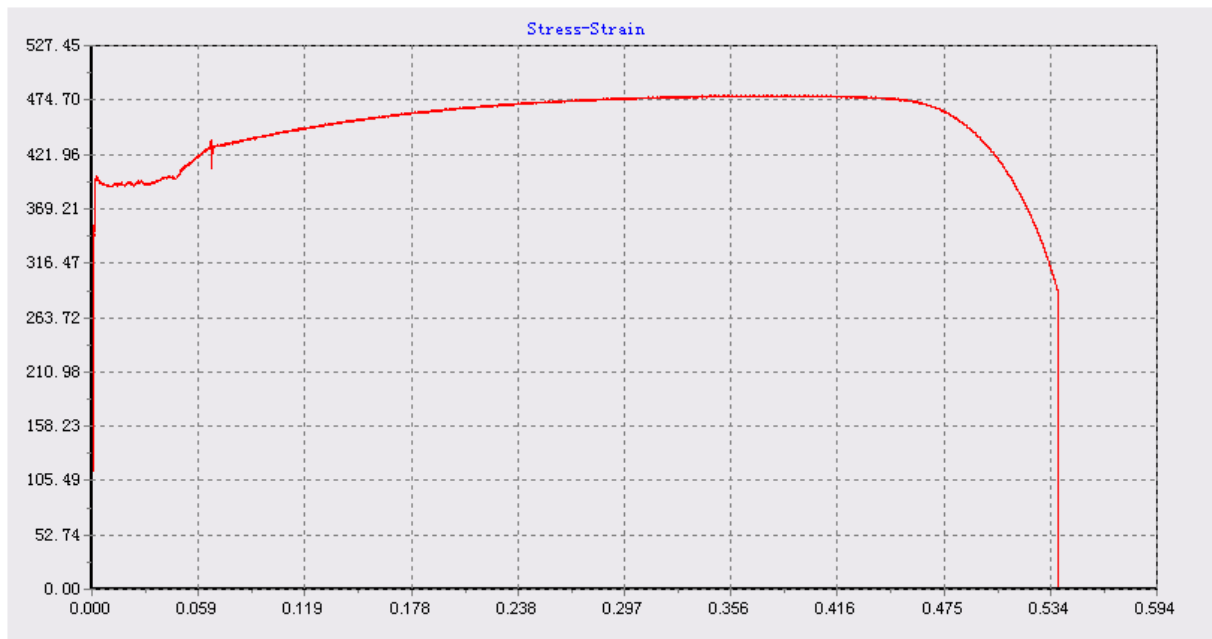




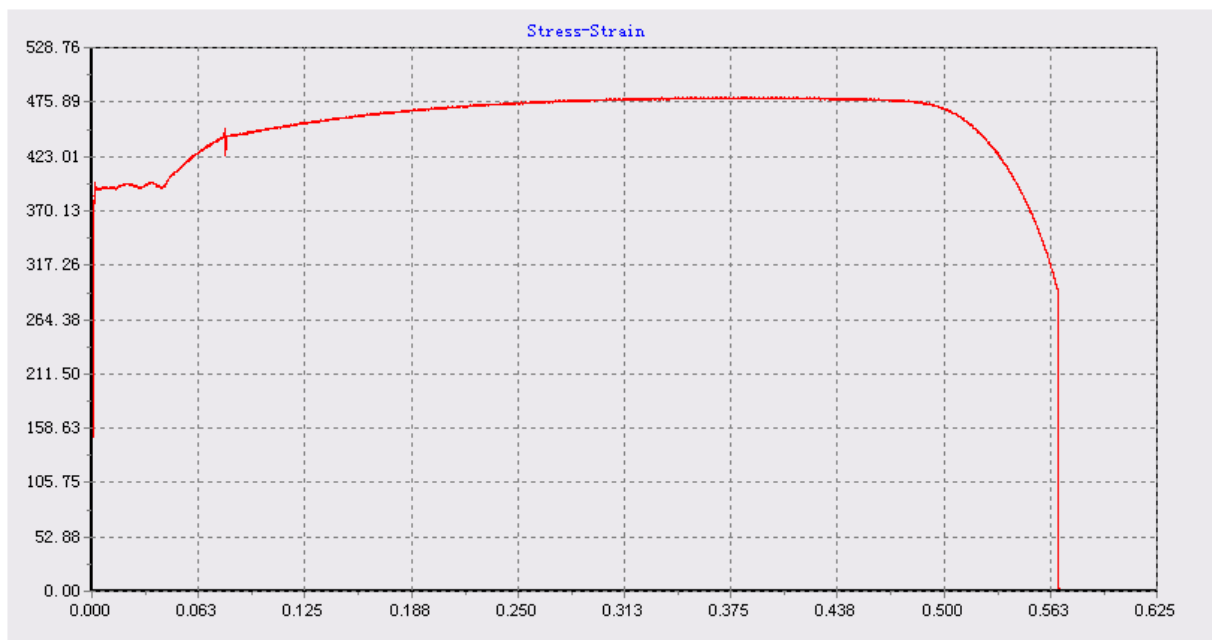
**Διάγραμμα 5.25:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 4



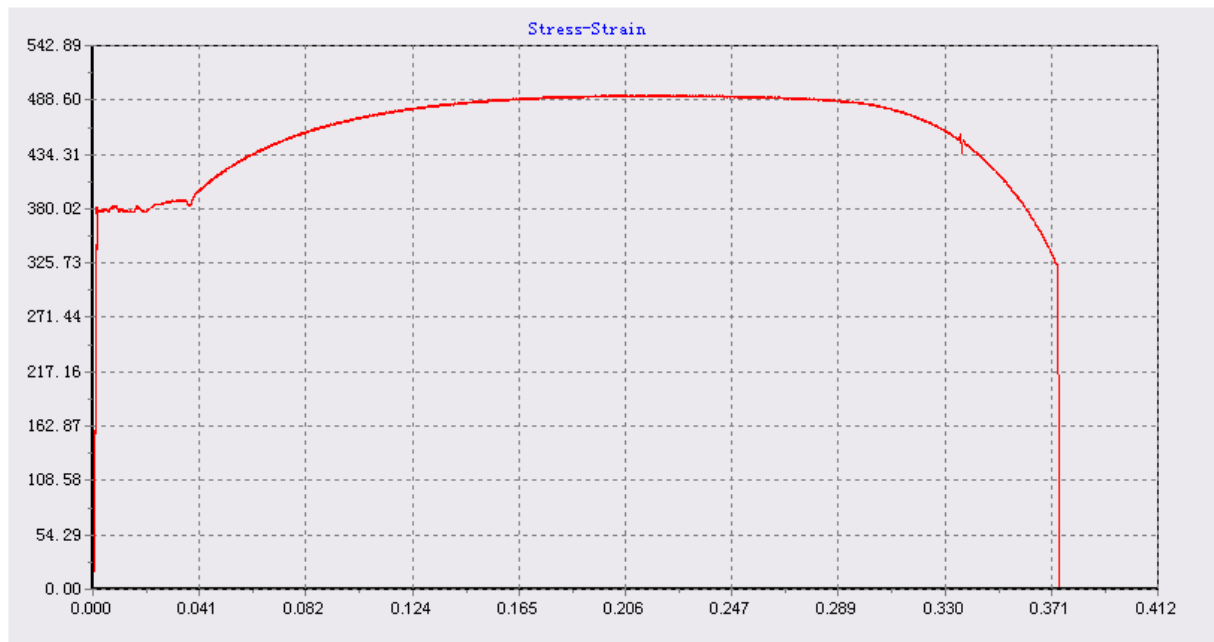
**Διάγραμμα 5.26:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 5



**Διάγραμμα 5.27:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 6



**Διάγραμμα 5.28:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 7

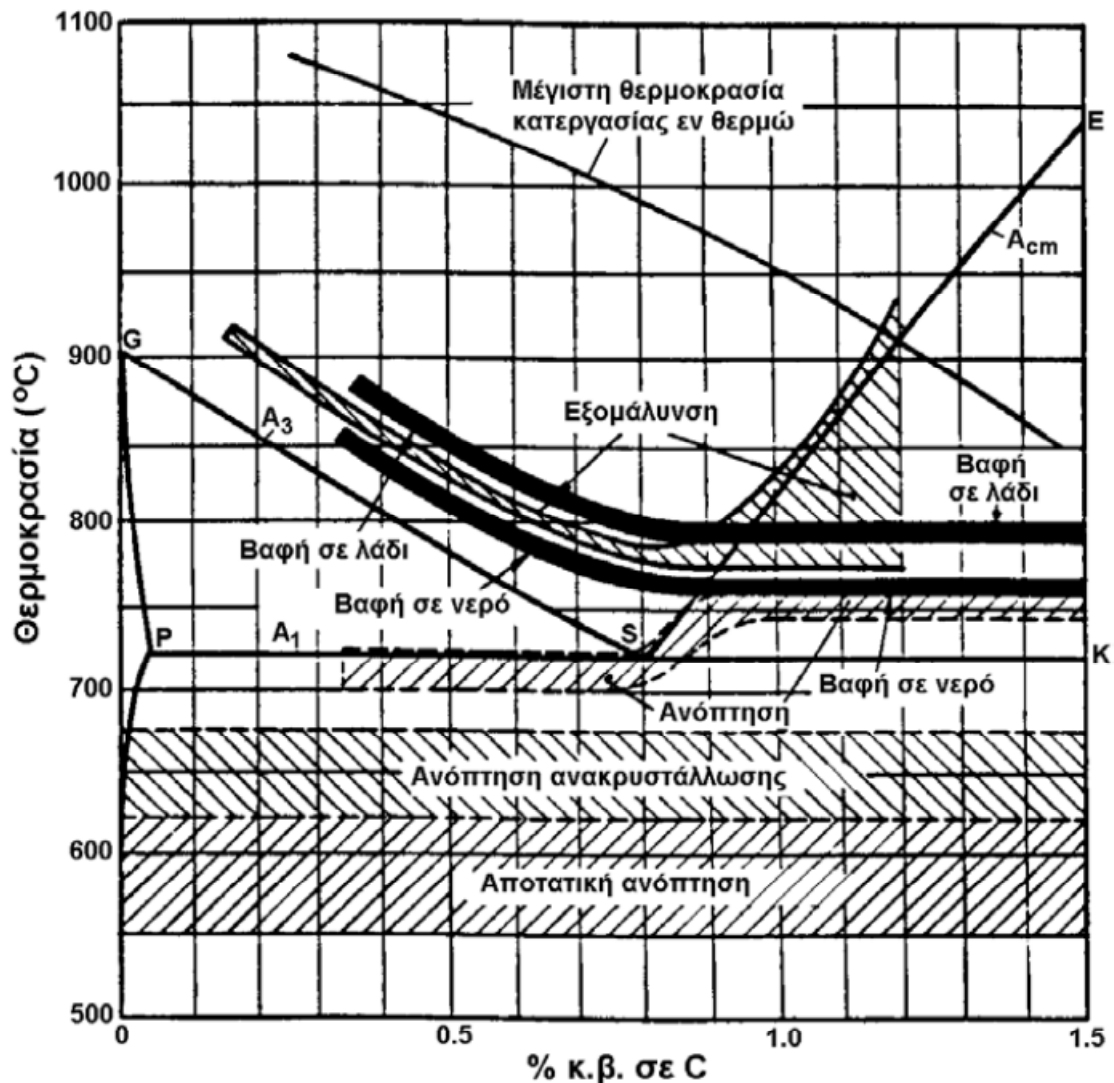


**Διάγραμμα 5.29:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 8

## 5.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΜΒΑΠΤΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΩΡΕΣ

### 5.4.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΒΑΦΗΣ

Ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας της βαφής και της ανόπτησης βρέθηκε με τη βοήθεια του παρακάτω διαγράμματος. Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται μια συνολική εικόνα των θερμικών κατεργασιών που επιδέχονται οι χάλυβες και οι περιοχές θερμοκρασιών στο διάγραμμα Fe-C που αντιστοιχούν στις κατεργασίες αυτές.



Διάγραμμα 5.30: Θερμικές κατεργασίες χάλυβων

Με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων του εφελκυσμού σε δοκίμια St37, διαπιστώσαμε μέσα από πίνακες ότι η περιεκτικότητα σε άνθρακα του χάλυβα που διαθέταμε είναι 0.1-0.15% κ.β. Επομένως από το παραπάνω

διάγραμμα βρήκαμε ότι η θερμοκρασία βαφής του συγκεκριμένου χάλυβα είναι περίπου  $880^{\circ}\text{C}$  και η θερμοκρασία ανόπτησης είναι περίπου  $550^{\circ}\text{C}$ .

#### 5.4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΑΦΗΣ

Οι βαφές των δοκιμίων πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Τεχνολογίας Μηχανολογικών Υλικών (Τ.Μ.Υ.) του τμήματος μηχανολογίας του Τ.Ε.Ι. Πατρών. Το εργαστήριο αυτό διαθέτει κατάλληλους φούρνους με τους οποίους μπορούσαμε να εκτελέσουμε τις βαφές στις επιθυμητές θερμοκρασίες. Επίσης χρησιμοποιήθηκε και κατάλληλη συσκευή για την εμβάπτιση των δοκιμίων στο νερό. Η διαδικασία της βαφής έγινε ως εξής: αρχικά τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στο φούρνο όταν αυτός είχε την κατάλληλη θερμοκρασία βαφής και μετά το πέρας της ώρας της βαφής τα δοκίμια τοποθετούνταν στη κατάλληλη συσκευή με το νερό. Τα δοκίμια της ανόπτησης τοποθετήθηκαν στο φούρνο όταν αυτός είχε την κατάλληλη θερμοκρασία και παρέμειναν εκεί μετά το πέρας της ώρας της ανόπτησης, έως ότου ο φούρνος να έλθει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Εικόνα 5.31: Θερμοκρασία βαφής



**Εικόνα 5.32:** Θερμοκρασία ανόπτησης



**Εικόνα 5.33:** Δοκίμια πριν τη βαφή



**Εικόνα 5.34:** Εξαγωγή των δοκιμών από το φούρνο



**Εικόνα 5.35:** Συσκευή εμβάπτισης των δοκιμών στο νερό

Σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε τη σειρά με την οποία διεξήχθησαν τα πειράματα της βαφής και της ανόπτησης:

- Βαφή για 30 λεπτά (4 δοκίμια)
- Βαφή για 1 ώρα (4 δοκίμια)
- Βαφή για 1.5 ώρα (4 δοκίμια)
- Βαφή για 2 ώρες (4 δοκίμια)
- Βαφή για 3 ώρες (4 δοκίμια)
- Βαφή για 4 ώρες (4 δοκίμια)
- Ανόπτηση για όλα τα παραπάνω δοκίμια, για 1 ώρα

Σε κάθε ομάδα πειραμάτων βαφής υπήρχαν 4 δοκίμια εκ των οποίων τα 3 δοκίμια τα δοκιμάσαμε απ'ευθείας σε εφελκυσμό και τα υπόλοιπα επεξεργαστήκαν με την θερμική κατεργασία της ανόπτησης.



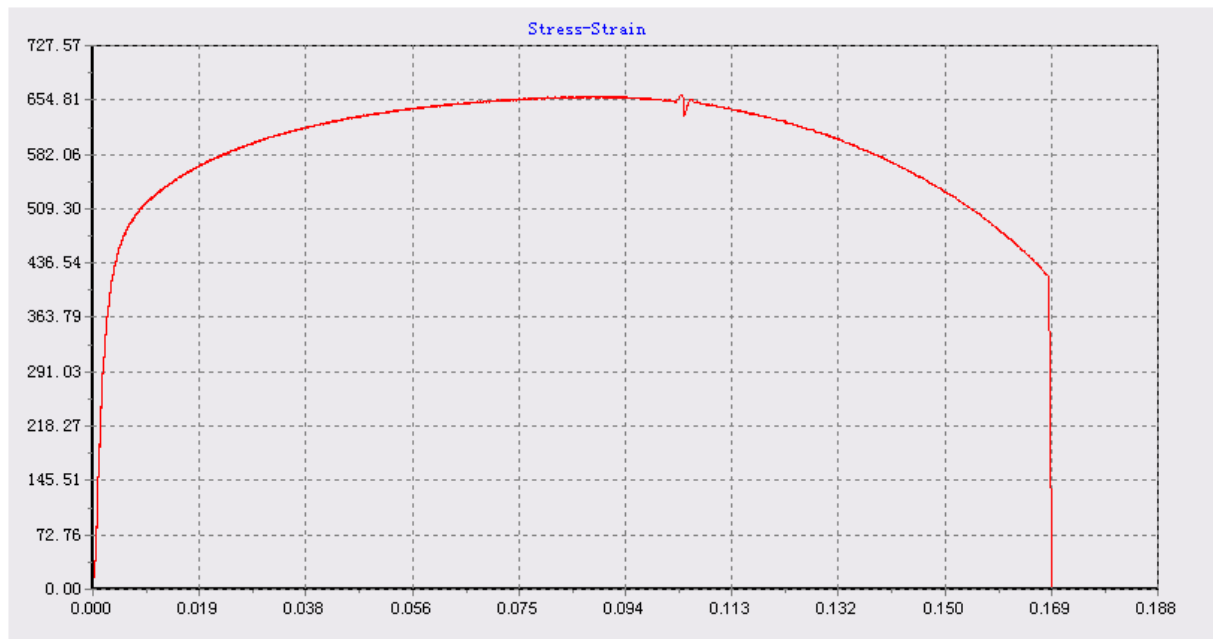
## 5.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΣΕ ΒΑΜΕΝΟ ΧΑΛΥΒΑ ST37

### 5.5.1 ΒΑΜΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΓΙΑ 30 ΛΕΠΤΑ

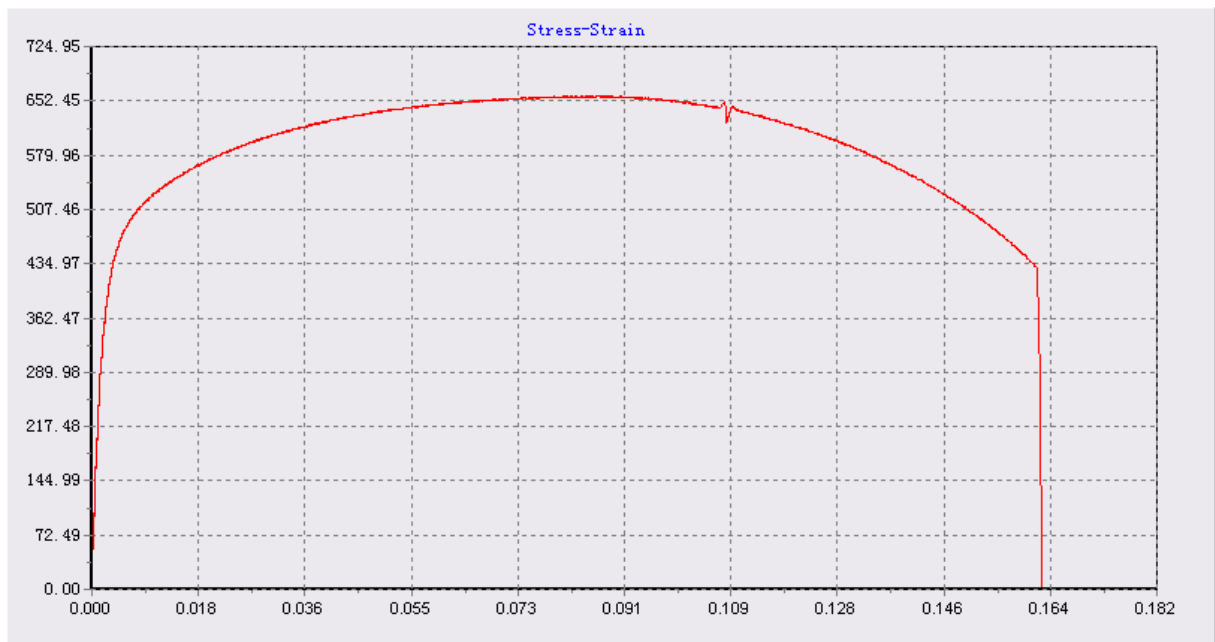
α/α	Μέγιστο φορτίο	Μέγιστη τάση εφελκυσμού (Rm)	Μέτρο ελαστικότητας	Άνω όριο διαρροής	Κάτω όριο διαρροής	Μέγιστη παραμόρφωση	At	Agt	Rp0.2
	kN	Mpa	Gpa	Mpa	Mpa	mm	%	%	N/mm2
1	33,25	660	264,57	390	390	8,547	17	10,5	475
2	33,13	660	260,59	390	390	8,279	16,5	8,5	485
3	34,51	685	255,71	390	390	6,622	13	8	515

**Πινάκας 5.36:** Αποτελέσματα εφελκυσμού σε βαμμένα δοκίμια για 30 λεπτά

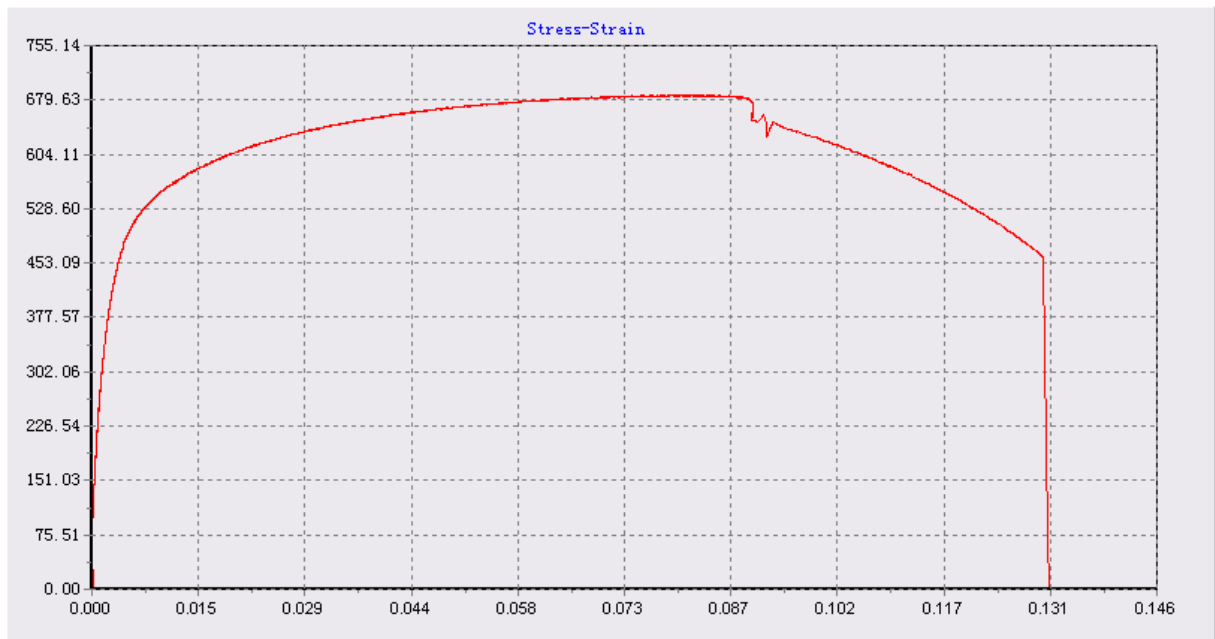
Παρακάτω φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις τάσης-παραμόρφωσης για τα πειράματα που έγιναν σε βαμμένα δοκίμια 30 λεπτών.



**Διάγραμμα 5.37:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 1



**Διάγραμμα 5.38:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 2



**Διάγραμμα 5.39:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 3

Οι μέσες τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών του βαμμένου χάλυβα st37 σε εφελκυσμό είναι :

Μέγιστη τάση εφελκυσμού =668Mpa

Μέτρο ελαστικότητας =260 Gra

Άνω όριο διαρροής =390 Mpa

Κάτω όριο διαρροής=390 Mpa

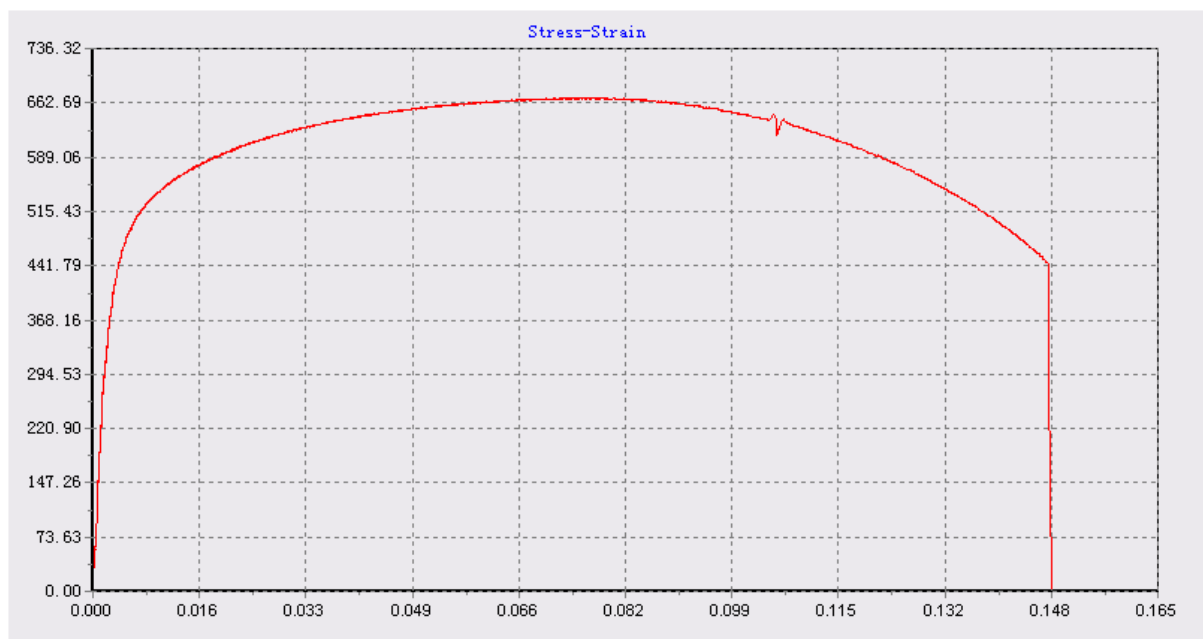
Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνουμε μια αύξηση της χαρακτηριστικής ιδιότητας του χάλυβα, μέγιστη τάση εφελκυσμού, της τάξης του **38,9%**. Επίσης το μέτρο ελαστικότητας βλέπουμε ότι παραμένει στην ίδια τάξη μεγέθους.

### 5.5.2 ΒΑΜΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΓΙΑ 1 ΩΡΑ

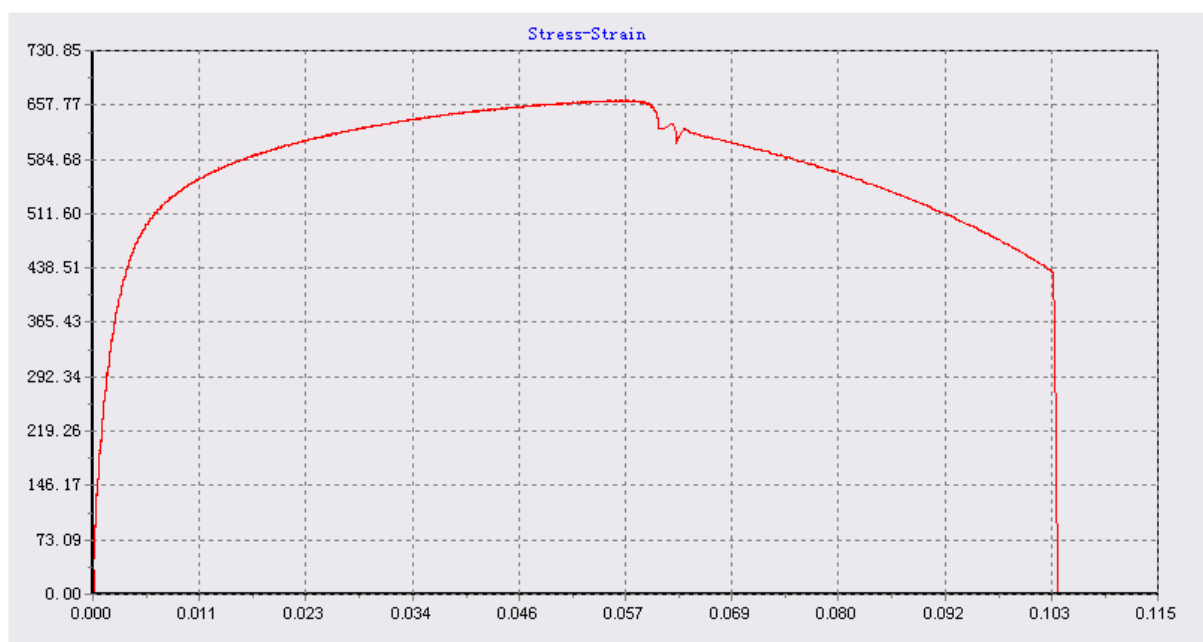
a/a	Μέγιστο φορτίο	Μέγιστη τάση εφελκυσμού (Rm)	Μέτρο ελαστικότητας	Άνω όριο διαρροής	Κάτω όριο διαρροής	Μέγιστη παραμόρφωση	At	Agt	Rp0.2
	kN	Mpa	Gpa	Mpa	Mpa	mm	%	%	N/mm2
1	33,65	670	266,56	410	410	7,486	15	7,5	495
2	33,4	665	251,33	400	400	5,223	10,5	5,5	505
3	32,49	645	260,59	400	400	4,334	8,5	3,5	510

**Πινάκας 5.40:** Αποτελέσματα εφελκυσμού σε βαμμένα δοκίμια για 1 ώρα

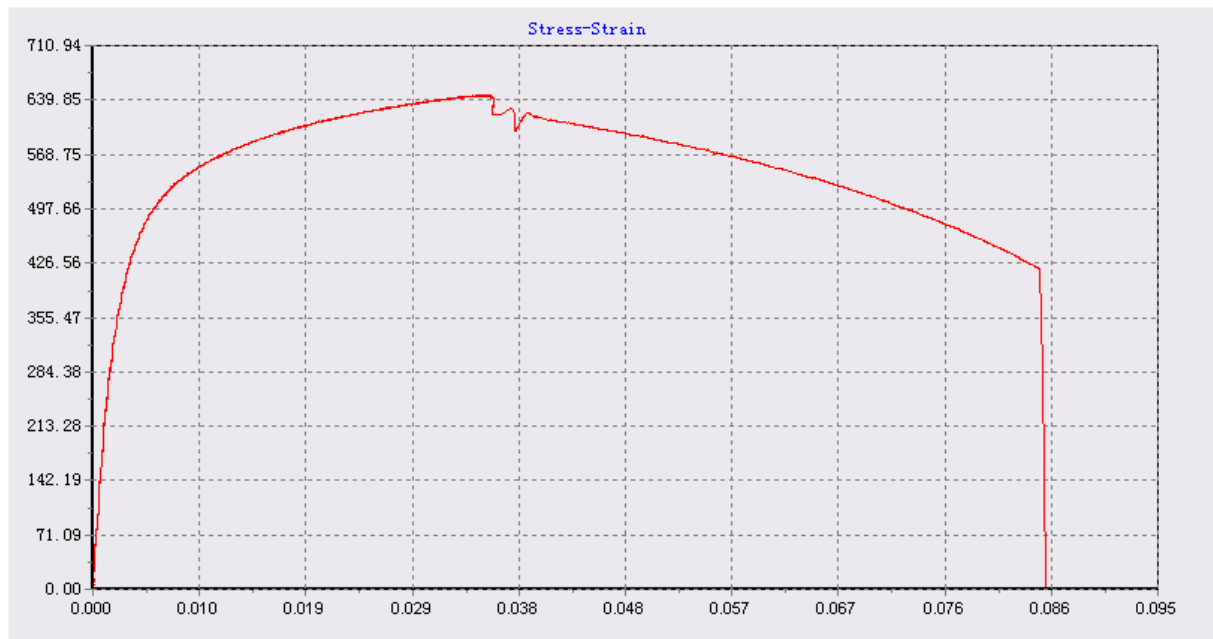
Παρακάτω φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις τάσης-παραμόρφωσης για τα πειράματα που έγιναν σε βαμμένα δοκίμια 1 ώρα



**Διάγραμμα 5.41:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 1



**Διάγραμμα 5.42:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 2



**Διάγραμμα 5.43:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 3

Οι μέσες τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών του βαμμένου χάλυβα st37 σε εφελκυσμό είναι :

Μέγιστη τάση εφελκυσμού =660Mpa

Μέτρο ελαστικότητας =259,49 Gra

Άνω όριο διαρροής =403 Mpa

Κάτω όριο διαρροης=403 Mpa

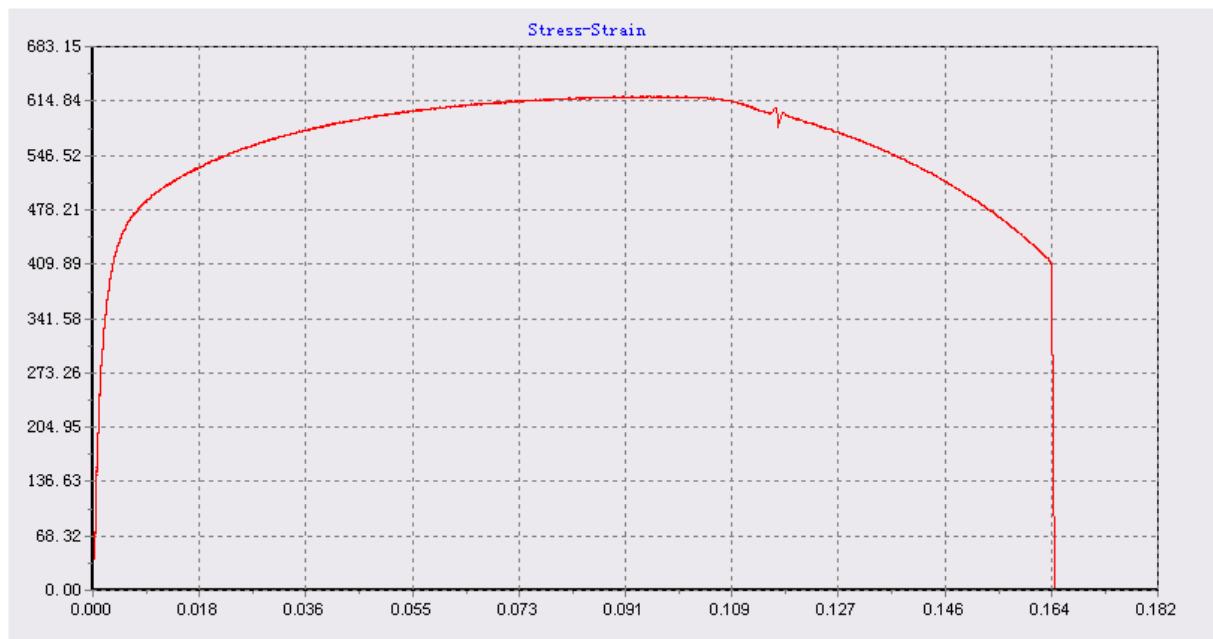
Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνουμε μια αύξηση της χαρακτηριστικής ιδιότητας του χάλυβα, μέγιστη τάση εφελκυσμού, της τάξης του **37,2%**. Επίσης το μέτρο ελαστικότητας βλέπουμε ότι παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις στην τιμή του.

### 5.5.3 ΒΑΜΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΓΙΑ 1,5 ΩΡΕΣ

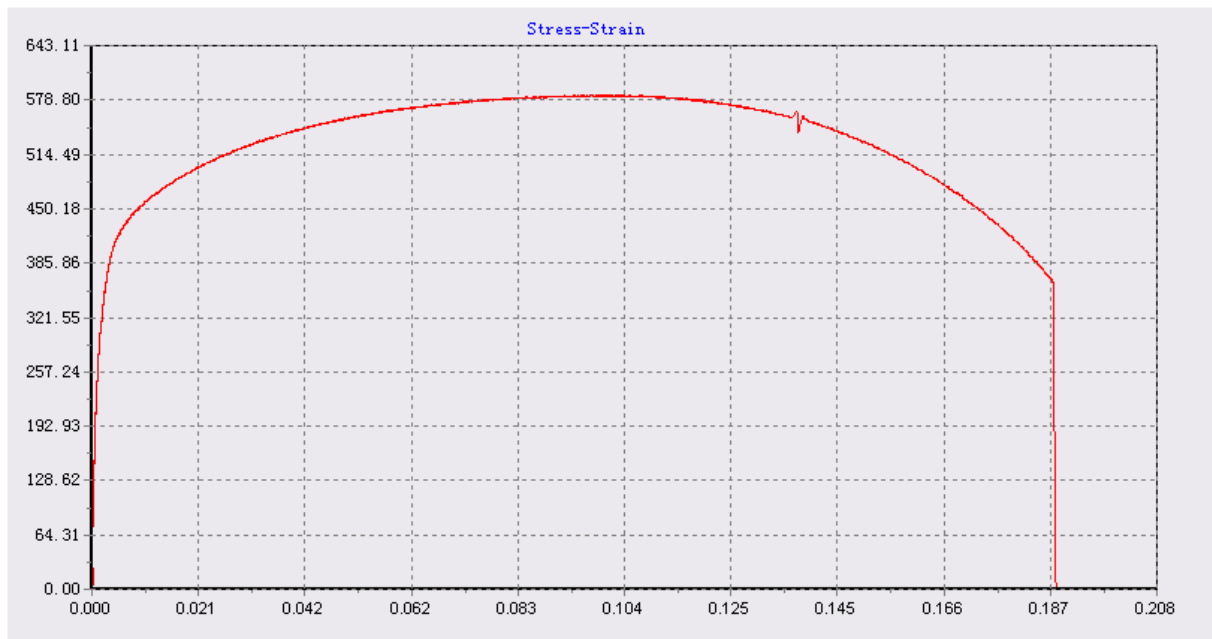
α/α	Μέγιστο φορτίο	Μέγιστη τάση εφελκυσμού (Rm)	Μέτρο ελαστικότητας	Άνω όριο διαρροής	Κάτω όριο διαρροής	Μέγιστη παραμόρφωση	At	Agt	Rp0.2
	kN	Mpa	Gpa	Mpa	Mpa	mm	%	%	N/mm2
1	31,22	620	210,36	405	405	8,274	16,5	9,5	450
2	29,39	585	233,74	390	390	9,434	19	9,5	420
3	32,29	640	225,78	390	390	8,141	16,5	8,5	470

**Πινάκας 5.44:** Αποτελέσματα εφελκυσμού σε βαμμένα δοκίμια για 1,5 ώρες

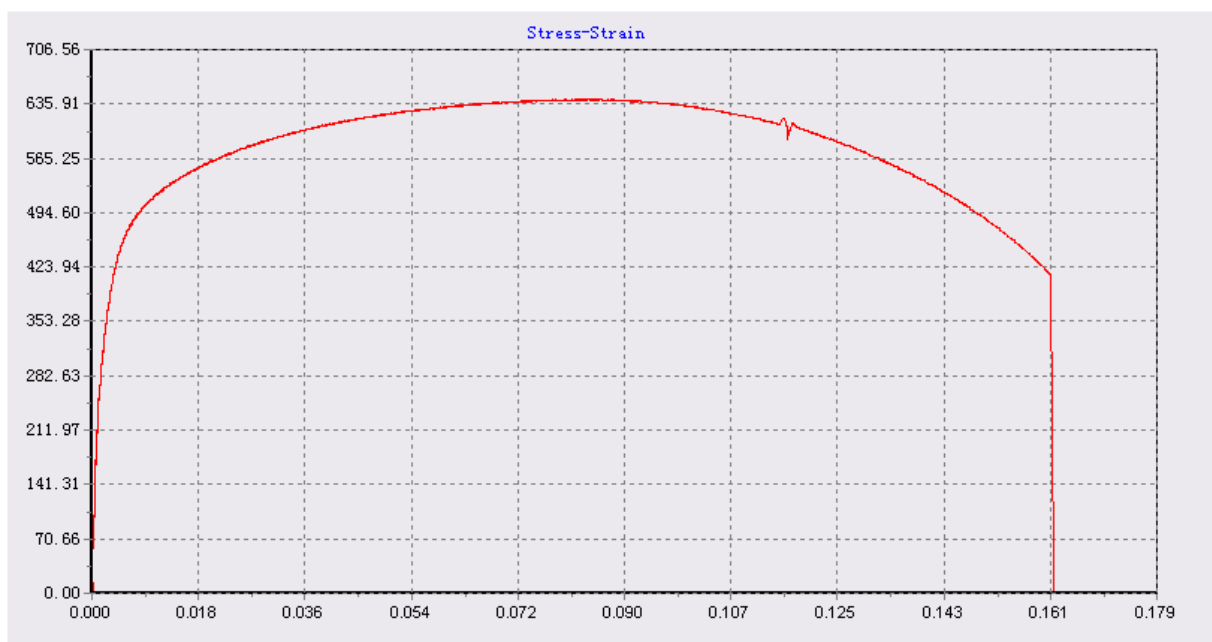
Παρακάτω φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις τάσης-παραμορφώσεις για τα πειράματα που έγιναν σε βαμμένα δοκίμια 1,5 ώρας.



**Διάγραμμα 5.45:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 1



**Διάγραμμα 5.46:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 2



**Διάγραμμα 5.47:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 3

Οι μέσες τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών του βαμμένου χάλυβα st37 σε εφελκυσμό είναι :

Μέγιστη τάση εφελκυσμού = 615 Mpa

Μέτρο ελαστικότητας = 223 Gpa

Τεχνητό όριο διαρροής = 445 Mpa

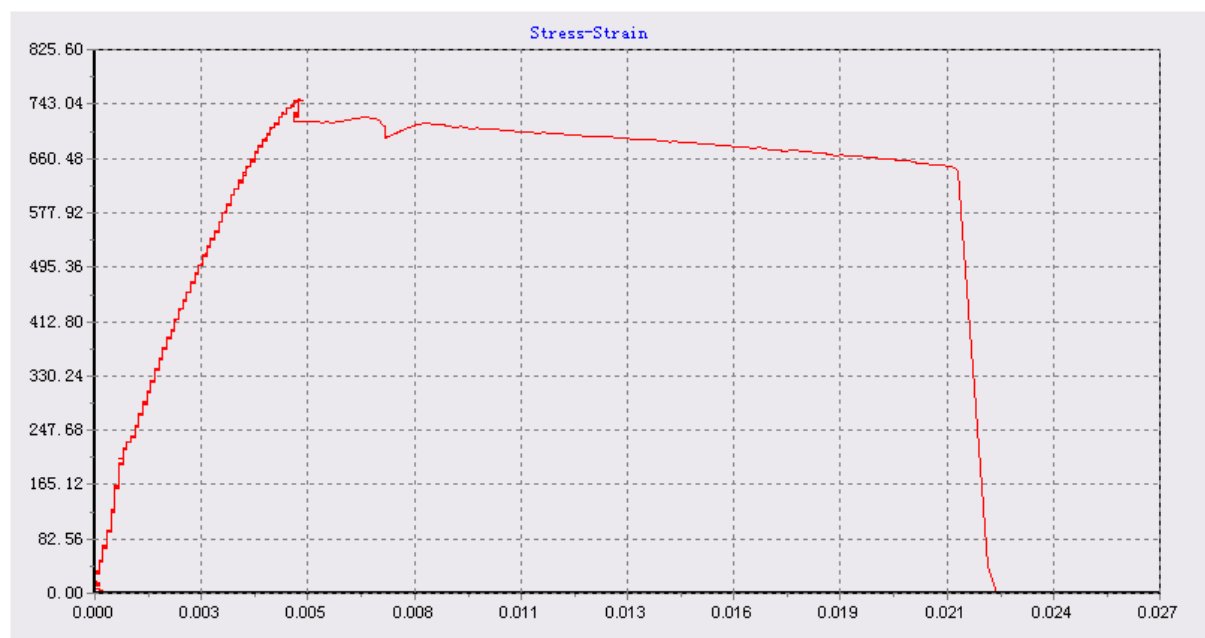
Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνουμε μια αύξηση της χαρακτηριστικής ιδιότητας του χάλυβα, μέγιστη τάση εφελκυσμού, της τάξης του **27,9%**. Επίσης το μέτρο ελαστικότητας παραμένει στην ίδια τάξη μεγέθους.

#### 5.5.4 ΒΑΜΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΓΙΑ 2:00 ΩΡΕΣ

α/α	Μέγιστο φορτίο	Μέγιστη τάση εφελκυσμού (Rm)	Μέτρο ελαστικότητας	Μέγιστη παραμόρφωση	At	Agt	Rp0.2
	kN	Mpa	Gpa	mm	%	%	N/mm <sup>2</sup>
1	37,73	750	249,98	1,211	2,5	0,5	690
2	28,69	570	282,74	10,283	20,5	12	350
3	31,13	620	205,89	2,425	5	2	455

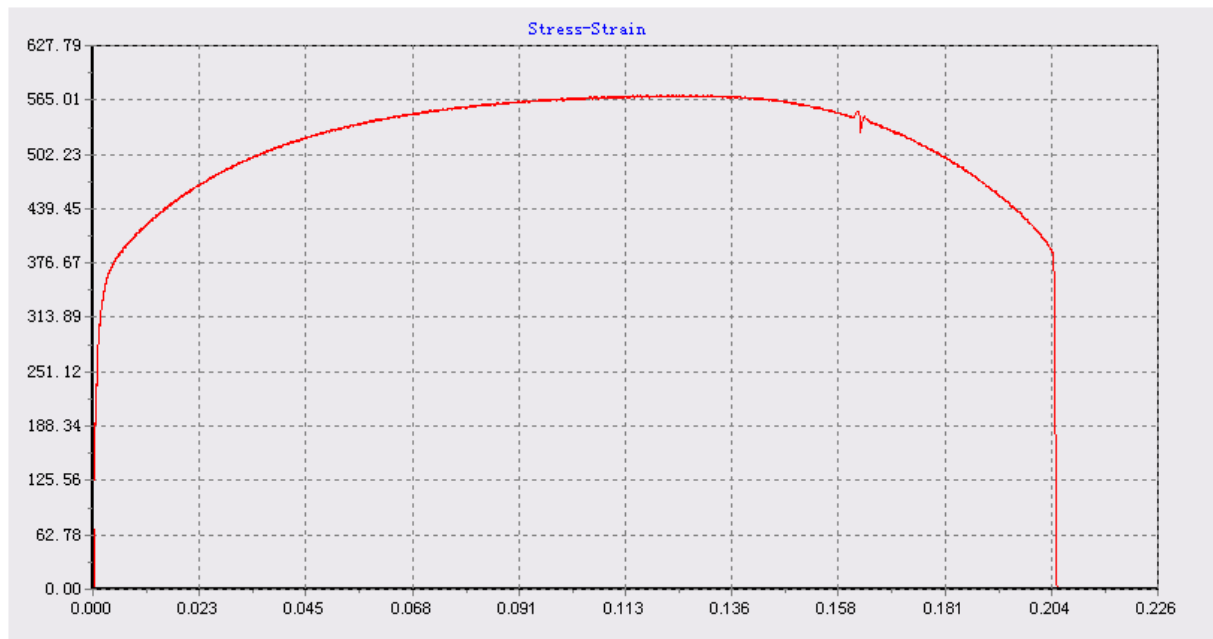
**Πινάκας 5.48:** Αποτελέσματα εφελκυσμού σε βαμμένα δοκίμια για 2:00 ώρες

Παρακάτω φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις τάσης-παραμόρφωσης για τα πειράματα που έγιναν σε βαμμένα δοκίμια 2:00 ωρών.

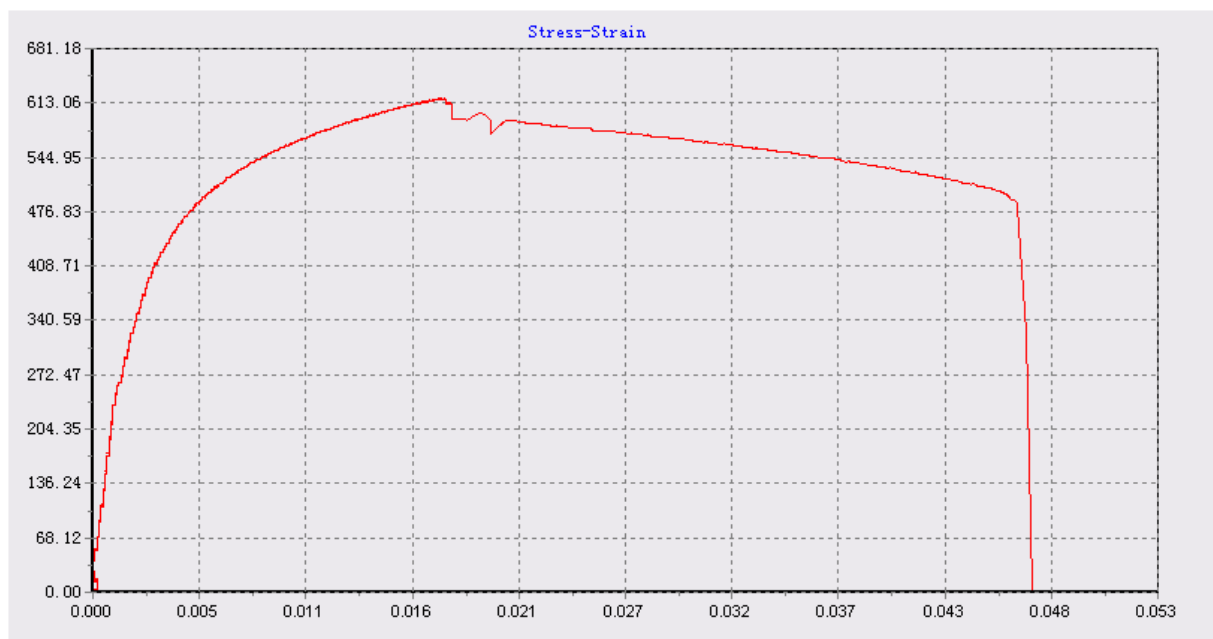


**Διάγραμμα 5.49:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 1





**Διάγραμμα 5.50:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 2



**Διάγραμμα 5.51:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 3

Οι μέσες τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών του βαμμένου χάλυβα st37 σε εφελκυσμό είναι :

Μέγιστη τάση εφελκυσμού =646Μρα

Μέτρο ελαστικότητας =246Gra

Τεχνητό όριο διαρροής =498 Μρα

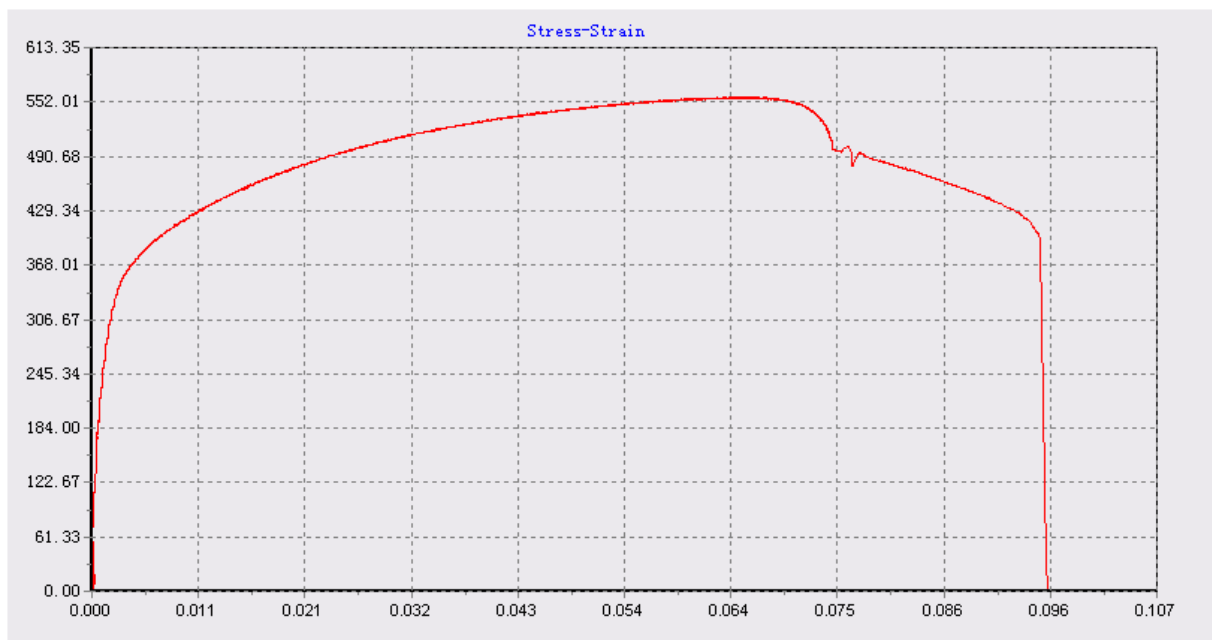
Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνουμε μια αύξηση της χαρακτηριστικής ιδιότητας του χάλυβα, μέγιστη τάση εφελκυσμού, της τάξης του **34,3%**. Επίσης το μέτρο ελαστικότητας βλέπουμε ότι παραμένει στην ίδια τάξη μεγέθους.

### 5.5.5 ΒΑΜΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΓΙΑ 3:00 ΩΡΕΣ

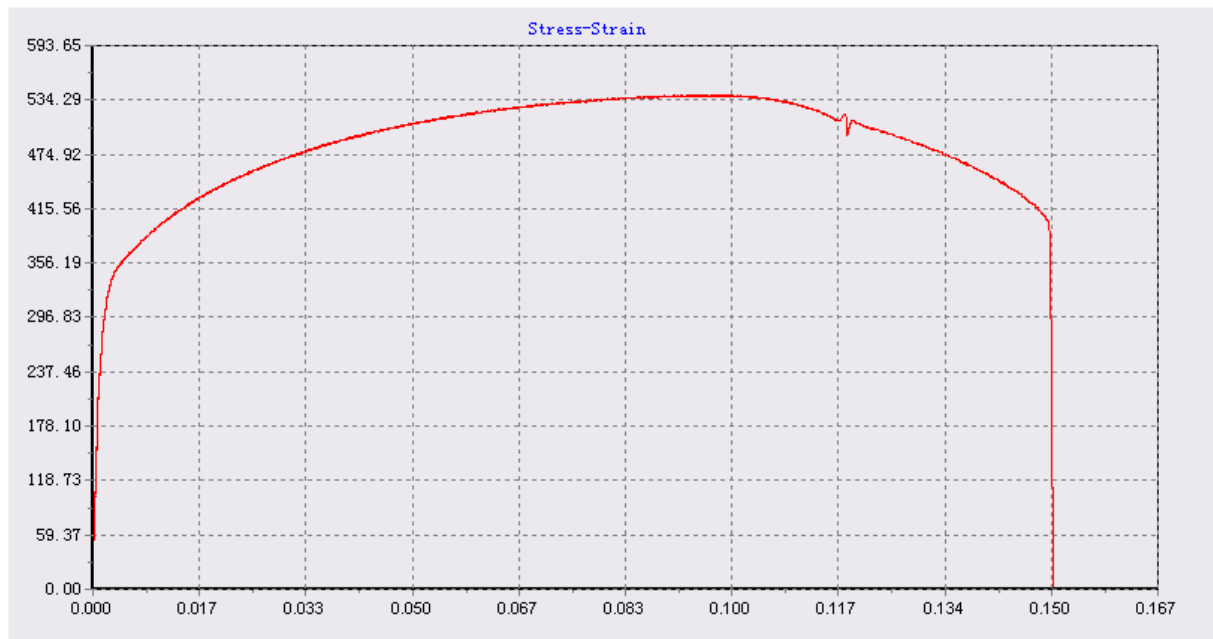
α/α	Μέγιστο φορτίο	Μέγιστη τάση εφελκυσμού (Rm)	Μέτρο ελαστικότητας	Μέγιστη παραμόρφωση	At	Agt	Rp0.2
	kN	Mpa	Gpa	mm	%	%	N/mm2
1	28,03	560	278	4,864	9,5	6,5	355
2	27,13	540	215,24	7,586	15	9	350
3	29,78	590	236,72	5,429	11	5,5	385

**Πινάκας 5.52:** Αποτελέσματα εφελκυσμού σε βαμμένα δοκίμια για 3:00 ώρες

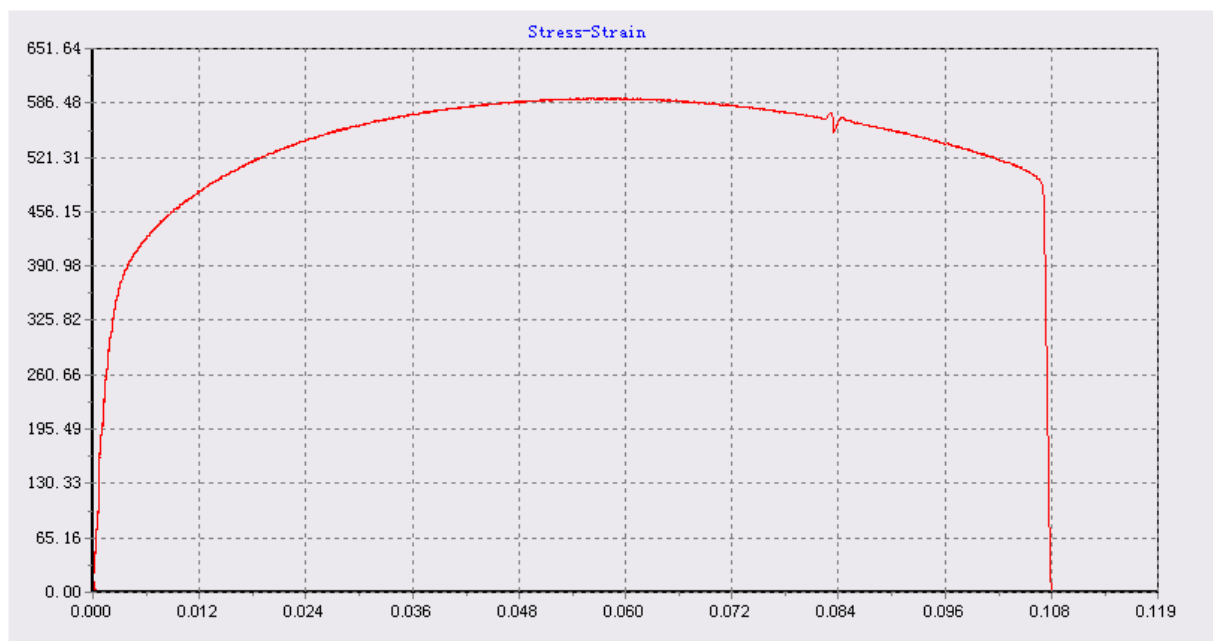
Παρακάτω απεικονίζετε οι γραφικές παραστάσεις τάσης-παραμόρφωσης για τα πειράματα που έγιναν σε βαμμένα δοκίμια 3:00 ωρών.



**Διάγραμμα 5.53:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 1



**Διάγραμμα 5.54:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 2



**Διάγραμμα 5.55:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 3

Οι μέσες τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών του βαμμένου χάλυβα st37 σε εφελκυσμό είναι :

Μέγιστη τάση εφελκυσμού = 563 Mpa

Μέτρο ελαστικότητας = 243 Gpa

Τεχνητό όριο διαρροής = 363 Mpa

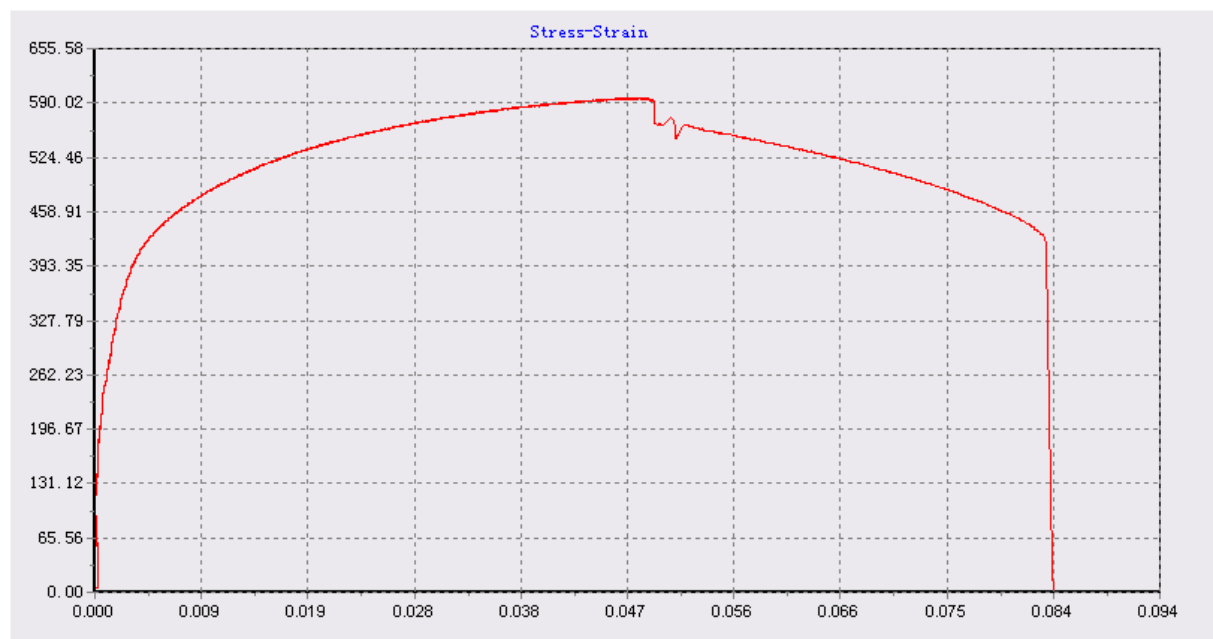
Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνουμε μια αύξηση της χαρακτηριστικής ιδιότητας του χάλυβα, μέγιστη τάση εφελκυσμού, της τάξης του **17,1%**. Επίσης το μέτρο ελαστικότητας βλέπουμε ότι παραμένει στην ίδια τάξη μεγέθους.

### 5.5.6 ΒΑΜΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΓΙΑ 4:00 ΩΡΕΣ

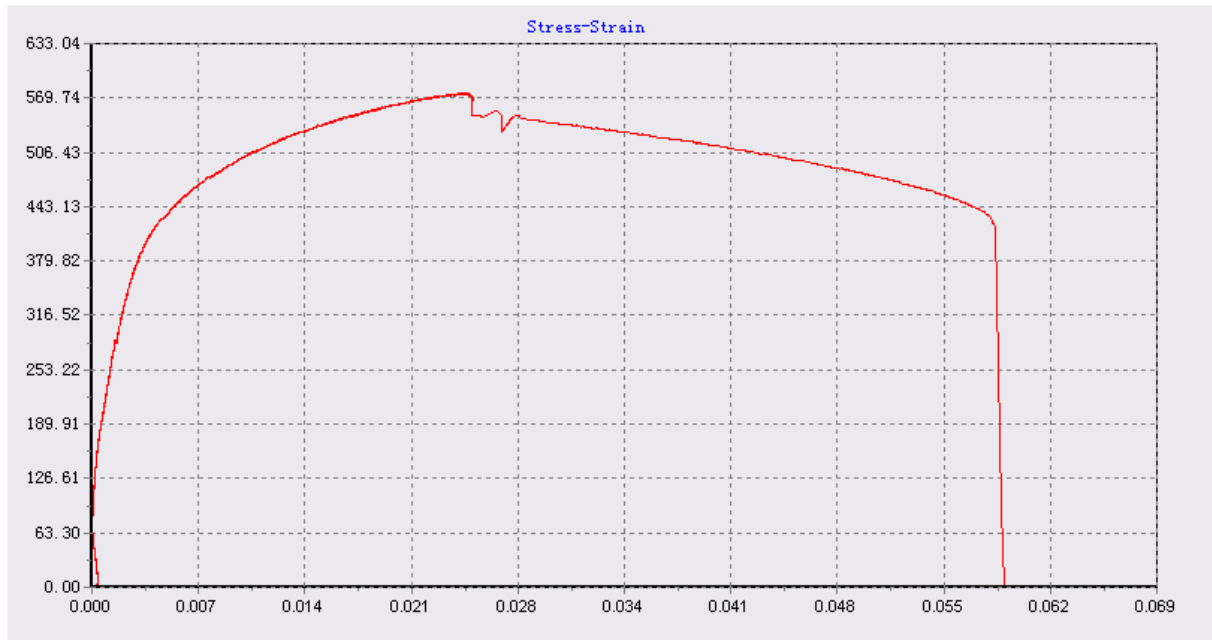
α/α	Μέγιστο φορτίο	Μέγιστη τάση εφελκυσμού (Rm)	Μέτρο ελαστικότητας	Μέγιστη παραμόρφωση	At	Agt	Rp0.2
	kN	Mpa	Gpa	mm	%	%	N/mm <sup>2</sup>
1	29,96	595	294,41	4,26	8,5	5	370
2	28,93	575	287,45	3,131	6,5	2,5	395
3	27,59	550	220,41	8,124	16,5	11,5	365

**Πινάκας 5.56:** Αποτελέσματα εφελκυσμού σε βαμμένα δοκίμια για 4:00 ώρες

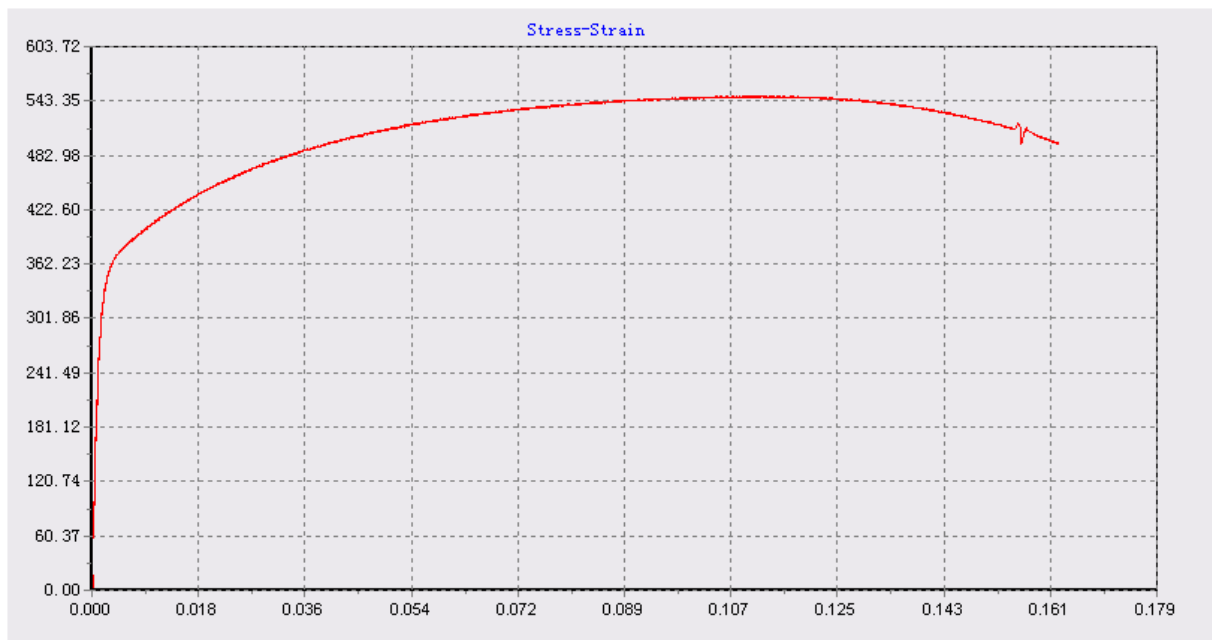
Παρακάτω απεικονίζετε οι γραφικές παραστάσεις τάσης-παραμορφώσεις για τα πειράματα που έγιναν σε βαμμένα δοκίμια 4:00 ωρών.



**Διάγραμμα 5.57:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 1



**Διάγραμμα 5.58:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 2



**Διάγραμμα 5.59:** Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για δοκίμιο 3

Οι μέσες τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών του βαμμένου χάλυβα st37 σε εφελκυσμό είναι :

Μέγιστη τάση εφελκυσμού =573Μρα

Μέτρο ελαστικότητας =267Gra

Τεχνητό όριο διαρροής =376 Μρα

Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνουμε μια αύξηση της χαρακτηριστικής ιδιότητας του χάλυβα, μέγιστη τάση εφελκυσμού, της τάξης του **19,1%**. Επίσης το μέτρο ελαστικότητας βλέπουμε ότι παραμένει στην ίδια τάξη μεγέθους.

### 5.5.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρακάτω βλέπουμε ένα διάγραμμα στο οποίο βρίσκονται οι μέσες τιμές της μέγιστης τάσης εφελκυσμού των βαμμένων δοκιμίων, σε συνάρτηση με τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας τους.



**Διάγραμμα 5.60:** Μέγιστη τάση εφελκυσμού- ώρα βαφής

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι υπάρχει σημαντική αύξηση της αντοχής του χάλυβα με βαφή, σε σχέση με τον απλό χάλυβα που δεν έχει υποστεί καμία θερμική κατεργασία, αποτέλεσμα που συμφωνεί με τη βιβλιογραφία. Μια δεύτερη παρατήρηση αφορά την παράμετρο του χρόνου έκθεσης σε υψηλή θερμοκρασία (βαφή). Παρατηρούμε ότι από τα 30 λεπτά έως τις 2 ώρες έχουμε πρώτον σταθερά αποτελέσματα(615-665 MPa) και δεύτερον τα μέγιστα. Τέλος παρατηρούμε ότι μετά το πέρας των δυο ωρών έχουμε

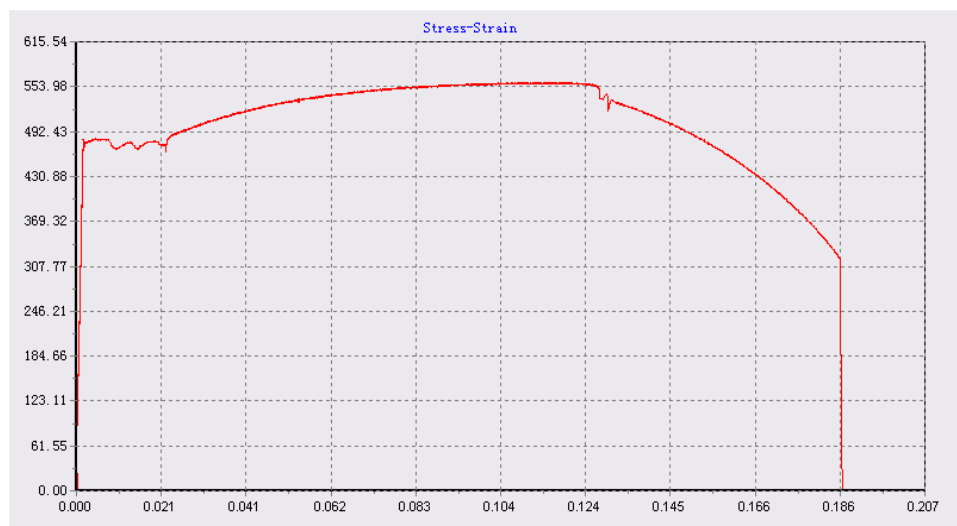
σημαντική πτώση των αποτελεσμάτων(573-563MPa). Άρα συμπεράνουμε ότι για τον συγκεκριμένο όγκο κάθε δοκιμίου η αποδοτικότερη ώρα βαφής είναι μεταξύ μισής με μιας ώρας.

## 5.6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΣΕ ΧΑΛΥΒΑ ΠΟΥ ΕΧΕΙ ΥΠΟΒΛΗΘΕΙ ΣΕ ΑΝΟΠΤΗΣΗ

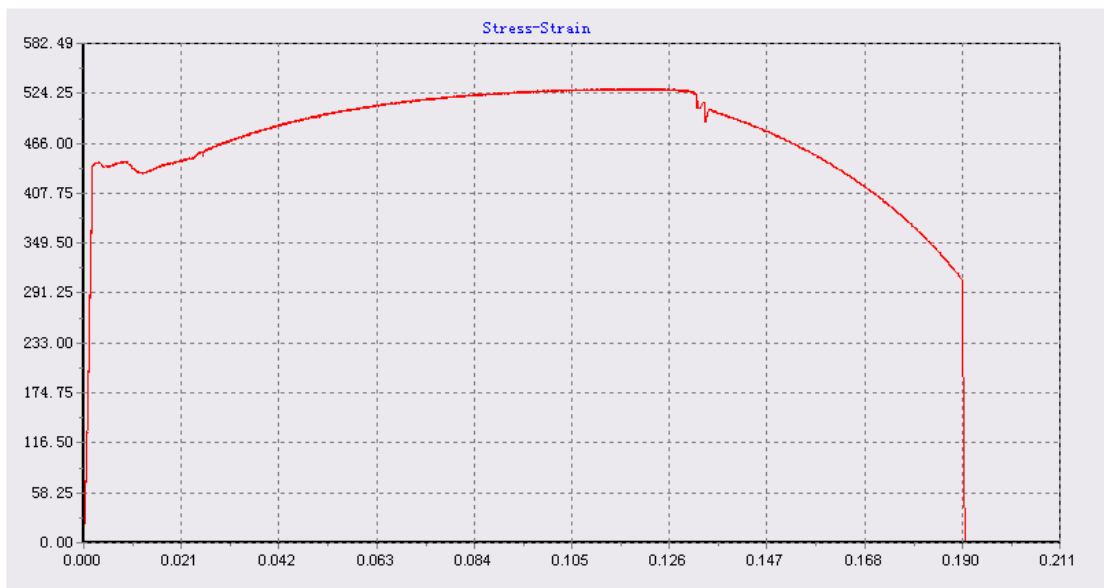
α/α	Μέγιστο φορτίο	Μέγιστη τάση εφελκυσμού (Rm)	Μέτρο ελαστικότητας	Άνω όριο διαρροής	Κάτω όριο διαρροής	Μέγιστη παραμόρφωση	At	Agt	ΩΡΕΣ ΒΑΦΗΣ
	kN	Mpa	Gpa	Mpa	Mpa	mm	%	%	
1	28,13	560	220,81	482,17	469	9,414	19	11	30 λεπτά
2	26,62	530	214,84	444,2	430,85	9,572	19	11,5	1 ώρα
3	25,81	515	204,89	426	411	10,359	20,5	11,5	1,5 ώρα
4	24,38	495	242,69	380,1	361	9,498	19	10,5	2 ώρες
5	24,78	485	246,67	382	363	5,961	12	5,5	3 ώρες
6	23,81	475	238,71	356,5	351	9,381	19	10	4 ώρες

**Πινάκας 5.61:** Αποτελέσματα εφελκυσμού σε χάλυβα με ανόπτηση για 1 ώρα

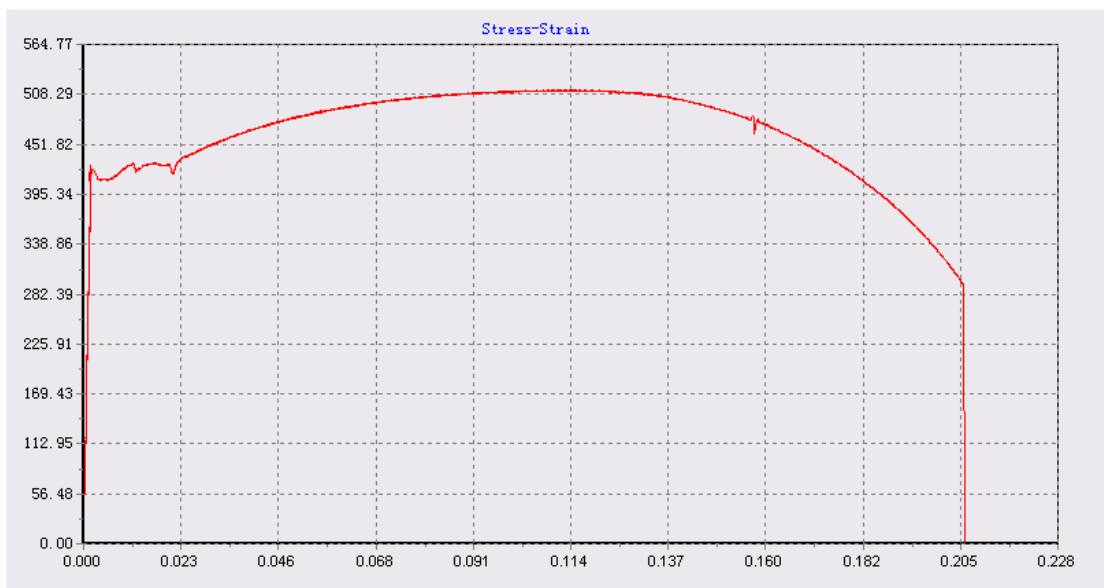
Παρακάτω φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις τάσης-παραμορφώσεις για τα πειράματα που έγιναν σε δοκίμια χάλυβα με ανόπτηση για 1:00 ώρα.



**Διάγραμμα 5.62:** Τάση-παραμόρφωση σε χάλυβα με βαφή 30 λεπτών και ανόπτηση μίας ώρας

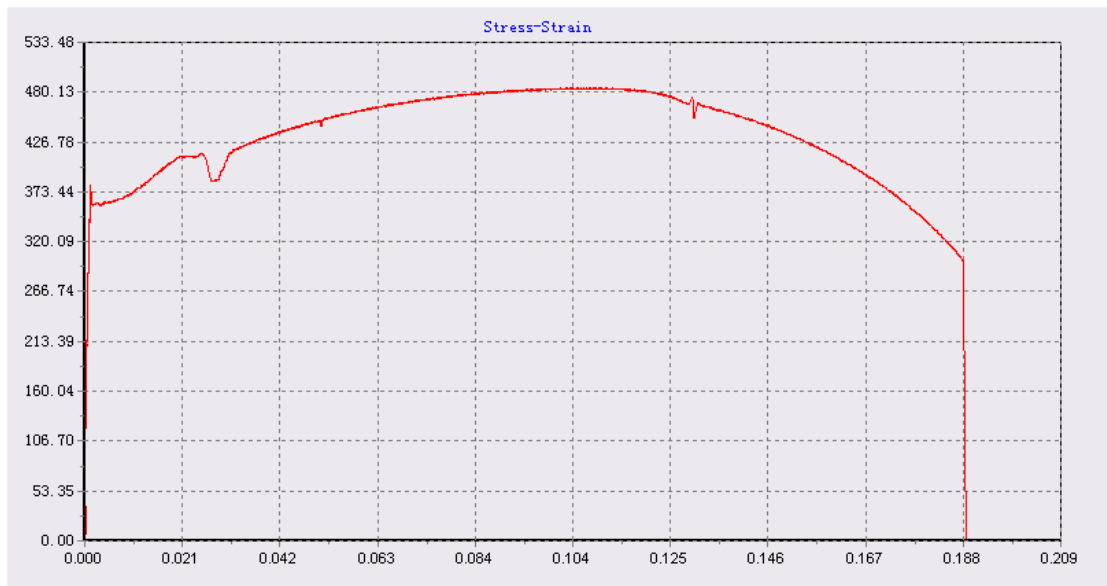


**Διάγραμμα 5.63:** Τάση-παραμόρφωση σε χάλυβα με βαφή μίας ώρας και ανόπτηση μίας ώρας

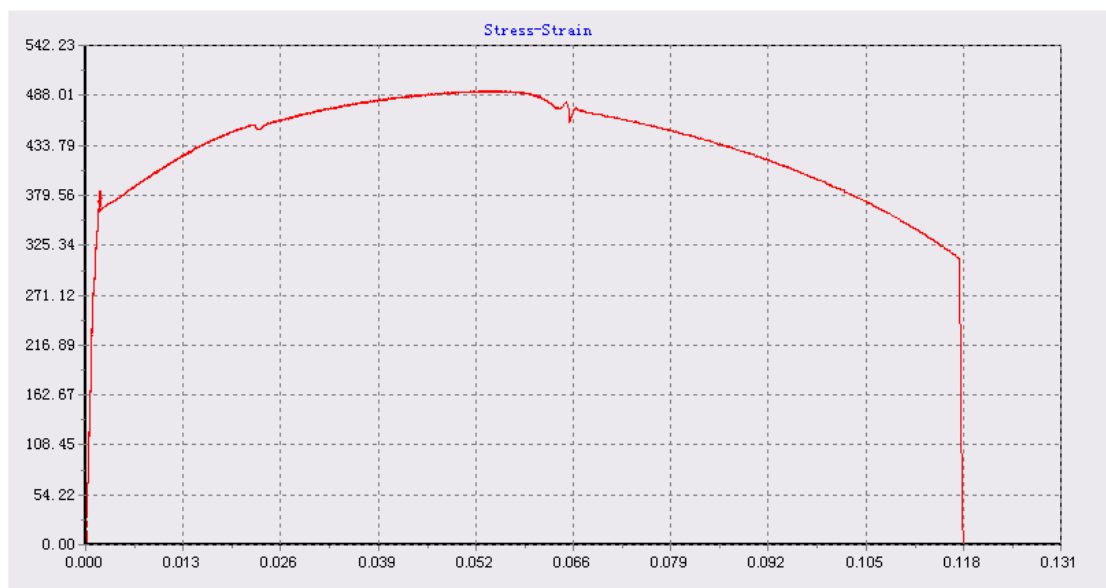


**Διάγραμμα 5.64:** Τάση-παραμόρφωση σε χάλυβα με βαφή 1,5 ώρας και ανόπτηση μίας ώρας

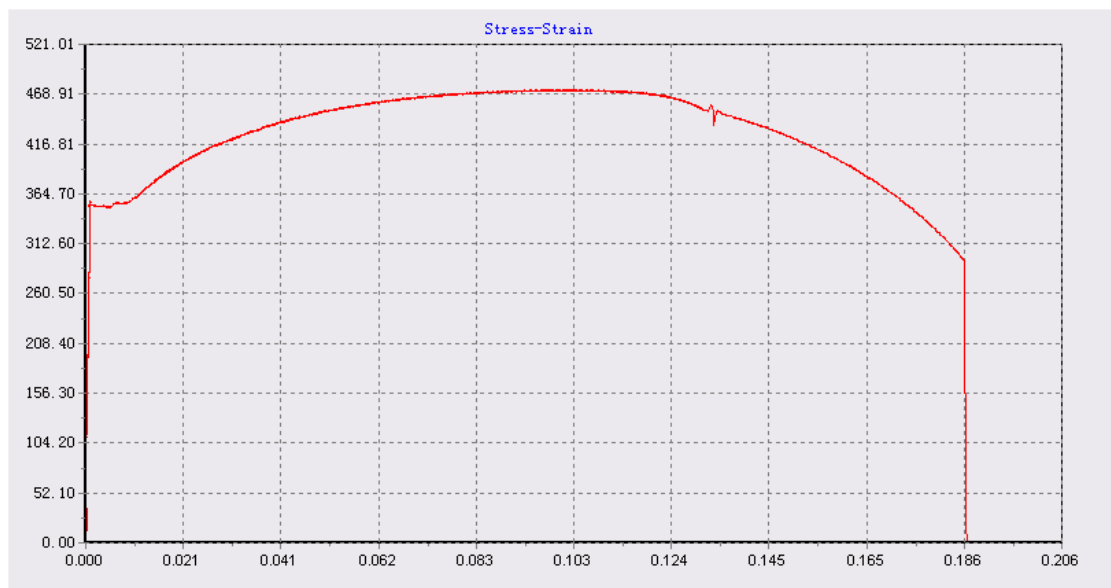




**Διάγραμμα 5.65:** Τάση-παραμόρφωση σε χάλυβα με βαφή 2 ωρών και ανόπτηση μίας ώρας



**Διάγραμμα 5.66:** Τάση-παραμόρφωση σε χάλυβα με βαφή 3 ωρών και ανόπτηση μίας ώρας



**Διάγραμμα 5.67:** Τάση-παραμόρφωση σε χάλυβα με βαφή 4 ωρών και ανόπτηση μίας ώρας

Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνουμε μια μείωση της χαρακτηριστικής ιδιότητας του χάλυβα, μέγιστη τάση εφελκυσμού, της τάξης του **21,75%** σε σχέση με το βαμμένο χάλυβα. Επίσης το μέτρο ελαστικότητας βλέπουμε ότι παραμένει στην ίδια τάξη μεγέθους.

### 5.6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρακάτω βλέπουμε ένα διάγραμμα στο οποίο βρίσκονται οι τιμές της μέγιστης τάσης εφελκυσμού των δοκιμίων, που έχουν υποστεί ανόπτηση σε συνάρτηση με τον χρόνο βαφής τους.



**Διάγραμμα 5.68:** Μέγιστη τάση εφελκυσμού-ανόπτηση

Στο παραπάνω διάγραμμα πρέπει να διευκρινίσουμε ότι η ώρα της ανόπτησης (60 λεπτά) είναι η ίδια για όλα τα δοκίμια. Η αναγραφή της ώρας στον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος γίνεται για να διευκρινιστεί η διάρκεια βαφής που είχε υποστεί το κάθε δοκίμιο πριν τη διαδικασία της ανόπτησης. Στο διάγραμμα παρατηρούμε ότι υπάρχει μια γραμμική πτώση της τιμής της μέγιστης τάσης εφελκυσμού. Παρατηρείται δε, μια ποσοστιαία πτώση της μέγιστης τάσης εφελκυσμού, σε σχέση με το χρόνο βαφής στα δοκίμια των πειραμάτων. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό ειδικών διατάξεων που απαιτούν ακρίβεια στην τάση θραύσεως.

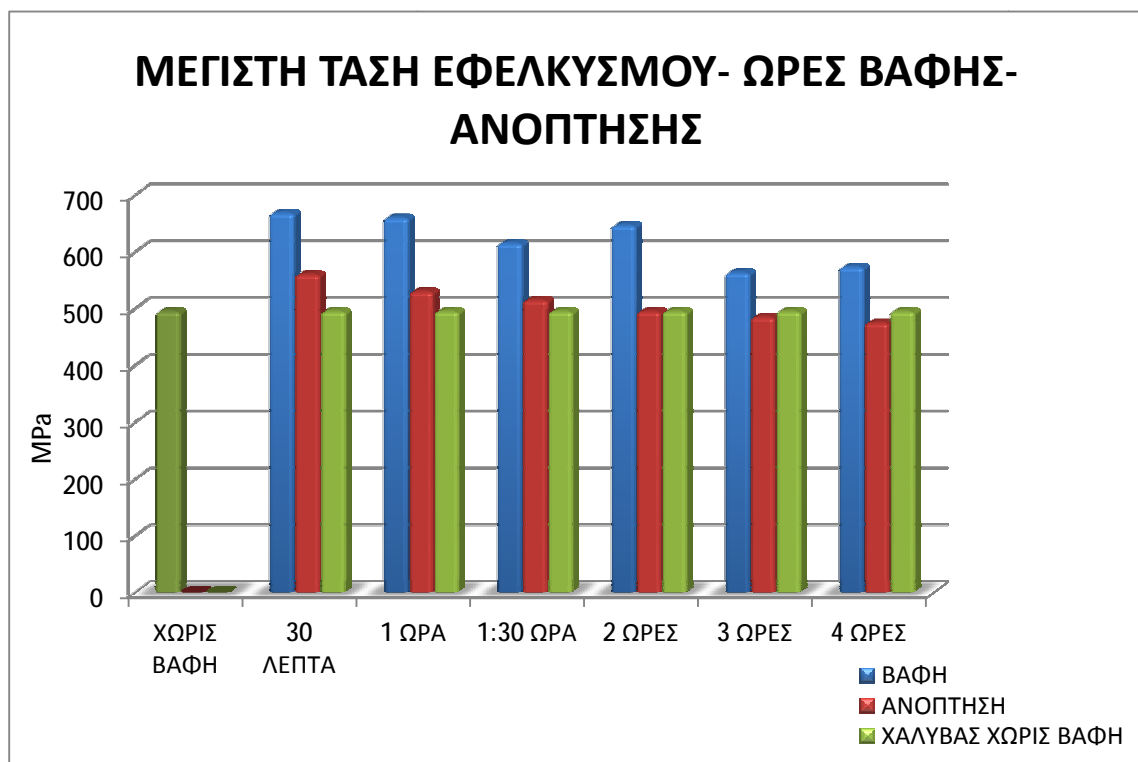
## 5.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πειράματα που αφορούν την πρώτη σειρά δοκιμίων, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε εφελκυσμό με μεταβλητή παράμετρο την ταχύτητα. Αυτό που αποκομίσαμε από την πρώτη αυτή φάση πειραμάτων, ήταν η αποφυγή του φαινομένου του «γλιστρήματος» του μηκυνσιόμετρου και η εύρεση της κατάλληλης ταχύτητας με την οποία θα συνεχίζαμε τα υπόλοιπα πειράματα μας. Η ταχύτητα αυτή ήταν 2mm/min. Στη συνέχεια, υποβάλαμε τα δοκίμια με σταθερή ταχύτητα σε εφελκυσμό, προκειμένου να διαπιστώσουμε τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα. Μετά από σύγκριση των πειραματικών μας τιμών με αυτών που βρήκαμε από τη βιβλιογραφία, διαπιστώσαμε ότι το υλικό μας βρίσκεται στην κατηγορία των κραμάτων χάλυβα με μεσαία περιεκτικότητα σε άνθρακα της τάξης του 0,10-0,15%.

Το επόμενο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας ήταν αυτό της θερμικής κατεργασίας του χάλυβα. Για να γίνει η κατεργασία αυτή έπρεπε πρώτα να βρούμε την κατάλληλη θερμοκρασία στην οποία θα γινόντουσαν τόσο οι βαφές, όσο και οι ανοπτήσεις των δοκιμίων. Έτσι, χρησιμοποιώντας τυποποιημένους πίνακες από τη βιβλιογραφία με βάση την περιεκτικότητα του χάλυβα σε άνθρακα, βρήκαμε ότι η θερμοκρασία βαφής είναι περίπου **880°C** και της ανόπτησης περίπου **550°C**. Με βάση αυτές της θερμοκρασίες προχωρήσαμε στις βαφές οι οποίες γίνανε σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, προκειμένου να διαπιστώσουμε τις μεταβολές που δέχονται οι μηχανικές ιδιότητες από την αύξηση του χρόνου βαφής. Αφού υποβάλαμε τα δοκίμια που βάψαμε σε εφελκυσμό, διαπιστώσαμε ότι είχαμε μια σταθερή τιμή της μέγιστης τάσης εφελκυσμού μέχρι τις 2 ώρες βαφής. Μετά το πέρας των 2 ωρών παρατηρήσαμε μια σημαντική και συνεχή πτώση της μέγιστης τάσης εφελκυσμού. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί με βάση τη θεωρία των υλικών, γιατί όση περισσότερη ώρα παραμένει ο χάλυβας σε υψηλή θερμοκρασία τόσο διογκώνονται οι κόκκοι του υλικού, με συνέπεια να έχουμε ένα χονδρόκοκκο υλικό με πολλές

ατέλειες, οι οποίες οδηγούν σε πτώση της αντοχής του υλικού. Το μέτρο ελαστικότητας όπως θα έπρεπε δεν επηρεάζεται από τη βαφή, κάτι το οποίο κρίνεται λογικό γιατί η βαφή είναι μία «επιφανειακή» κατεργασία και δεν επηρεάζει τις φυσικές ιδιότητες του υλικού.

Το τελευταίο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας είναι αυτό της ανόπτησης. Σε αυτό το στάδιο, κάποια από τα δοκίμια που είχαν υποστεί βαφή υποβλήθηκαν σε ανόπτηση. Πιο συγκεκριμένα ένα δοκίμιο από το κάθε σετ ώρας βαφής υποβλήθηκε για μία ώρα σε ανόπτηση. Τα αποτελέσματα μας έδειξαν τη σταθερή-γραμμική πτώση της μέγιστης τάσης εφελκυσμού σε σχέση με τη βαφή.



**Διάγραμμα 5.69:** Μέγιστη τάση εφελκυσμού για χάλυβα χωρίς βαφή, με βαφή και με ανόπτηση

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, η μέγιστη τάση εφελκυσμού, είναι μεγαλύτερη μετά από τη διαδικασία της βαφής, ακόμα και στην πρώτη μισή ώρα κατεργασίας. Επίσης, μέχρι τις δύο ώρες βαφής, η μέγιστη τάση εφελκυσμού είναι πολύ μεγαλύτερη αν συγκριθούν τα δοκίμια πριν και μετά τη βαφή. Μετά από τις τρεις

ώρες παρατηρούμε ότι στο υλικό η τάση εφελκυσμού μειώνεται συγκριτικά. Επίσης, παρατηρείται ότι μετά την ανόπτηση η μέγιστη εφελκυστική τάση μειώνεται σε σχέση με τη διαδικασία της βαφής.

Γενικά, παρατηρήσαμε στη διάρκεια της πτυχιακής, ότι οι ιδιότητες των μετάλλων, εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες. Αρχικά, για να δοθεί το σχήμα σε κάθε κομμάτι μετάλλου, πρέπει να γίνουν πολλές διαδικασίες διαμόρφωσης, οι οποίες αλλοιώνουν τις ιδιότητες του. Έπειτα, γίνεται η βαφή ή/και η ανόπτηση, η οποία θα προσδώσει καλύτερες ιδιότητες στο υλικό, έτσι ώστε να βγει στην παραγωγή.

Στη δική μας περίπτωση τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από ένα κατάστημα λιανικής πώλησης. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να μη γνωρίζουμε την πρότερη ιστορία του υλικού σε σχέση με τις διαδικασίες διαμόρφωσης που έχει υποστεί.

Επομένως, θα λέγαμε ότι τα συμπεράσματα με βάση τη θεωρία που γνωρίζουμε ευσταθούν και ότι τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά σε αυτά που περιμέναμε. Οι διαφορές που έχουν προκύψει, οφείλονται εκτός από ότι αναφέραμε παραπάνω και στις όποιες κατεργασίες είχε υποστεί το υλικό, πριν αγοραστεί και το διαμορφώσουμε στα δοκίμια των πειραμάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Τεχνική μηχανική αντοχή των υλικών, Δρ. Π. Α. Βουθούνης, Εκδόσεις Π. Α. Βουθούνης, ISBN 960-85431-4-2, 2003.
2. Σημειώσεις Εργαστηρίου Τεχνολογίας υλικών, Δρ. Γιαννόπουλος Γεώργιος, Α.Τ.Ε.Ι. Πατρών, 2011.
3. Αντοχή των υλικών, William A. Nash, ΕΣΠΙ Αθήνα, ISBN 07-045894-4, 1988
4. Σημειώσεις εργαστηρίου αντοχής των υλικών, Μπαράκος Γεώργιος, Α.Τ.Ε.Ι. Πατρών, 2002.
5. Σημειώσεις εργαστηρίου στοιχεία τεχνολογίας παραγωγής, Π. Ν. Μπότσαρης, Π. Δ. Σπάρης, Δ.Π.Θ., 2008.
6. Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών, William D. Callister Jr., Εκδόσεις Τζιόλα, ISBN 978-960-8050-90-7, 2008.
7. Σημειώσεις εργαστηρίου τεχνικά υλικά, Ε.Μ.Π., 2011.
8. Operation manual for computer controlled electronic universal testing machine, Time Group INC.
9. [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)
10. [www.instron.com](http://www.instron.com)
11. [www.matweb.com](http://www.matweb.com)