



Μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς διαβρωμένων ναυπηγικών χαλύβων

Μελέτη της κάμψης με διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης διαβρωμένων και μη δοκιμίων υπό διαφορά pH.



Φοιτητές
Ιωάννης Τσάλλας - 42935
Βασίλειος Χάλαρης - 40114
Επιβλέπων:
Καθ. Γιαννακόπουλος Κωνσταντίνος



Αθήνα, 2020

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας εργασίας κύριο Γιαννακόπουλο Κωνσταντίνο για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε και την βοήθεια που παρείχε κατά την εκπόνηση της πτυχιακής μας εργασίας. Θα θέλαμε επίσης να ευχαριστήσουμε τους αξιωματικούς του πολεμικού μας ναυτικού κύριο Αυγουλέα Κυριάκο και κύριο Μποζάνη Κωνσταντίνο καθώς και το γραφείο μελετών του Ναυστάθμου Σαλαμίνας για την προσφορά των ναυπηγικών χαλύβων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα αλλά και για την αμέριστη στήριξή τους. Τέλος θα θέλαμε να εκφράσουμε τις βαθύτερες ευχαριστίες μας στις οικογένειές μας που στάθηκαν δίπλα μας με όλες τους τις δυνάμεις κατά την διάρκεια των σπουδών μας.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	i
ABSTRACT.....	ii
1. Εισαγωγή.....	1
2. Δομή και Ιδιότητες Μετάλλων.....	3
3. Κράματα Σιδήρου-Άνθρακα (Fe-C).....	9
4. Ονοματολογία χαλύβων κατά τα ευρωπαϊκά πρότυπα	13
5. Θραύση και μηχανισμοί ρηγματώσεων	17
6. Μη - κραμματομενοι κατασκευαστικοί χάλυβες.....	21
7. Χάλυβες υψηλής αντοχής	24
8. Εφαρμογές στη ναυπηγική.....	27
9. Γενικές αρχές διάβρωσης χαλύβων.....	32
10. Κάμψη τριών σημείων	39
11. Πειραματικό Μέρος	42
12. Αποτελέσματα και Συζήτηση.....	49
13. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	73
Βιβλιογραφία	75

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1- 1: Αλουμινένιο Πλοίο	1
Σχήμα 2- 1: Σύγκριση Όλκιμου και Ψαθυρού υλικού στο διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης.....	6
Σχήμα 2- 2: Όριο διαρροής και θραύσης στο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης	7
Σχήμα 2- 3: Έλεγχος μηχανικών ιδιοτήτων μετάλλων (α) Φόρτιση σε εφελκυσμό, αριστερά, (β) Φόρτιση σε κάμψη, δεξιά.....	7
Σχήμα 3- 1: Κράμα σιδήρου – άνθρακα	9
Σχήμα 4- 1: Ονομασία για κατασκευαστικό χάλυβα (παράδειγμα).....	16
Σχήμα 4- 2: Ερμηνεία ονομασίας χαλύβων S275NL και S355NL	16
Σχήμα 5- 1: α) Η αύξηση του μήκους μιας ρωγμής με τη πάροδο του χρόνου. (β) Το ίδιο διάγραμμα ανεστραμμένο μας δίνει τον υπολειπόμενο χρόνο ζωής λόγω της αύξησης της ρωγμής.	18
Σχήμα 5- 2: Η ελάττωση της αντοχής του υλικού λόγω της επέκτασης των ρωγμών.	19
Σχήμα 5- 3: Διαγράμματα του ρυθμού επέκτασης της ρωγμής (da/dN) ως προς τη μεταβολή του συντελεστή KI (ΔΚ). Τα τρία στάδια επέκτασης ρωγμής.	21
Σχήμα 6- 1: Εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου.....	23
Σχήμα 9- 1: Ελεύθερη ενέργεια μετάλλου, ορυκτού και προϊόντων διάβρωσης.....	35
Σχήμα 9- 2: Ατμοσφαιρική διάβρωση του χάλυβα κάτω από ήδη σχηματισμένη σκουριά	37

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2- 1: Κρυσταλλικά συστήματα.....	4
Πίνακας 2- 2: Βασικές ιδιότητες μετάλλων.....	8
Πίνακας 4- 1: Ονοματολογία χαλύβων με βάση το EN 10027 -1 σύμφωνα με την εφαρμογή τους και τις φυσικές ή μηχανικές ιδιότητες τους	15
Πίνακας 6- 1: Είδη κατασκευαστικών χαλύβων.....	23
Πίνακας 7- 1: Χημική σύσταση χαλύβων υψηλής αντοχής.....	25
Πίνακας 8- 1: Τάσεις διαρροής κοινών χαλύβων (N/mm^2)	30
Πίνακας 8- 2: Τάσεις διαρροής χαλύβων υψηλής αντοχής (N/mm^2)	30
Πίνακας 8- 3: Χημικές ιδιότητες ναυπηγικών χαλύβων	31
Πίνακας 8- 4: Μηχανικές ιδιότητες ναυπηγικών χαλύβων.....	31
Πίνακας 9- 1: Πρότυπα ηλεκτροδιακά δυναμικά (στους 25 °C, πίεση 1 Atm και διάλυμα ενεργότητας 1).....	36

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται η ναυπηγική τεχνολογία, η οποία βασίζεται στη χρήση των μετάλλων. Για την αποτελεσματική λειτουργία του σκληρού θαλάσσιου περιβάλλοντος απαιτείται η χρησιμοποίηση χάλυβα, με την πιο υψηλή ποιότητα, προκειμένου να προστατευθούν οι λαμαρίνες από την κάθε μορφή διάβρωσης και τη διασφάλιση της αντοχής των πλοίων για μεγάλο χρονικό διάστημα. Στον τομέα της ναυπηγικής βιομηχανίας οι κατεργασίες των υλικών μπορούν να γίνουν με αποτελεσματικό τρόπο, ενώ, επίσης, απαιτείται η υψηλή ποιότητα των συγκολλήσεων και η απουσία εσωτερικών σφαλμάτων, που μπορούν να προέλθουν από τα διάφορα βασικά υλικά.

Με βάση, λοιπόν, αυτά τα στοιχεία στη συγκεκριμένη έρευνα επιχειρήθηκε η μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς διαβρωμένων ναυπηγικών χαλύβων, εστιάζοντας το ενδιαφέρον στη μελέτη της κάμψης με διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης διαβρωμένων και μη δοκιμίων υπό διαφορά pH. Με τον τρόπο αυτό θεωρείται ότι μπορούν να αξιολογηθούν τα στοιχεία, που αφορούν τη λειτουργία των ναυπηγικών χαλύβων και, κυρίως, της συμπεριφοράς των χαλύβων, που έχουν διαβρωθεί. Τέλος, τα δεδομένα αυτής της εργασίας μπορούν να αξιοποιηθούν για την περαιτέρω διερεύνηση του θέματος, δίνοντας έμφαση στις σύγχρονες μορφές ναυπηγικών χαλύβων

ABSTRACT

In recent years, shipbuilding technology based on the use of metals has been developed. Effective operation of the harsh marine environment requires the use of the highest quality steel in order to protect the sheets from any form of corrosion and to ensure the durability of the ships for a long time. In the shipbuilding sector, material handling can be done efficiently, and also requires high quality welds and no internal faults, which can come from the various basic materials.

On the basis of these data, therefore, this research attempted to study the mechanical behaviour of corroded steel, focusing on the study of bending at different loading rates of corroded and non-corrosive test specimens of pH. In this way it is considered that the data relating to the operation of shipbuilding steel and, in particular, the behaviour of corroded steel can be evaluated. Finally, the data of this work can be exploited to further explore the issue, focusing on modern forms of shipbuilding steel.

1. Εισαγωγή

Ιδιαίτερα σημαντικός θεωρείται ο ρόλος των μετάλλων, τα οποία χρησιμοποιούνται σε ποικίλους τομείς, προσελκύοντας με τον τρόπο αυτό το ενδιαφέρον αρκετών μελετητών. Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη της παρασκευής και παράλληλα της τεχνολογίας του χάλυβα και του σιδήρου έχει οδηγήσει στην ευρεία χρήση τους σε απλές κατασκευές, αλλά ταυτόχρονα και σε σημαντικά δομικά έργα. Ιδιαίτερο είναι ο ρόλος τους στη ναυπηγική βιομηχανία, στην οποία διαρκώς αναζητούνται νέες μέθοδοι ανέγερσης και βελτιωμένες κατασκευές, που θα μπορούσαν να επιτύχουν την επανάσταση στη χρήση των μελλοντικών αλουμινένιων πλοίων (Αλεξόπουλος, 2013).



Σχήμα 1- 1: Αλουμινένιο Πλοίο

Επίσης, οι απαιτήσεις των ναυπηγικών υλικών θεωρούνται ιδιαίτερα σημαντικές και για τον λόγο αυτό πλέον επιλέγεται τις περισσότερες φορές η χρήση του χάλυβα. Οι εξελίξεις, που σημειώνονται στον τομέα αυτό έχουν οδηγήσει στη χρήση νέων τύπων χαλύβων, κραμάτων αλουμινίου και σύνθετων υλικών. Με βάση αυτά τα στοιχεία στην εργασία αυτή θα μελετηθεί η μηχανική συμπεριφορά διαβρωμένων ναυπηγικών χαλύβων, προκειμένου να κατανοηθεί και να αξιολογηθεί η λειτουργικότητά τους. (Μαγκανάρης, 2000).

Για την υλοποίηση αυτής της εργασίας, επιλέχτηκε να αξιοποιηθεί η βιβλιογραφική ανασκόπηση, καθώς θεωρείται ότι είναι η πιο κατάλληλη μέθοδος, για να προσδώσει στην εργασία αυτή επιστημονικό χαρακτήρα και να διευκολύνει την υλοποίηση του ερευνητικού στόχου.

Δομή εργασίας

Αρχικά, στην εργασία αυτή θα αναλυθεί η δομή και θα παρουσιαστούν οι ιδιότητες των μετάλλων, ενώ στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα κράματα σιδήρου και άνθρακα. Στην επόμενη ενότητα θα γίνει αναφορά στην ονοματολογία των χαλύβων, με βάση τα ευρωπαϊκά πρότυπα και στη συνέχεια το ενδιαφέρον θα εστιασθεί στη θραύση και στους μηχανισμούς ρηγματώσεων, αλλά και στους μη – κρυσταλλωμένους κατασκευαστικούς χάλυβες. Επίσης, θα παρουσιαστούν οι χάλυβες υψηλής αντοχής και οι εφαρμογές στη ναυπηγική, αλλά και οι γενικές αρχές διάβρωσης των χαλύβων. Στην συνέχεια παρουσιάζεται το πειραματικό μέρος της εργασίας. Δύο τύποι ναυπηγικών χαλύβων (S275NL και S355NL) υπόκεινται σε τεστ κάμψης τριών σημείων. Στο πειραματικό κομμάτι περιγράφεται ο εξοπλισμός, η πειραματική μέθοδος, καθώς επίσης τα αποτελέσματα και συζήτηση επί αυτών. Η εργασία θα ολοκληρωθεί με την παράθεση των πειραματικών συμπερασμάτων, που μπορούν να αξιοποιηθούν από μελλοντικούς ερευνητές.

2. Δομή και Ιδιότητες Μετάλλων

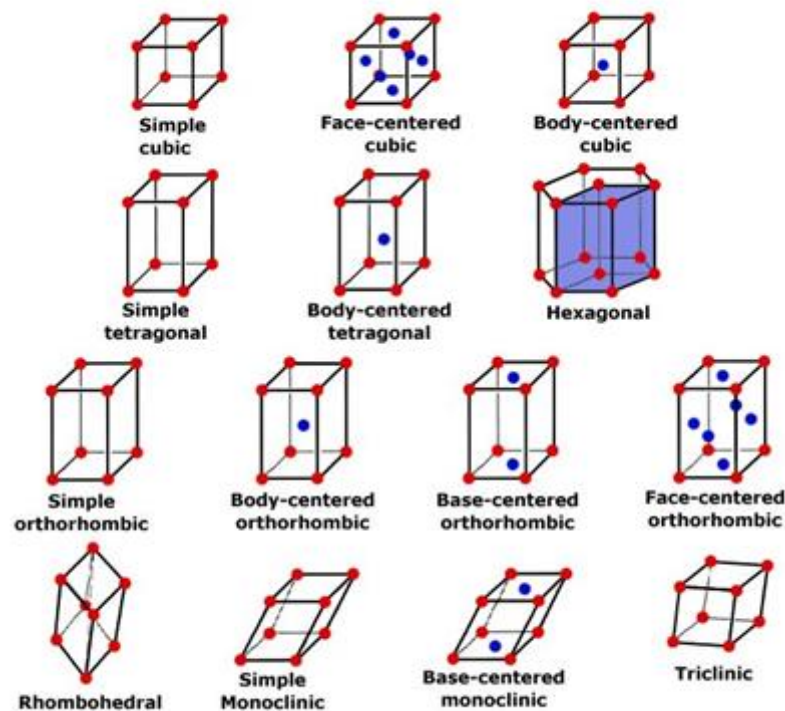
Τα μέταλλα θεωρούνται κρυσταλλικά στερεά και ότι, κατά συνέπεια, έχουν κρυσταλλική δομή, επειδή και στις τρεις διευθύνσεις του χώρου παρουσιάζεται περιοδικότητα από τη σύνταξη των ατόμων, που τα αποτελούν. Η διάταξη των ατόμων στο πλαίσιο μίας κρυσταλλικής δομής μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια του κρυσταλλικού πλέγματος, έχοντας την μοναδιαία κυψελίδα ως δομικό στοιχείο. Επίσης, τα επίπεδα του πλέγματος μπορούν να προσδιοριστούν με τους δείκτες Miller. Τα κρυσταλλικά στερεά ταξινομούνται ουσιαστικά σε 14 πλέγματα Bravais τα οποία μπορούν να καταταχθούν σε 7 κρυσταλλικά συστήματα. Τα άτομα των μετάλλων συντάσσονται παράλληλα σε διάφορες πυκνές δομές, από τις οποίες κυριότερες είναι οι δομές HCP, BCC και FCC. Πολλά μέταλλα παρουσιάζουν σε αρκετές περιπτώσεις αλλοτροπία, αποκτούν δηλαδή με τον τρόπο αυτό εξαιτίας της μεταβολής της θερμοκρασίας διαφορετική κρυσταλλική δομή. Στην κρυσταλλική δομή ενός μετάλλου μπορούν παράλληλα να φιλοξενηθούν άτομα ενός άλλου μετάλλου, προκειμένου να δημιουργηθούν στερεά διαλύματα. Με βάση τις θέσεις που καταλαμβάνουν τα ξένα άτομα, προωθείται η διάκριση των διαλυμάτων σε διαλύματα αντικαταστάσεως και παρεμβολής (Κορωνάιος & Πουλάκος, 2006).

Το μέγεθος των θέσεων παρεμβολής διευκολύνει τον προσδιορισμό της στερεάς διαλυτότητας στα στερεά διαλύματα παρεμβολής. Η δημιουργία στερεών διαλυμάτων αντικαταστάσεως διέπεται παράλληλα από τους διάφορους κανόνες Hume-Rothery. Τα περισσότερα κραματικά συστήματα παρουσιάζονται να μην μπορούν να ακολουθήσουν τους κανόνες αυτούς και, κατά συνέπεια, η στερεά διαλυτότητα είναι περιορισμένη. Στο πλαίσιο αυτό σχηματίζονται ενδομεταλλικές ενώσεις και πολλές φορές ενδιάμεσες φάσεις. Το κρυσταλλικό πλέγμα αλλά παράλληλα οι φάσεις (στερεά διαλύματα και ενδομεταλλικές ενώσεις) και σε αρκετές περιπτώσεις οι ατέλειες της δομής συγκροτούν τη “μικροδομή” ενός μετάλλου. Η μικροδομή του μετάλλου μπορεί να επηρεάσει τις ιδιότητές του και για τον λόγο αυτό η μελέτη των μετασχηματισμών της δομής θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική (Τριανταφύλλου, 2005).

Η δυνατότητα για την πραγματοποίηση μιας διεργασίας ή πολλές φορές και ενός μετασχηματισμού στα μεταλλικά συστήματα καθώς παράλληλα και η κατεύθυνση, που ακολουθείται από ένα σύστημα, μπορούν να προσδιοριστούν από τη θερμοδυναμική. Αντίθετα, υποστηρίζεται ότι η ταχύτητα της μεταβολής μπορεί να προσδιοριστεί από την κινητική (Τριανταφύλλου, 2005).

Όλα τα συστήματα παρουσιάζουν παράλληλα την τάση κίνησης προς την κατάσταση της θερμοδυναμικής ισορροπίας, κατάσταση, όπου εμφανίζεται να ελαχιστοποιείται η ελεύθερη ενέργεια Gibbs. Η ελεύθερη ενέργεια καθορίζεται από την ενθαλπία, δηλαδή την εσωτερική ενέργεια και την εντροπία του συστήματος και παράλληλα από την θερμοκρασία (Τσικριτζής, 2009).

Πίνακας 2- 1: Κρυσταλλικά συστήματα



Η παραγωγή των μετάλλων γίνεται κατά κύριο λόγο από τις διάφορες ενώσεις, οι οποίες εντοπίζονται στη φύση με τη μορφή των διαφόρων μεταλλευμάτων. Όπως επισημαίνεται τα διάφορα μεταλλεύματα υποβάλλονται σε φρύξη μέσα σε ειδικές εγκαταστάσεις και ύστερα από κατάλληλη διεργασία λαμβάνονται τα αντίστοιχα καθαρά μέταλλα. Τα μέταλλα ενώνονται με άλλα χημικά στοιχεία και σχηματίζουν διάφορες ενώσεις, οι οποίες ονομάζονται κράματα. Οι ιδιότητες των κραμάτων είναι βελτιωμένες και εξαρτώνται από τις αναλογίες ανάμιξης και τα υλικά. Τα σημαντικότερα γνωρίσματα τους είναι τα εξής (Κορωνάιος & Πουλάκης, 2006) :

- Η ικανότητα λήψης οποιουδήποτε σχήματος μετά την τήξη

- Η μεγάλη σκληρότητα
- Η ολκιμότητα
- Η ελατότητα
- Η πλαστικότητα
- Οι σημαντικές μηχανικές αντοχές (όριο διαρροής, όριο θραύσης)
- Η υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα
- Η αντίσταση τους σε διάβρωση (π.χ. ανοξείδωτοι χάλυβες)

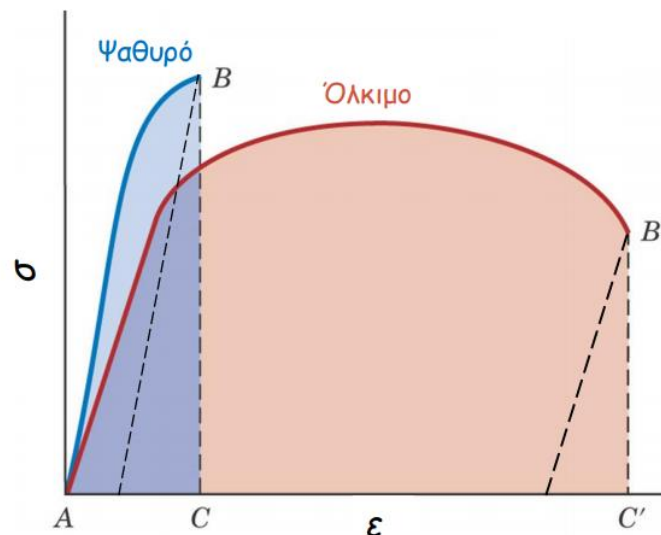
Με τη μορφή των δομικών υλικών τα μέταλλα άρχισαν να χρησιμοποιηθούν ευρέως και η χρησιμοποίησή τους προωθήθηκε όταν άρχισαν να κατασκευάζονται μεγαλύτερα και παράλληλα περισσότερο σύνθετα έργα, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση υλικών με μικρότερο κόστος και αναβαθμισμένες ιδιότητες. Τα πρώτα μεταλλικά δομικά έργα ήταν σιδηροδρομικές και οδικές γέφυρες, στέγες, στύλοι και δοκοί και κατασκευάζονταν από χυτοσίδηρο. Τα τελευταία χρόνια εξαιτίας της ραγδαίας ανάπτυξης της παρασκευής και παράλληλα της τεχνολογίας του χάλυβα και του σιδήρου, τα συγκεκριμένα μέταλλα χρησιμοποιούνται ευρέως σε αρκετά σημαντικά δομικά έργα, αλλά ταυτόχρονα και σε απλές κατασκευές (Κορωναίος & Πουλάκης, 2006).

Οι ιδιότητες των μετάλλων διακρίνονται σε τεχνολογικές, μηχανικές και φυσικοχημικές. Οι τεχνολογικές ιδιότητες αφορούν τη συμπεριφορά, που αναπτύσσουν τα μέταλλα στις διάφορες θερμικές και μηχανικές κατεργασίες, δίνοντας έμφαση στην ελατότητα. Από την άλλη, οι φυσικοχημικές ιδιότητες αφορούν, κατά κύριο λόγο, το ειδικό βάρος, το σημείο τήξης, τη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, αλλά σε αρκετές περιπτώσεις και τη χημική συμπεριφορά των μετάλλων. Οι μηχανικές ιδιότητες επικεντρώνονται στην καταπόνηση των διαφόρων υλικών, υπό την επιρροή διαφόρων εξωτερικών δυνάμεων.

Οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες είναι οι εξής (Τσικριτζής, 2009) :

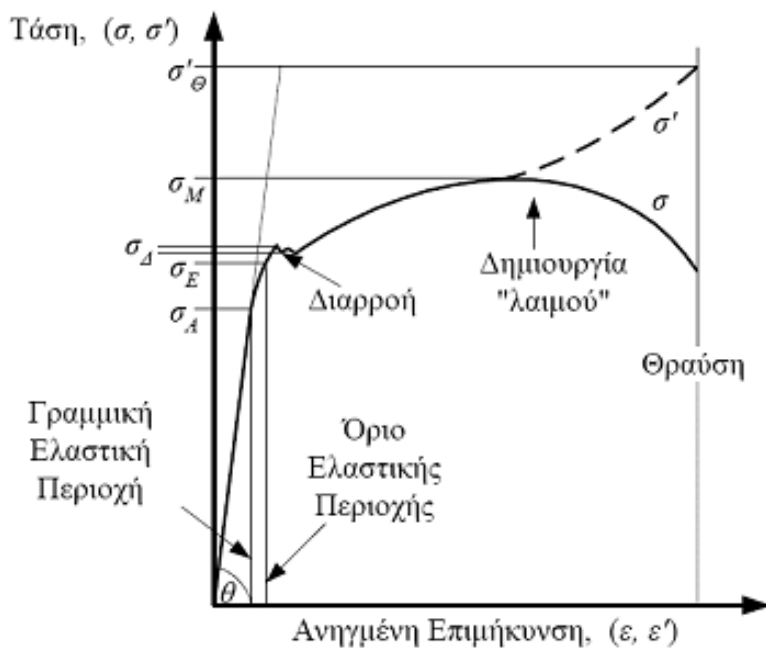
- Σκληρότητα: το μέτρο της αντίστασης του υλικού σε περιορισμένη τοπικά πλαστική παραμόρφωση (π.χ. μικρό κοίλωμα ή χαραγή).

- Ολκιμότητα: είναι το μέτρο του βαθμού πλαστικής παραμόρφωσης στο σημείο θραύσης. Ένα υλικό χαρακτηρίζεται όλκιμο όταν παραλαμβάνει μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις. Στην αντίθετη περίπτωση, το υλικό χαρακτηρίζεται ως ψαθυρό (βλ Σχήμα 2-1).



Σχήμα 2- 1: Σύγκριση Όλκιμου και Ψαθυρού υλικού στο διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης

- Δυσκαμψία: Είναι η αντίσταση του υλικού σε ελαστική παραμόρφωση η οποία δίνεται από το μέτρο ελαστικότητας του μετάλλου. Πιο μεγάλο μέτρο ελαστικότητας σημαίνει πιο δύσκολη ελαστική παραμόρφωση και μεγαλύτερη κλίση της ελαστικής περιοχής στο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (βλ. Σχήμα 2-2).
- Αντοχή διαρροής και αντοχή θραύσης. Η αντοχή διαρροής αναφέρεται στην τάση διαρροής όπου κάτω από αυτήν το δοκίμιο παραμορφώνεται μόνο ελαστικά, δηλαδή οποιαδήποτε παραμόρφωση μηδενίζεται με την αφαίρεση του φορτίου. Η αντοχή θραύσης αναφέρεται στην τάση δημιουργίας λαιμού και είναι η μέγιστη τάση του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης. Είναι το σημείο δημιουργίας λαιμού, ελάττωσης της διατομής του υλικού και κατ'επέκταση ελάττωση της αντίστασης του σε αύξηση του φορτίου. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί στην τελική θραύση του δοκιμίου.



Σχήμα 2- 2: Όριο διαρροής και θραύσης στο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης

Οι μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων μπορούν να διερευνηθούν σε συνθήκες λειτουργίας με εργαστηριακά πειράματα. Στο Σχήμα 2-3 φαίνονται εργαστηριακές διατάξεις όπου φορτίζουν δοκίμια σε εφελκυσμό και κάμψη.



Σχήμα 2- 3: Έλεγχος μηχανικών ιδιοτήτων μετάλλων (α) Φόρτιση σε εφελκυσμό, αριστερά, (β) Φόρτιση σε κάμψη, δεξιά

Οι σημαντικότερες φυσικές ιδιότητες των μετάλλων είναι οι εξής (Κορωναίος & Πουλάκης, 2006):

- Είναι καλοί αγωγοί θερμότητας
- Είναι όλκιμα
- Είναι ελατά
- Είναι καλοί αγωγοί ηλεκτρισμού
- Έχουν υψηλά σημεία τήξης
- Έχουν μεγάλες πυκνότητες

Στον Πίνακα 2-2, παρουσιάζονται οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων.

Πίνακας 2- 2: Βασικές ιδιότητες μετάλλων

Υλικό	Αντοχή Διαρροής (MPa)	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	Ολκιμότητα %EL (σε 50mm)
Αλουμίνιο	35	90	40
Χαλκός	69	200	45
Ορείχαλκος (70Cu-30Zn)	75	300	68
Σίδηρος	130	262	45
Νικέλιο	138	480	40
Χάλυβας	180	380	25
Τιτάνιο	450	520	25
Μολυβδαίνιο	565	655	35

Τέλος, οι μέθοδοι μορφοποίησης των μετάλλων είναι οι εξής :

- Διαμόρφωση με μηχανική κατεργασία ή αφαίρεση υλικού
- Διαμόρφωση με πλαστική παραμόρφωση
- Χύτευση

3. Κράματα Σιδήρου-Άνθρακα (Fe-C)

Τα κράματα αποτελούν υλικά, που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα σε αρκετές περιπτώσεις στοιχεία, από τα οποία το ένα τουλάχιστον μπορεί να είναι μέταλλο, και παρουσιάζουν τις ιδιότητες των μετάλλων. Σήμερα θεωρείται ότι σπάνια επιλέγεται η κατασκευή αντικειμένων από καθαρά μέταλλα. Με την κατάλληλη στήριξη μπορούν να δημιουργηθούν υλικά με τις διάφορες επιθυμητές ιδιότητες, όπως είναι η αντοχή στη σκουριά και στη διάβρωση, η μεγάλη σκληρότητα και η ηλεκτρική και μαγνητική συμπεριφορά. Σε γενικές γραμμές, χάλυβες μπορούν να θεωρηθούν τα κράματα άνθρακα και σιδήρου, τα οποία περιέχουν άνθρακα κάτω του 1.8% (Μπότης, 1991).

Παράλληλα στη σύνθεση των χάλυβων μπορούν να συνδυαστούν με τον σίδηρο διάφορα στοιχεία σε ποσοστιαίες αναλογίες, οι οποίες τις περισσότερες φορές δεν ξεπερνούν σε γενικές γραμμές το 5% (Κορωναίος & Πουλάκης, 2006).



Σχήμα 3- 1: Κράμα σιδήρου – άνθρακα

Στη συνέχεια θα αναλυθεί συνοπτικά ο ρόλος κάθε στοιχείου στον κραματομένο χάλυβα.

Άνθρακας(C): Αποτελεί το σημαντικότερο στοιχείο στους χάλυβες συμβάλλοντας σημαντικά στην ισχυροποίησή τους. Με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα αυξάνονται η σκληρότητα, η αντοχή και η εμβαιπτότητα, ενώ ταυτόχρονα μειώνονται η ολκιμότητα, η δυσθραυστότητα και η συγκολλησιμότητα.

Μαγγάνιο(Mn): Συναντάται σε όλους τους χάλυβες σε περιεκτικότητες πάνω από 0.2% και προστίθεται κυρίως για αποθείωση αφού σχηματίζει τα σουλφίδια MnS. Ο σχηματισμός των σουλφιδίων ευνοεί την κατεργασιμότητα και την συγκολλησιμότητα του χάλυβα. Η προσθήκη Mn οδηγεί επίσης σε σημαντική αύξηση της εμβαιπτότητας του χάλυβα.

Πυρίτιο (Si): Είναι ένα από τα δύο συστατικά που προστίθενται για την αποξείδωση του χάλυβα (το άλλο είναι το αλουμίνιο). Στους πλήρως καθησυχασμένους χάλυβες (killed steels) το Si ανέρχεται έως το 0.6%, ενώ στους ημικαθησυχασμένους (semi-killed steels) η περιεκτικότητα είναι μικρότερη. Υψηλές περιεκτικότητες σε Si οδηγούν σε μείωση της κατεργασιμότητας του χάλυβα.

Φώσφορος (P): Η παρουσία του πάνω από κάποιο όριο οδηγεί σε μείωση της ολκιμότητας και δυσθραυστότητας, ιδιαίτερα της αντοχής σε κρούση, κυρίως σε χάλυβες βαφής και επαναφοράς. Μπορεί όμως να έχει και ευεργετικά αποτελέσματα, όπως στους χάλυβες μηχανουργικής κατεργασίας (π.χ. free-machining steels), όπου κατά την τόννευση ή το φραιζάρισμα διευκολύνεται ο διαμερισμός του αποβλίττου με συνέπεια την βελτίωση της κατεργασιμότητας.

Θείο (S): Προκαλεί σημαντική μείωση της ολκιμότητας, της δυσθραυστότητας, της αντοχής σε κρούση και της συγκολλησιμότητας. Επίσης υποβαθμίζει την κατεργασιμότητα (κυρίως στην θερμηλασία) ενώ η παρουσία του αυξάνει την τάση ρωγμάτωσης κατά την βαφή των χαλύβων (quench cracking). Γενικά στους χάλυβες η τάση είναι η περιεκτικότητα σε θείο να παραμένει κάτω από 0.05% (βλ. πιο πάνω για το Mn).

Χρώμιο (Cr): Πρόκειται για ισχυρά καρβιδιογόνο στοιχείο. Τα καρβίδια του χρωμίου αυξάνουν την σκληρότητα και τις αντιτριβικές ιδιότητες του χάλυβα. Για τον λόγο αυτό το συναντάμε στους εργαλειοχάλυβες. Το χρώμιο αυξάνει επίσης την εμβαπτότητα καθώς και την αντοχή σε οξείδωση και διάβρωση. Σε συνδυασμό με το νικέλιο αποτελεί το σημαντικότερο κραματικό στοιχείο των ανοξείδωτων και των πυρίμαχων χαλύβων.

Νικέλιο (Ni): Προσδίδει ολκιμότητα και αυξάνει την δυσθραυστότητα των χαλύβων ενώ προκαλεί μείωση της θερμοκρασίας μεταβάσεως από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά θραύσεως (κρυογονικοί χάλυβες). Σε περιεκτικότητες πάνω από 7% σταθεροποιεί την ωστενιτική δομή σε θερμοκρασία δωματίου αποτελώντας ένα σημαντικό στοιχείο των ανοξείδωτων χαλύβων (π.χ. ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες).

Μολυβδαίνιο (Mo): Πρόκειται για ισχυρά καρβιδιογόνο στοιχείο που αυξάνει ταυτόχρονα και την εμβαπτότητα των χαλύβων. Τα καρβίδια του μολυβδαινίου σχηματίζονται κατά την

επαναφορά μετά τη βαφή και προκαλούν την δευτερογενή σκλήρυνση του χάλυβα. Η προσθήκη Mo στους ανοξείδωτους χάλυβες οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση της αντοχής στην διάβρωση (π.χ. χάλυβας 316 έναντι του χάλυβα 304).

W, V, Ti, Nb: Πρόκειται για καρβιδιογόνα στοιχεία, τα οποία συντελούν στην αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής με τον σχηματισμό καρβιδίων ενώ ταυτόχρονα περιορίζουν την ανάπτυξη των κόκκων σε υψηλές θερμοκρασίες. Για τους λόγους αυτούς τα συναντάμε στους εργαλειοχάλυβες για την κατασκευή κοπτικών και διαμορφωτικών εργαλείων. Τα V, Nb και Ti αποτελούν κύρια συστατικά των χαμηλά κραματωμένων χαλύβων υψηλής αντοχής (HSLA steels).

Άζωτο (N): Το άζωτο είναι μαζί με τον άνθρακα τα κραματικά στοιχεία παρεμβολής στους χάλυβες. Το άζωτο αυξάνει την σκληρότητα και την αντοχή ενώ παράλληλα μειώνει την ολκιμότητα. Χρησιμοποιείται στους χάλυβες εναζωτώσεως για την αύξηση της επιφανειακής 14 σκληρότητας. Στους πλήρως καθησυχασμένους χάλυβες (αποξείδωση με Al) σχηματίζει διασπορά νιτριδίων AlN, τα οποία παρεμποδίζουν την ανάπτυξη των κόκκων.

Κοβάλτιο (Co): Το κοβάλτιο είναι το μοναδικό στοιχείο που μειώνει την εμβαπτότητα των χαλύβων, δεν σχηματίζει καρβίδια και έχει εν γένει μικρή επίδραση στην σκληρότητα του χάλυβα. Η κύρια δράση του είναι να παρεμποδίζει την αποκατάσταση των αταξιών και την ανάπτυξη των κόκκων κατά την ανόπτηση ή την επαναφορά του χάλυβα. Έτσι συμβάλει στην διατήρηση της μηχανικής αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες και χρησιμοποιείται σε ταχυχάλυβες, διαμορφωτικά εργαλεία καθώς και σε πυρίμαχους χάλυβες.

Ο χάλυβας (ατσάλι) αποτελεί το κράμα σιδήρου – άνθρακα και παρουσιάζει μεγαλύτερη σκληρότητα και ανθεκτικότητα από τον σίδηρο. Σε αρκετές περιπτώσεις παρουσιάζει σε μικρά ποσοστά και διάφορα άλλα μέταλλα, όπως το νικελίου, που τον καθιστά όλκιμο και ελατό και το χρώμιο, που τον μεταβάλλει με τρόπο, που είναι ανοξείδωτος. Το κράμα αυτό χρησιμοποιείται, κατά κύριο λόγο, ως δομικό υλικό στην κατασκευή γεφυρών και κτιρίων. Επίσης, με βάση τη χρήση του χάλυβα μπορούν να παρουσιαστούν οι παρακάτω κατηγορίες :

- Ειδικός χάλυβας

- Απαραμόρφωτος χάλυβας
- Χάλυβας απότμησης
- Χάλυβας κοπής
- Πυρίμαχος χάλυβας
- Χάλυβας εργαλείων
- Ανοξειδωτος χάλυβας
- Χάλυβας οπλισμού
- Δομικός χάλυβας

Επιπλέον επισημαίνεται ότι τα κράματα του χάλυβα μπορούν να διαχωριστούν στις εξής κατηγορίες (Τσικριτζής, 2009):

- Ταχυχάλυβες
- Ανοξειδωτοι χάλυβες
- Χάλυβες χρωμίου – μολυβδαινίου
- Χάλυβες μολυβδαινίου
- Χάλυβες χρωμίου
- Χάλυβες Νικελίου-Χρωμίου, Νικελίου-Χρωμίου-Μολυβδαινίου, Νικελίου-Χρωμίου-Βαναδίου
- Χάλυβες νικελίου
- Χάλυβες μαγγανίου

Επειδή ο χάλυβας κατέχει ιδιαίτερα σημαντική θέση στις παγκόσμιες αγορές τα τελευταία χρόνια, στη συνέχεια θα παρουσιαστεί η ονοματολογία των διαφόρων ειδών του, με βάση τα ευρωπαϊκά πρότυπα.

4. Ονοματολογία χάλυβων κατά τα ευρωπαϊκά πρότυπα

Τα τελευταία χρόνια επιχειρείται η εφαρμογή ομοιόμορφων κανόνων στον ευρωπαϊκό χώρο, προκειμένου να προσδιοριστούν οι χάλυβες σε όλα τα κράτη – μέλη. Οι συγκεκριμένες προδιαγραφές ορίζονται με βάση τα παρακάτω πρότυπα (Πασπαλάς, 2009).

- EN 10079: Definition of Steel Products
- EN: Designation systems for steels. Numerical system
- EN: Designation system for steels. Steel names.
- EN 10020: Definition and Classification of Grades of Steel

Με βάση το ενοποιημένο σύστημα ονομασίας για χάλυβες επισημαίνεται ότι σε όλα τα κράτη – μέλη CEN (προς το παρόν Κύπρος, Τσεχία, Ισπανία, Σλοβενία, Σλοβακία, Ελβετία, Σουηδία, Ρουμανία, Πορτογαλία, Πολωνία, Αυστρία, Νορβηγία, Ολλανδία, Μάλτα, Λουξεμβούργο, Λετονία, Ιταλία, Ιρλανδία, Ισλανδία, Ουγγαρία, Ελλάδα, Φινλανδία, Εσθονία, Γερμανία, Δανία, Βουλγαρία και Βέλγιο) ως προς την ανάπτυξη της εισαγωγής του χάλυβα, οι ονομασίες παρουσιάζονται ίδιες ή μπορεί να εμφανιστούν ίδιες στο μέλλον. Με τον τρόπο αυτό, οι μετατροπές, που μπορούν να παρατηρηθούν από τη μία στην άλλη σε ένα ουσιαστικά εθνικό πρότυπο αλλά και διάφορα σχετικά ζητήματα μπορούν να εξαλειφθούν (Πασπαλάς, 2009).

Με βάση το πρότυπο EN 10020:2000 οι χάλυβες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως προς τη χημική τους σύσταση και την ποιότητα. Ειδικότερα, ως προς τη χημική σύσταση διακρίνονται σε :

- Ανοξείδωτοι χάλυβες
- Μη κραματωμένοι χάλυβες
- Άλλοι κραματωμένοι χάλυβες

Αντίθετα, ως προς την ποιότητα μπορούν να διακριθούν σε

- Μη κραματωμένοι ειδικοί χάλυβες
- Μη κραματωμένοι χάλυβες ποιότητας

Τις πιο πολλές φορές οι μη κραματωμένοι ειδικοί χάλυβες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εμβάπτιση ή παράλληλα σκλήρυνση της επιφάνειας, ενώ ταυτόχρονα χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα ομοιόμορφης ανταπόκρισης σε τέτοιου είδους κατεργασίες. Παράλληλα, «η ακριβής προσαρμογή της χημικής σύστασης και της ειδικής προσοχής στη μέθοδο κατασκευής και καταγραφής παρέχει βελτιωμένες ιδιότητες για την εκπλήρωση υψηλότερων απαιτήσεων».

Με βάση το πρότυπο EN 10027-1 καθορίζονται οι κανόνες, που αφορούν την ονομασία των χαλύβων, μέσω των διαφόρων χαρακτηριστικών αριθμών και γράμματων, αλλά και πληροφοριών ως προς τις κύριες κατηγορίες. Η ονομασία των χαλύβων γίνεται με βάση τη χημική τους σύσταση και παράλληλα με βάση την εφαρμογή τους σύμφωνα με τις φυσικές ή μηχανικές τους ιδιότητες. Η ονομασία των χαλύβων με βάση τις φυσικές ή μηχανικές τους ιδιότητες αποτελείται από τα πρόσθετα και τα κύρια σύμβολα. Στα κύρια σύμβολα συμπεριλαμβάνεται ένα γράμμα, με το οποίο δίνονται πληροφορίες για την εφαρμογή του χάλυβα (Μανδήτσιος, 2012) :

- B : χάλυβες σκυροδέματος
- E : χάλυβες μηχανολογικής μηχανικής
- L : χάλυβες για την κατασκευή αγωγών
- P : χάλυβες για την κατασκευή δοχείων υπό πίεση
- S : χάλυβες για γενική χαλύβδινη κατασκευή
- G : χυτοχάλυβας

Τα πρόσθετα σύμβολα χρησιμοποιούνται, για να δώσουν πληροφορίες για το προϊόν του χάλυβα και παράλληλα για άλλες ιδιότητες του χάλυβα (Πασπαλάς, 2009).

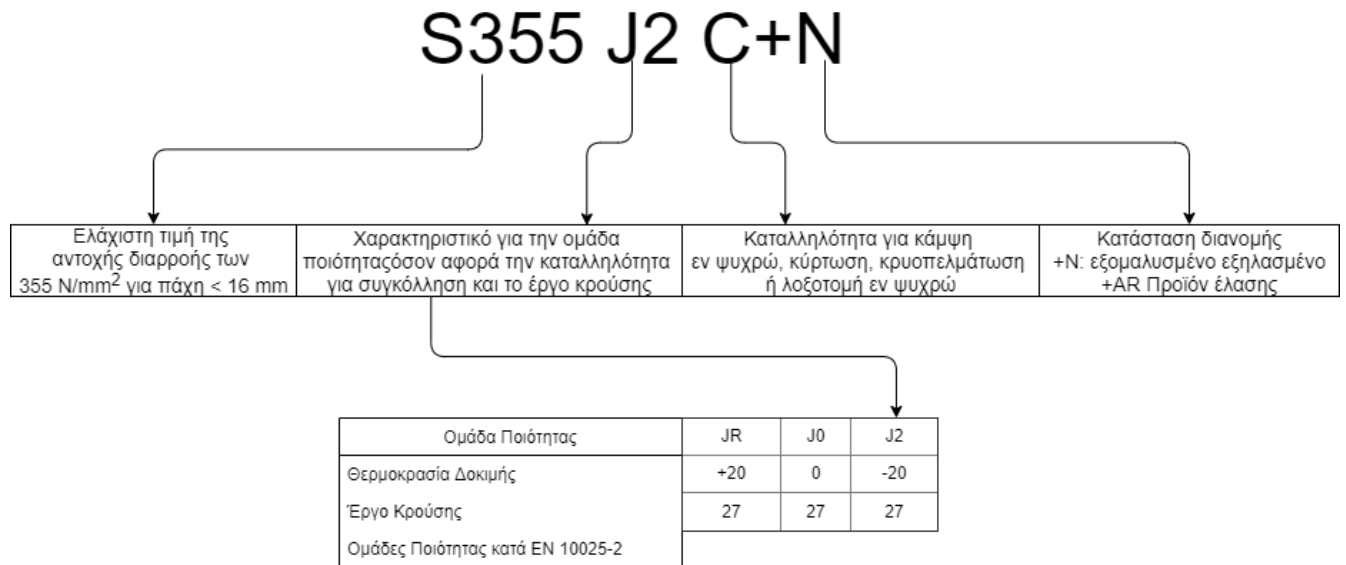
Πίνακας 4- 1: Ονοματολογία χαλύβων με βάση το EN 10027 -1 σύμφωνα με την εφαρμογή τους και τις φυσικές ή μηχανικές ιδιότητες τους

Κύρια σύμβολα		Πρόσθετα σύμβολα για χάλυβα		Πρόσθετα σύμβολα για προϊόντα χάλυβα	
G	S	an... a)		+an+an... a)	
Letter	Μηχανική ιδιότητα	Ομάδα 1 b)		Ομάδα 2 c, d)	Πίνακες 16, 17, 18 συμφ. με EN 10027-2
G = Χυτοχάλυβας	n n n = Ελάχιστο όριο ελαστικότητας a) σε MPa b) για το μικρότερο εύρος πάχους	Ενέργεια ιδιότητας κρούσης σε Joule (J)		Θερμοκρασία δοκιμής °C	
S = Δομικός χάλυβας		27 J	40 J		60 J
		JR	KR	LR	
		J0	K0	L0	
		J2	K2	L2	
		J3	K3	L3	
		J4	K4	L4	
		J5	K5	L5	
		J6	K6	L6	
		A = Τελειωτική σκλήρυνση M = Θερμομηχανικά εξηλασμένο N = Εξομαλυσμένο ή κανονικά εξηλασμένο Q = Με ψύξη και επαναφορά G = Άλλα χαρακτηριστικά που ακολουθούν			

Πρέπει, επίσης, να επισημανθεί ότι με βάση τον EN 10020 δεν θεωρείται ότι υπάρχει με σαφή τρόπο διαφοροποίηση των διαφόρων κραματωμένων χαλύβων σε ισχυρά κραματωμένους αλλά και σε ελαφρά κραματωμένους χάλυβες. Οι κραματωμένοι χάλυβες διακρίνονται ουσιαστικά σε :

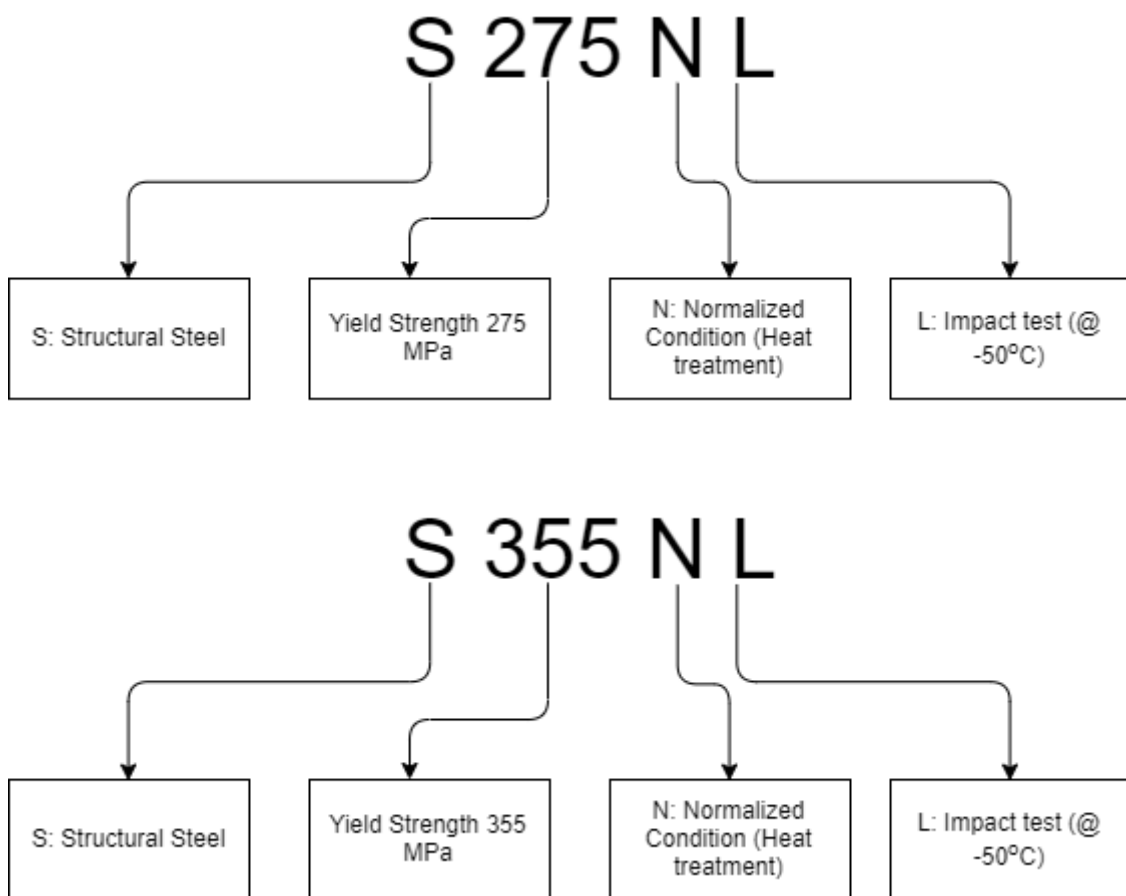
- Μη κραματωμένοι χάλυβες με μία μέση περιεκτικότητα – Μη < 1 %
- Μη κραματωμένοι χάλυβες με έναν μέσο όρο >1%
- Ανοξειδωτοι χάλυβες και χάλυβες άλλων κραμάτων , αν η μέση περιεκτικότητα έστω και ενός στοιχείου είναι > 5%

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η ονομασία για κατασκευαστικό χάλυβα



Σχήμα 4- 1: Ονομασία για κατασκευαστικό χάλυβα (παράδειγμα)

Στο Σχήμα 4-2 αντίστοιχα φαίνεται η επεξήση της ονομασίας των δομικών χαλύβων (S275NL και S355NL) που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα κάμψης τριών σημείων.



Σχήμα 4- 2: Ερμηνεία ονομασίας χαλύβων S275NL και S355NL

5. Θραύση και μηχανισμοί ρηγματώσεων

Οι ρωγμές, όπως επισημαίνεται από πολλούς ερευνητές, αποτελούν τον πιο σημαντικό παράγοντα αστοχίας που παρουσιάζουν οι φορείς και γενικότερα οι κατασκευές. Επίσης, οι ρωγμές θεωρούνται ιδιαίτερα δαπανηρές στην επισκευή και για τον λόγο αυτό δεν μπορούν να επισκευαστούν εντελώς. Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις, όπου προκαλείται με τον τρόπο αυτό η θραύση, θέτοντας σε κίνδυνο την ανθρώπινη ζωή και το περιβάλλον. Η θραύση μίας κατασκευής ή ενός υλικού μπορεί να επηρεαστεί από διαφόρους συντελεστές, με πιο σημαντικούς τους εξής (Παντελής & Χρυσουλάκης, 2007):

- το επίπεδο της εφαρμοζόμενης τάσης
- τον μηχανισμό δημιουργίας και ολοκλήρωσης της θραύσης
- τις ιδιότητες του υλικού
- την παρουσία ελαττωμάτων ή στελεχών

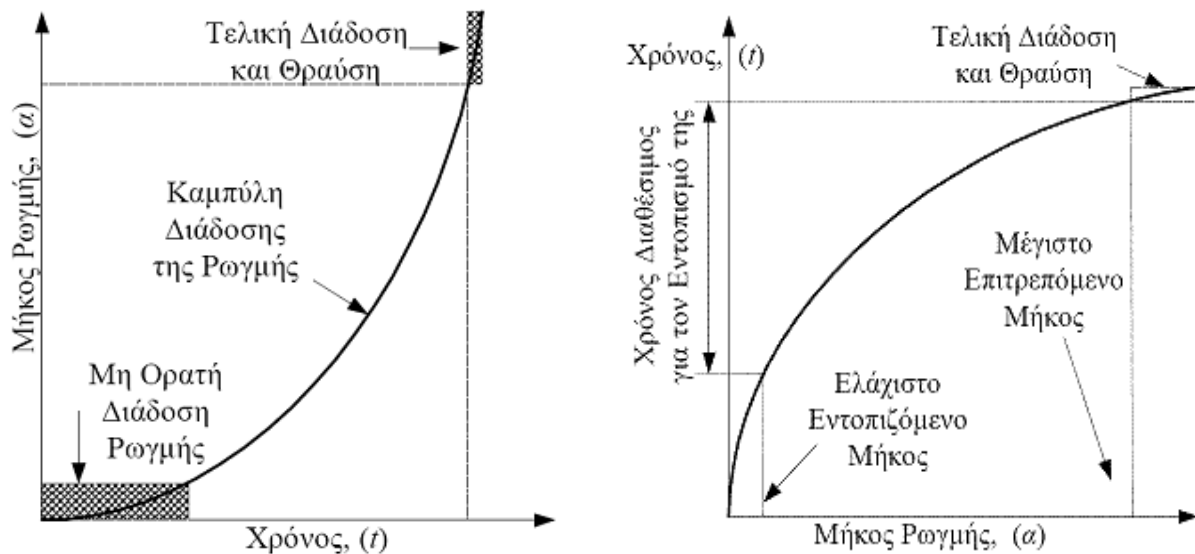
Οι ρωγμές παράλληλα μπορούν να προϋπάρχουν με τη μορφή των ατελειών μέσα σε ένα υλικό, ενώ παράλληλα είναι δυνατή η δημιουργία τους κατά τη χρήση του υλικού, εξαιτίας ακτινοβολίας, διάβρωσης και κόπωσης. Για τον λόγο αυτό θεωρείται σημαντική η ανάπτυξη ποσοτικών σχέσεων ανάμεσα στην αύξηση των ρωγμών και των συγκεκριμένων συντελεστών μέχρι την τελική θραύση, ενώ επίσης, σημαντικές θεωρούνται οι μέθοδοι ελέγχου και αξιολόγησης, προκειμένου να κριθεί με περισσότερη ακρίβεια η κατάσταση των κατασκευών. Με βάση τη μελέτη και την αξιολόγηση ουσιαστικά της θραύσης, θεωρείται ότι μπορεί να διευκολυνθεί η προσπάθεια των σχεδιαστών μηχανικών να επιτύχουν την πρόληψη των δομικών αστοχιών και ατελειών¹.

Στο πλαίσιο αυτό στην ολοκλήρωση των διαδικασιών σχεδιασμού είναι απαραίτητο να συμπεριλαμβάνεται και η συμπεριφορά ενός φορέα, στον οποίο παρατηρούνται ρωγμές, όταν επικρατούν κανονικές συνθήκες. Επίσης, θεωρείται σημαντική η ανάπτυξη κριτηρίων, έτσι ώστε να χαρακτηρισθούν οι ρωγμές και να αξιολογηθεί κάθε πιθανότητα διάδοσης, παρουσιάζοντας αρνητικά αποτελέσματα.

¹ <http://users.teiath.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/204ThrausiKopwsis.html>

Παράλληλα, εξαιτίας της ανάπτυξης του φαινομένου της κόπωσης και της θραύσης δημιουργήθηκε η ανάγκη να αναπτυχθεί ένας τομέας της επιστήμης, που θα μελετά τα δύο αυτά φαινόμενα. Η συγκεκριμένη ανάγκη βασίστηκε στα εξής στοιχεία ²:

- 1) οι ρωγμές, οι οποίες μπορούν να βρεθούν σε μία κατασκευή, όπου εμφανή είναι τα σημάδια καταπόνησης, παρουσιάζουν αυξητική τάση, εξαιτίας των φαινομένων της ακτινοβολίας, της διάβρωσης, της κόπωσης, αλλά παράλληλα και άλλων αιτιών, ενώ ραγδαία παρουσιάζεται η επέκτασή του



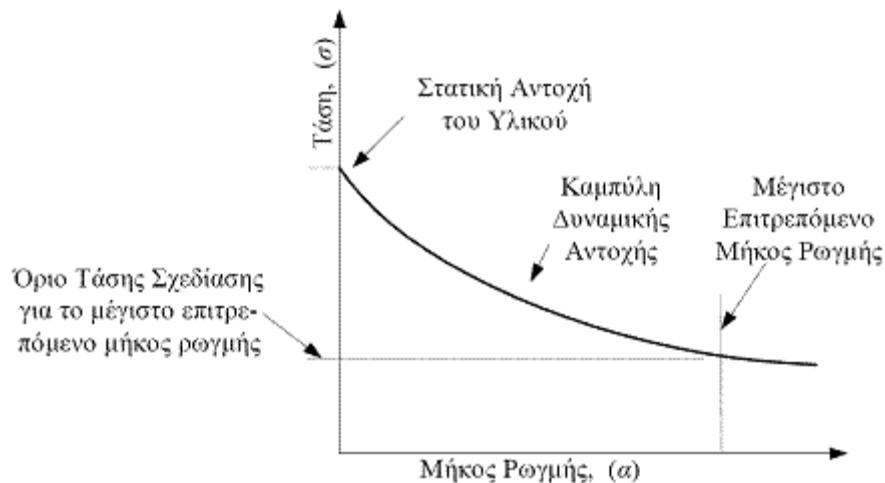
Σχήμα 5- 1: α) Η αύξηση του μήκους μιας ρωγμής με τη πάροδο του χρόνου. (β) Το ίδιο διάγραμμα ανεστραμμένο μας δίνει τον υπολειπόμενο χρόνο ζωής λόγω της αύξησης της ρωγμής.

- 2) η αντοχή των διαφόρων κατασκευών μπορεί να μειωθεί ανάλογα με την αύξηση και την επέκταση των ρωγμών μέσα στο υλικό, ενώ μετά από την παρουσίαση ενός διαστήματος κόπωσης, η αντοχή της μειώνεται, οδηγώντας την κατασκευή σε αστοχία

Στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 5-2) παρουσιάζεται ότι όσο πιο μικρές είναι τάσεις τόσο αυξάνεται το επιτρεπόμενο μήκος των ρωγμών, ενώ στην περίπτωση ύπαρξης μεγάλων εφαρμοζόμενων τάσεων, παρουσιάζεται η απαίτηση πιο μεγάλης αντοχής και, κατά συνέπεια, πιο μικρών ρωγμών³

² <http://users.teiath.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/204ThrausiKopwsi.html>

³ <http://users.teiath.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/204ThrausiKopwsi.html>



Σχήμα 5- 2: Η ελάττωση της αντοχής του υλικού λόγω της επέκτασης των ρωγμών.

Πρέπει να επισημανθεί, επίσης, ότι η για την επίλυση όλων αυτών των προβλημάτων, που αφορούν τα θέματα της κόπωσης και της θραύσης, είναι απαραίτητο να διερευνηθούν τα εξής (Παπάζογλου, 1995):

- υπολειπόμενος χρόνος ζωής των κατασκευών σε περίπτωση ύπαρξης της συγκεκριμένης ατέλειας ή ρωγμής
- η αξιολόγηση της κατάστασης και της αξιόπιστης λειτουργίας των κατασκευών, όταν διαπιστωθούν ρωγμές ή ατέλειες
- η συχνότητα ελέγχου των κατασκευών, με στόχο την επέκταση παλιών ρωγμών ή την εμφάνιση νέων ρωγμών
- ο χρόνος που απαιτείται μέχρι οι ρωγμές να φτάσουν σε ένα συγκεκριμένο μέγεθος
- η υπολειπόμενη αντοχή των κατασκευών ως συνάρτηση του μεγέθους των ρωγμών στα υλικά τους
- η υπολειπόμενη αντοχή των κατασκευών ως συνάρτηση της κόπωσης, που παρουσιάζεται μέχρι τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή

Μία από τις πιο σημαντικές μεθόδους για τη διερεύνηση όλων αυτών των στοιχείων θεωρείται η μέθοδος του ενεργειακού ισοζυγίου. Ειδικότερα, ο A. A. Griffith διατύπωσε πριν από 80 περίπου χρόνια τις ποσοτικές σχέσεις, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν για τη θραύση των ρηγματωμένων στερεών. Ο Griffith προχώρησε το 1920 στη

δημοσίευση των πειραματικών και θεωρητικών του αποτελεσμάτων με εύθραυστα ψαθυρά στερεά, δίνοντας τη δυνατότητα σύνδεσης της τάσης θραύσης με το μέγεθος της ρωγμής. Επίσης, υποστήριξε ότι οι ατέλειες και οι μικρορωγμές που εμφανίζονται στο υλικό μπορούν να επεκταθούν και στη συνέχεια να ενωθούν και να διαδοθούν, όταν ένα εξωτερικό φορτίο επιβληθεί στο υλικό. Παράλληλα, υποστήριξε την ύπαρξη ενός ενεργειακού ισοζυγίου ανάμεσα σε επιφανειακή ενέργεια από τη ρωγμή και παράλληλα δυναμική ενέργεια από τη φόρτιση.

Διατύπωσε λοιπόν, τη κλασική σήμερα θεώρηση, ότι ένα προϋπάρχον ελάττωμα τείνει να διαδοθεί αν πρόκειται να μειωθεί η συνολική ενέργεια του συστήματος. Θεωρώντας δε ότι υπάρχει ένα ισοζύγιο ενεργειών μεταξύ:

- 1) Της μείωσης της ελαστικής παραμορφωτικής ενέργειας εντός ενός φορτισμένου σώματος, καθώς διαδίδεται μία ρωγμή, και,
- 2) Της ενέργειας που απαιτείται για τη καταπολέμηση των δυνάμεων συνοχής και τη δημιουργία των νέων επιφανειών της ρωγμής

Από το ενεργειακό αυτό ισοζύγιο, προκύπτει η παρακάτω εξίσωση η οποία συνδέει την εφαρμοζόμενη τάση με το μήκος της ρωγμής.

$$\sigma\sqrt{\pi a} = (2E\gamma_\epsilon)^{1/2} = \text{σταθ.}$$

Όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και γ_ϵ η ειδική ενέργεια επιφάνειας του υλικού, τα οποία αποτελούν χαρακτηριστικές ιδιότητες του υλικού.

Όπως προκύπτει από την παραπάνω εξίσωση, για να επεκταθεί η ρωγμή, πρέπει να ισχύει η παρακάτω συνθήκη:

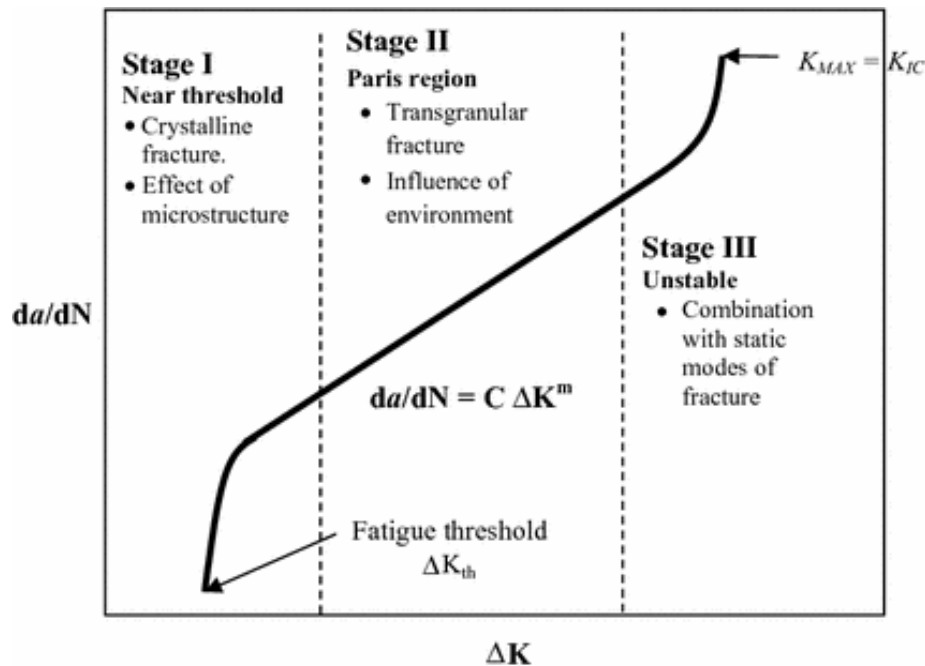
$$\sigma \geq \sqrt{\frac{2E\gamma_\epsilon}{\pi a}}$$

Σε γενικές γραμμές μπορούν να παρουσιαστούν τρία στάδια στη διάδοση των ρωγμών, τα οποία είναι τα εξής (Κόλλια, 1990):

- έναρξη των ρωγμών
- επέκταση της ρωγμής με σταθερό τρόπο

- επέκταση της ρωγμής με απότομο τρόπο και τελική θραύση

Τα τρία αυτά στάδια φαίνονται στο Σχήμα 5-3.



Σχήμα 5-3: Διαγράμματα του ρυθμού επέκτασης της ρωγμής (da/dN) ως προς τη μεταβολή του συντελεστή KI (ΔK). Τα τρία στάδια επέκτασης ρωγμής.

6. Μη - κρραματωμένοι κατασκευαστικοί χάλυβες

Η παρασκευή του χάλυβα βασίζεται στην εξαθράκωση του χυτοσιδήρου ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται απομάκρυνση του φωσφόρου και του θείου, τα οποία θεωρούνται επιβλαβή στοιχεία. Επίσης, προωθείται η ρύθμιση της περιεκτικότητας σε μαγγάνιο και πυρίτιο, τα οποία αποτελούν στοιχεία, που εμπεριέχει ο ακατέργαστος σίδηρος. Οι παραπάνω ρύποι μπορούν να απομακρυνθούν με τη διαδικασία της καύσης με την πρόσδοση οξυγόνου. Παράλληλα, η επιθυμητή χημική σύσταση του χάλυβα μπορεί να επιτευχθεί με την αποξείδωση και στη συνέχεια τη διαδικασία προσθήκης ασβέστου, με στόχο τη δέσμευση του φωσφόρου (Παντελής & Χρυσουλάκης, 2007).

Προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία φυσαλίδων, οι οποίες τις περισσότερες φορές εμφανίζονται κατά τη χύτευση του ρευστού χάλυβα εξαιτίας της ύπαρξης υπολειμμάτων οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα, προωθείται η προσθήκη στο κράμα με συμπληρωματικό τρόπο πυρίτιου, μαγγανίου, ή πολλές φορές ασβεστίου ή αλουμίνιου. Οι επεξεργασμένοι χάλυβες με αυτόν τρόπο ονομάζονται ησυχασμένοι και τα πλεονεκτήματά τους βασίζονται στο ότι δεν επηρεάζονται από τη γήρανση, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να

συγκολληθούν με ιδιαίτερα καλό τρόπο. Με βάση τον τρόπο κατασκευής τους οι χάλυβες διακρίνονται στις εξής κατηγορίες (Καρύδης, 2000):

- Κονιομεταλλουργικός χάλυβας
- Χάλυβας χωνευτηρίου
- Χάλυβας τήξης
- Αφρίζων χάλυβας
- Ησυχασμένος χάλυβας

Επιπλέον, με βάση τη χρήση τους, οι χάλυβες μπορούν να διακριθούν σε :

- Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών
- Εργαλειοχάλυβες
- Ανοξείδωτοι χάλυβες
- Χάλυβες κατασκευών

Σε γενικές γραμμές οι μη κραματωμένοι χάλυβες αποτελούν ποιότητες χάλυβα, στις οποίες κανένα από τα κραματικά τους στοιχεία δεν υπερβαίνει τα απαιτούμενα όρια. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι χάλυβες κατασκευών, οι οποίοι είναι χάλυβες, που περιέχουν σχετικά ποσοστά στοιχείων, ενώ παράλληλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ποικίλες κατασκευές, αλλά παράλληλα και σε διάφορα στοιχεία μηχανών, όπως για παράδειγμα τα ελατήρια, τις βαλβίδες, τους διωστήρες και τους άξονες. Η κατάταξη των συγκεκριμένων χάλυβων γίνεται κατά AISI – SAE, ενώ ως προς τη δομή τους διακρίνονται στις εξής κατηγορίες (Παντελής & Χρυσουλάκης, 2007) :

- Μαρτενσιτικοί
- Ωστενιτικοί
- Φερριτικοί / περλιτικοί
- Φερριτικοί



Σχήμα 6- 1: Εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 5.1) παρουσιάζεται ο διαχωρισμός των κατασκευαστικών χαλύβων.

Πίνακας 6- 1: Είδη κατασκευαστικών χαλύβων

Κύρια Σειρά (AISI-SAE)	Είδος Χάλυβα	Ιδιότητες Χρήσεις
2000	Νικελιούχος	Αντοχή σε κόπωση, διάβρωση. Ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές
3000	Νικελιοχρωμιούχος	Καλή εμβαπτότητα και αντοχή σε διάβρωση. Επιδέχεται επιφανειακή εκλήρυνση. Κατασκευή διωστήρων, αξόνων, κλπ.
4000	Μολυβδαινιούχος	Καλή εμβαπτότητα. Σκληρότητα, αντίσταση στη φθορά και αντοχή στον ερπυσμό. Κατασκευή τμημάτων λεβήτων, αεριοστροβίλων, κλπ.
5000	Χρωμιούχος	Καλή εμβαπτότητα. Επιδέχεται επιφανειακή σκλήρυνση. Κατασκευή

		λεπίδων, διωστήρων, ρουλεμάν, εκκέντρων, κλπ.
6000	Χρωμιοβαναδιούχος	Πολυ καλή εμβαπτότητα. Αύξηση της αντοχής σε φθορά-τριβή. Κατασκευή μαχαιριών, ψαλιδιών, λεπίδων, κλπ.
7000	Βολφραμιομολυβδαινιούχος	Πολυ καλή εμβαπτότητα. Αύξηση της αντοχής σε φθορά-τριβή. Κατασκευή στιγέων, μαχαιριών, ψαλιδιών, λεπίδων, κλπ.
8000	Νικελιοχρωμιομολυβδαινιούχος	Πολύ καλή εμβαπτότητα. Επιδέχεται επιφανειακή σκλήρυνση. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή ατράκτων, σφυρήλατων αντικειμένων, κλπ.
9000	Πυριτιούχος	Μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα. Κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών.

7. Χάλυβες υψηλής αντοχής

Οι χάλυβες υψηλής αντοχής διακρίνονται για την περιεκτικότητά τους μέχρι 3% σε μαγγάνιο, νικέλιο, μολυβδαίνιο και χρώμιο. Στο πλαίσιο αυτό οι συγκεκριμένοι χάλυβες διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες (Παντελής & Χρυσουλάκης, 2007) :

- Κατηγορία EH : Οι προδιαγραφές της είναι για κάθε χρήση, χωρίς να υπάρχουν εξαιρέσεις πάχους μέχρι 33 mm
- Κατηγορία DH : μπορεί να γίνει δεκτή για κάθε χρήση έως 51mm, εκτός από κάποια ειδικά τμήματα της κατασκευής, για τα οποία είναι επιτρεπόμενη η χρήση πάχους ως τα 27,5 mm
- Κατηγορία AH : χρησιμοποιείται τις περισσότερες φορές για πάχη που προσεγγίζουν τα 19mm για οποιαδήποτε χρήση. Για πάχη τα οποία κυμαίνονται από 19 mm έως 51

mm και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορα τμήματα του σκάφους, εκτός από το κύριο κατάστρωμα, το ζωστήρα και τον πυθμένα, αλλά και όλα εκείνα τα τμήματα, που δέχονται ισχυρή καταπόνηση

Η χρήση των χαλύβων υψηλής αντοχής άρχισε ουσιαστικά, κατά τη δεκαετία του 1940, ενώ στη δεκαετία του 1950 άρχισαν να χρησιμοποιούνται εκσυγχρονισμένοι τύποι χαλύβων, οι οποίοι είχαν πιο υψηλή αντοχή από την αντοχή των χαλύβων, που χρησιμοποιούνταν παλιότερα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα τελευταία χρόνια οι μικροματοποιημένοι χάλυβες υψηλής αντοχής. Πρόκειται για μία νέα σχετικά ομάδα χαλύβων υψηλής αντοχής, οι οποίοι ονομάζονται μικροκραματοποιημένοι χάλυβες υψηλής αντοχής. Η αντοχή των συγκεκριμένων χαλύβων μπορεί να αποδοθεί στα εξής στοιχεία (Παπάζογλου, 1990) :

- Κατάλληλες θερμικές κατεργασίες
- Καθαρές μέθοδοι παρασκευής
- Προσεκτική προσθήκη μικρών ποσοτήτων βελτιωτικών στοιχείων

Με βάση τον συνδυασμό αυτών των μεθόδων δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας της φερριτικής μικροδομής, η οποία οδηγεί τις περισσότερες φορές σε καλύτερη συγκολλησιμότητα. Στον Πίνακα 7-1 παρουσιάζεται η χημική σύσταση των χαλύβων υψηλής αντοχής.

Πίνακας 7- 1: Χημική σύσταση χαλύβων υψηλής αντοχής

Τύπος Χάλυβα	Περιεκτικότητα Μετάλλου στο κράμα (%)									
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	V
HSLA-80	< 0.07	0.4-0.7	< 0.025	< 0.4	< 0.4	0.6-0.9	0.7-1.0	0.15-0.25	1.0-1.3	-
HY-80	< 0.18	0.1-0.4	< 0.025	< 0.025	0.15-0.35	1.00-1.80	2.00-3.25	0.2-0.6	< 0.26	< 0.03
HY-100	0.12-0.2	0.1-0.4	< 0.025	< 0.025	0.15-0.35	1.00-1.80	2.25-3.5	0.20-0.60	< 0.25	< 0.03
HY-130	0.12 max	0.6-0.9	< 0.01	< 0.01	0.2-0.35	0.4-0.7	4.75-5.25	0.3-0.65	< 0.25	0.05-0.1
HTS	0.18 max	0.9-1.6	< 0.04	< 0.04	0.3-0.5	< 0.25	< 0.4	< 0.08	< 0.35	< 0.1

Ως προς τους μικροκραματωμένους χάλυβες υψηλής αντοχής, κύρια χαρακτηριστικά τους μπορούν να θεωρηθούν τα εξής (Παπάζογλου, 1990) :

- Ιδιαίτερα υψηλή συγκολλησιμότητα

- Πολύ καλή δυσθραυστότητα

- Μικρότερο ειδικό βάρος

- Εξαιρετική διαρροή

8. Εφαρμογές στη ναυπηγική

Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στον χώρο της ναυπηγικής τεχνολογίας είναι τα κράματα αλουμινίου, ο χαλκός και τα κράματα του και στη συνέχεια ο χάλυβας και οι ανοξείδωτοι χάλυβες ενώ παράλληλα χρησιμοποιούνται τα κράματα μαγνησίου, το τιτάνιο και το ουράνιο. Τα τελευταία χρόνια στον χώρο της ναυπηγικής κυριαρχεί ο χάλυβας και για τον λόγο αυτό θεωρείται απαραίτητο να παρουσιαστούν γενικότερα οι απαιτήσεις των ναυπηγικών υλικών. Ειδικότερα, οι απαιτήσεις των ναυπηγικών υλικών είναι οι εξής (Παπάζογλου, 1990) :

- Καλή συγκολλησιμότητα
- Υψηλή αντοχή σε διάβρωση
- Υψηλή αντοχή σε κόπωση
- Υψηλή δυσθραυστότητα
- Υψηλή ειδική αντοχή

Πρέπει να επισημανθεί ότι οι χάλυβες συνήθους αντοχής ή οι κοινοί χάλυβες θεωρούνται η πιο διαδεδομένη ομάδα των ναυπηγικών χαλύβων, παρουσιάζοντας ιδιότητες, οι οποίες καθορίζονται, κατά κύριο λόγο, από τη μικροδομή τους και τη χημική τους σύσταση (Παντελής & Χρυσουλάκης, 2007).

Παράλληλα, θεωρείται ότι «εκτός από άνθρακα, που περιέχεται σε ποσοστό κατά βάρος μέχρι και 0,23 %, οι χάλυβες αυτοί περιέχουν σε διάφορα ποσοστά μαγγάνιο, πυρίτιο, φώσφορο και θείο, ενώ διάφορα άλλα στοιχεία μπορεί να συνυπάρχουν σε μικρότερες ποσότητες». Επιπλέον ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους θεωρείται η εξαιρετική ποιότητα συγκολλητότητά τους. Ταυτόχρονα, χάλυβες υψηλής αντοχής συναντώνται τα τελευταία χρόνια σε ευρεία χρήση, έχοντας όριο διαρροής, που προσεγγίζει τα 350 MPa. Με τη χρήση αυτή των χαλύβων ενισχύεται η δυνατότητα περιορισμού των παχών των διαφόρων στοιχείων αντοχής και, κατά συνέπεια, και του βάρους μίας ναυπηγικής κατασκευής, εξαιτίας των υψηλότερων τιμών, που αφορούν τις επιτρεπόμενες τάσεις (Παπάζογλου, 1995).

Η πιο σημαντική διαφορά τους σε σχέση με τους συνήθεις χάλυβες αφορά ουσιαστικά την προσθήκη ειδικών στοιχείων, όπως είναι το βανάδιο, το νιόβιο και το αλουμίνιο, τα οποία μπορούν να βελτιώσουν τις μηχανικές τους ιδιότητες. Σε ειδικές κατασκευές, επίσης, μπορεί να πραγματοποιηθεί η χρήση διαφόρων μικροκραματοποιημένων χαλύβων υψηλής αντοχής, που παρουσιάζουν όρια διαρροής από 415 MPa έως 690 MPa. Για να επιτευχθούν οι υψηλές αυτές αντοχές, οι χάλυβες αυτοί εμπεριέχουν τις περισσότερες εξειδικευμένες προσμίξεις, ταυτόχρονα μπορούν να υποστούν ειδικές θερμικές κατεργασίες, με σημαντικότερες τη βαφή και την επαναφορά (Μαγκανάρης, 2000).

Ως προς τη μικροδομή των ναυπηγικών χαλύβων, υποστηρίζεται ότι συνίσταται σε αιωρήματα σεμεντίτη, τα οποία διασκορπώνται σε φερριτική μήτρα. Όταν η θερμοκρασία ενός χάλυβα προσεγγίσει ουσιαστικά τη θερμοκρασία αλλοτροπικού μετασχηματισμού του, στην περίπτωση ο σίδηρος που θα εντοπιζόταν στη φερριτική φάση μπορεί να μετασχηματισθεί στην ωστενιτική φάση, στην οποία ο σεμεντίτης παρουσιάζει μεγάλη διαλυτότητα. Όταν ψύχεται ο χάλυβας κάτω από τη θερμοκρασία μετασχηματισμού, τότε ο ωστενίτης με τον διαλελυμένο σεμεντίτη μπορεί να επανέλθει στην προηγούμενη κατάσταση, στην οποία έχουμε την παρουσία φερρίτη με αιωρήματα σεμεντίτη. Η μικροδομή του χάλυβα που αποτελείται από στρώσεις φερρίτη και σεμεντίτη ονομάζεται περλίτης, ενώ παράλληλα αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά συστατικά των ναυπηγικών χαλύβων (Μαγκανάρης, 2000).

Σε γενικές γραμμές υποστηρίζεται ότι το ποσοστό του άνθρακα και παράλληλα ο ρυθμός απόψυξης ασκούν σημαντική επιρροή στη μικροδομή, με βάση την οποία καθορίζεται η σκληρότητα και η αντοχή του χάλυβα. Τις περισσότερες φορές οι ναυπηγικοί χάλυβες αποψύχονται στον αέρα, μετά την εξέλαση, η οποία παρατηρείται εν θερμώ αλλά και μετά από οποιαδήποτε άλλη διαδικασία θερμικής κατεργασίας τους (Σπυρέλλης, 1997).

Υπάρχουν περιπτώσεις, όμως, που οι ναυπηγικοί χάλυβες υψηλής αντοχής που παρουσιάζουν όριο διαρροής πάνω από 350 MPa μπορούν να υποστούν βαφή σε νερό από θερμοκρασία, η οποία είναι πιο υψηλή σε σχέση με εκείνη του μετασχηματισμού, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί επαναφορά με θέρμανση σε θερμοκρασία, η οποία είναι πιο χαμηλή σε σχέση με εκείνη του μετασχηματισμού. Η θερμική αυτή κατεργασία μπορεί να οδηγήσει σε ειδική μικροδομή, η οποία ονομάζεται επαναφερμένος μαρτενσίτης, παρουσιάζοντας ως

κύρια χαρακτηριστικά τις υψηλές τιμές αντοχής και παράλληλα δυσθραυστότητας (Σπυρέλλης, 1997).

Παράλληλα, οι μέθοδοι με τις οποίες παρασκευάζονται οι ναυπηγικοί χάλυβες είναι οι εξής :

- Ηλεκτρική κάμινος
- Βασική οξυγόνου
- Ανοικτή φλογοκαμίνου

Εκτός, όμως, από τις τρεις αυτές μεθόδους, υπάρχουν και κάποιες νεότερες, οι οποίες χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια για την Παρασκευή ναυπηγικών χαλύβων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διαδικασία αποξείδωσης, με βάση την οποία διακρίνονται οι παρακάτω κατηγορίες ναυπηγικού χάλυβα (Παπάζογλου, 1995):

- Ο ημικαθυσχησμένος χάλυβας (killed steel) ο οποίος είναι τελείως αποξείδωμένος και του οποίου η ομοιογενής μεταλλουργική δομή τον καθιστά κατάλληλο για παχιά ελάσματα. Η αποξείδωση επιτυγχάνεται με την προσθήκη στοιχείων όπως το πυρίτιο ή το αλουμίνιο.
- Ο περιθωριακός χάλυβας (rimmed steel) , ο οποίος είναι ελάχιστα αποξείδωμένος και ο οποίος παράγεται συνήθως σε πάχη μέχρι 12,5 mm. Η χρήση του στη ναυπηγική είναι περιορισμένη σε δευτερεύουσες κατασκευές.
- Ο πλήρως καθησυχασμένος χάλυβας (semikilled steel) , στον οποίο προστίθεται μικρότερη ποσότητα αποξείδωμένου στοιχείου σε σύγκριση με τον πλήρως καθησυχασμένο. Είναι καλύτερης ποιότητας από τον περιθωριακό. Λόγω του χαμηλότερου κόστους του, εν σχέσει με τον καθησυχασμένο, αποτελεί την ποιότητα των συνήθων ναυπηγικών χαλύβων.

Όπως επισημαίνεται, οι «περισσότεροι ναυπηγικοί χάλυβες συνήθους αντοχής προσφέρονται στο εμπόριο αμέσως μετά την εν θερμώ εξέλασή τους. Όπου, όμως, απαιτείται χάλυβας υψηλής δυσθραυστότητας προδιαγράφεται συνήθως και η θερμική κατεργασία της εξομάλυνσης». Παράλληλα θεωρείται δυνατή η απαίτηση λεπτόκοκκου χάλυβα, η οποία μπορεί να ικανοποιηθεί με την προσθήκη ποσοτήτων στοιχείων, όπως βανάδιο, νιόβιο και

αλουμίνιο. Σε γενικές γραμμές η συνύπαρξη λεπτών κόκκων, πλήρους καθυσύχασης και παράλληλα εξομάλυνσης δημιουργεί τις προϋποθέσεις για την παρασκευή χάλυβα πολύ υψηλής ποιότητας. Οι ναυπηγικοί χάλυβες, με βάση την τάση διαρροής διακρίνονται στις εξής κατηγορίες (Munger, 1997) :

- Χάλυβες υψηλής αντοχής ($\sigma_y > 300 \text{ MPa}$)
- Κοινοί χάλυβες ($200 \text{ MPa} < \sigma_y < 300 \text{ MPa}$)

Οι ναυπηγικοί χάλυβες περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό 0.16-0.23% και άλλα στοιχεία σε μικρότερες ποσότητες, όπως μαγγάνιο, πυρίτιο, φώσφορο, θείο και αλουμίνιο. Οι νηογνώμονες προδιαγράφουν τα ανώτατα αποδεκτά όρια για την περιεκτικότητα των στοιχείων αυτών όπως φαίνονται στους πίνακες 8-1 έως 8-3.

Πίνακας 8- 1: Τάσεις διαρροής κοινών χαλύβων (N/mm^2)

Νηογνώμονας	Κατηγορία Χάλυβα					
	A	B	D	E	CS	DS
ABS	235	235	235	235	235	235
BV		Ορίζεται μόνο η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό.				
DNV	235	235	235	235	-	-
LRS	235	235	235	235	-	-

Στον Πίνακα 8-2 παρουσιάζονται οι τάσεις διαρροής χαλύβων υψηλής αντοχής (N/mm^2)

Πίνακας 8- 2: Τάσεις διαρροής χαλύβων υψηλής αντοχής (N/mm^2)

Νηογνώμονας	Κατηγορία Χάλυβα					
	AH32	AH36	DH32	DH36	EH32	EH36
ABS	314	353	314	353	314	353
BV	314	-	314	-	314	-
DNV	314	355	315	355	315	355
LRS	315	355	315	355	315	355

Παράλληλα, στον Πίνακα 8-3 παρουσιάζονται στοιχεία που αφορούν τις χημικές ιδιότητες των ναυπηγικών χαλύβων.

Πίνακας 8- 3: Χημικές ιδιότητες ναυπηγικών χαλύβων

Κατηγορία Χάλυβα	Ποσοστιαίες περιεκτικότητες (μέγιστες τιμές)					
	C	Mn	Si	S	P	Al
A	0.23	2.5xC	0.5	0.04	0.04	-
D	0.21	0.7-1.5	0.1-0.5	0.04	0.04	0.015
E	0.18	0.7-1.5	0.1-0.5	0.04	0.04	0.015
AH32	0.18	0.9-1.6	0.5	0.04	0.04	0.015
AH36	0.18	0.9-1.6	0.5	0.04	0.04	0.015
EH36	0.18	0.9-1.6	0.1-0.5	0.04	0.04	-

Αντίστοιχα, οι μηχανικές ιδιότητες των ναυπηγικών χαλύβων είναι παρουσιάζονται στον Πίνακα 8-4.

Πίνακας 8- 4: Μηχανικές ιδιότητες ναυπηγικών χαλύβων

Κατηγορία Χάλυβα	Μηχανικές Ιδιότητες	
	Ultimate Tensile Strength (UTS), MPa	Charpy
A	395-480	-
D	395-480	4.8/0 °C
E	395-480	2.8/-40 °C
AH32	435-575	2.8/0 °C
AH36	480-605	3.5/0 °C
EH36	480-605	3.5/-40 °C

Σε αρκετές περιπτώσεις στον χώρο της ναυπηγικής χρησιμοποιείται ο χάλυβας AH36, ο οποίος διαφοροποιείται από τον κοινό χάλυβα στα εξής σημεία (Αλεξόπουλος, 2013):

- Παρόμοια αντοχή σε διάβρωση
- Εξίσου καλή συγκολλησιμότητα
- Υψηλότερη αντοχή
- Μεγαλύτερη σκληρότητα
- Χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα

9. Γενικές αρχές διάβρωσης χαλύβων

Το φαινόμενο της διάβρωσης παρουσιάζεται από παλιά και θεωρείται ότι επηρεάζει την ποιότητα της καθημερινής ζωής του ανθρώπου και παράλληλα την τεχνολογική πρόοδο της σύγχρονης κοινωνίας. Πρόκειται ουσιαστικά για μία φυσική διαδικασία, η οποία τείνει προς τη χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση, όπως ακριβώς το νερό ρέει από την υψηλότερη προς την χαμηλότερη στάθμη. Όπως επισημαίνεται η συμπεριφορά των διαφόρων υλικών στο φαινόμενο της διάβρωσης καθορίζεται από το περιβάλλον, στο οποίο βρίσκονται, ενώ παράλληλα η διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος καθορίζεται από τα υλικά που παρουσιάζονται στο συγκεκριμένο περιβάλλον. Εμφανής είναι ουσιαστικά η σχέση αλληλεξάρτησης ανάμεσα στο περιβάλλον και ταυτόχρονα στα υλικά, που διαβρώνονται.

Σε γενικές γραμμές, η διάβρωση αφορά «κάθε αυθόρμητη ηλεκτροχημική ή χημική αλλοίωση της επιφάνειας των μετάλλων ή κραμάτων, η οποία οδηγεί σε απώλεια υλικού. Η διάβρωση οφείλεται στις ηλεκτροχημικές ή χημικές αντιδράσεις του μετάλλου ή του κράματος με το περιβάλλον στο οποίο πρόκειται να λειτουργήσει»⁴. Το περιβάλλον αυτό μπορεί να είναι φυσικό ή σε αρκετές περιπτώσεις και τεχνητό. Επίσης, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν αφύσικοι και φυσικοί συνδυασμοί του περιβάλλοντος και των υλικών ως προς τη διάβρωση, οι οποίοι δεν έχουν δαπανηρά ή καταστροφικά αποτελέσματα. Παραδείγματα αυτού του συνδυασμού μπορούν να θεωρηθούν τα εξής (Παντέλης, 2006):

- νικέλιο σε καυστικό περιβάλλον
- αλουμίνιο εκτεθειμένο στον ατμοσφαιρικό αέρα
- μόλυβδος στο νερό

Πολλές χώρες όπως οι Η.Π.Α, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ιαπωνία, η Αυστραλία, η Γερμανία, η Φιλανδία, η Σουηδία, η Κίνα και η Ινδία έχουν ασχοληθεί με έρευνες που σχετίζονται με το κόστος της διάβρωσης. Το πιο σύνηθες συμπέρασμα που προκύπτει μέσω αυτών των ερευνών είναι ότι το ετήσιο κόστος διάβρωσης κυμαίνεται στο 1-5% του εθνικού ακαθάριστου προϊόντος της κάθε χώρας

⁴ http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/METAL_KATASK/me4_2t.htm

Τα πιο σημαντικά αποτελέσματα της διάβρωσης μπορούν να θεωρηθούν τα εξής (Σαριδάκης, 2011):

- λειτουργικά έξοδα και προβλήματα συντήρησης: εξοικονόμηση πόρων μπορεί να επιτευχθεί σε πολλά είδη εργοστασίων χρησιμοποιώντας υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση για την κατασκευή τους. Γενικά, οι προληπτικές δράσεις είναι απαραίτητες και οδηγούν στην εξοικονόμηση μεγάλων ποσών. Οι σχεδιαστές και οι μηχανικοί που ασχολούνται με θέματα διάβρωσης οφείλουν να συνεργάζονται σε αυτόν τον τομέα ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο αποτέλεσμα.
- αλλαγή εξωτερικής εμφάνισης: τα αυτοκίνητα βιάφονται γιατί οι σκουριασμένες επιφάνειες δεν είναι ευχάριστες στα μάτια κανενός. Σε πολλά αγροτικά και αστικά περιβάλλοντα, θα ήταν φτηνότερο σε μια κατασκευή να χρησιμοποιήσουμε παχύτερο έλασμα από το να εφαρμόσουμε και να συντηρούμε προστατευτικά επιστρώματα. Όμως κάτι τέτοιο θα ήταν αντιαισθητικό και θα οδηγούσε σε υποβάθμιση της ποιότητας ζωής.
- επιπτώσεις στη δημόσια ασφάλεια και αξιοπιστία: τα προϊόντα της διάβρωσης μπορούν να κάνουν δύσκολη τη διατήρηση του εξοπλισμού επεξεργασίας και παροχής ποσίμου νερού σε συγκεκριμένα αποδεκτά επίπεδα υγιεινής. Επιπλέον, η διάβρωση του χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφές τμημάτων δρόμων ταχείας κυκλοφορίας και κτιρίων, κατάρρευση ηλεκτρικών πύργων, γεφυρών κλπ. με άμεση επίδραση στη δημόσια ασφάλεια και στην οικονομία της περιοχής αφού η επιδιόρθωση των κατεστραμμένων κατασκευών είναι πολυδάπανη. Ξαφνικές αστοχίες λόγω διάβρωσης 41 μπορεί να προκαλέσουν και εκρήξεις, φωτιές, απελευθέρωση τοξικών ουσιών στο περιβάλλον πέραν των καταρρεύσεων. Τέλος, η διάβρωση κατέχει προεξέχοντα ρόλο και στον τομέα της ιατρικής όπου χρησιμοποιούνται μέταλλα για δημιουργία βαλβίδων καρδιάς, συνδέσμων κλπ. Γενικά, η οικονομία στα υλικά κατασκευής δεν είναι επιθυμητή εάν αυξάνει ανεπιθύμητα ο κίνδυνος όσον αφορά την ασφάλεια.
- επιπτώσεις στα αποθέματα φυσικών πόρων: η διάβρωση προκαλεί ελάττωση των φυσικών πόρων, μετάλλων και καυσίμου, ώστε να παρασκευαστούν τα προϊόντα εκ νέου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι περίπου πέντε τόνοι σιδήρου το δευτερόλεπτο

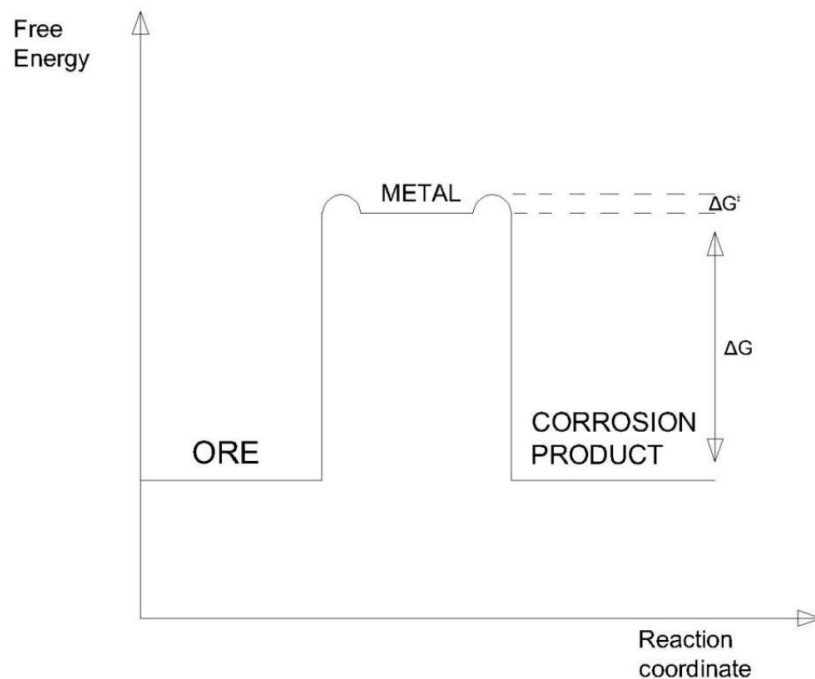
καταστρέφονται λόγω διάβρωσης. Επίσης, έχει αντίκτυπο και στην υγεία λόγω μόλυνσης του περιβάλλοντος με την διαρροή διαφόρων προϊόντων (π.χ. πετρέλαιο) από διαβρωμένο εξοπλισμό (π.χ. αγωγό μεταφοράς) ή λόγω διάβρωσης του ίδιου του προϊόντος.

- προσβολή προϊόντων: πολύ συχνά η τιμή πώλησης ενός προϊόντος σχετίζεται με την καθαρότητά του από προσμίξεις και την ποιότητά του. Η αποφυγή μόλυνσης των προϊόντων στην παραγωγή τροφίμων, φαρμάκων, πλαστικών και βαφών είναι δεδομένη. Είναι δυνατό μια μικρή ποσότητα μεταλλικών ιόντων να οδηγήσει σε επιτάχυνση της αποσύνθεσης του προϊόντος.
- διακοπή λειτουργίας μονάδων παραγωγής: ο περιοδικός έλεγχος μια εργοστασιακής μονάδας παραγωγής είναι επιβληθτική στην αποφυγή αστοχιών λόγω διάβρωσης που θα μπορούσαν να οδηγήσουν στη διακοπή της παραγωγικής διαδικασίας.

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επιδρούν στο φαινόμενο της διάβρωσης είναι οι εξής :

- τα διαφεύγοντα ρεύματα
- οι μηχανικές ανωμαλίες την επιφάνεια των μεταλλικών κατασκευών
- οι μηχανικές τάσεις
- η τιμή του pH
- η τριεπιφάνεια
- η θερμοκρασία
- η παρουσία υγρασίας στην ατμοσφαιρική διάβρωση

Σε αρκετές περιπτώσεις επισημαίνεται ότι αυτό που διαφοροποιεί ουσιαστικά τα διαβρωμένα μέταλλα από τα καθαρά μέταλλα είναι το ποσό της ελεύθερης ενέργειας, η οποία έχει επιλεχτεί να συμβολίζεται με ΔG .



Σχήμα 9- 1: Ελεύθερη ενέργεια μετάλλου, ορυκτού και προϊόντων διάβρωσης

Η διαφορά στην ελεύθερη ενέργεια ανάμεσα στα προϊόντα της διάβρωσης και στα μέταλλα αφορά την τάση διάβρωσής των μετάλλων, χωρίς να δίνονται πληροφορίες για τον ρυθμό της διάβρωσης. Επίσης, το ποσό ΔG^+ αποτελεί την επιπλέον ενέργεια, η οποία είναι απαραίτητη, προκειμένου να ξεκινήσει η αντίδραση της διάβρωσης, ενώ το ποσό αυτό ονομάζεται ελεύθερη ενέργεια ενεργοποίησης (Σαριδάκης, 2011).

Για παράδειγμα σίδηρος εντός λουτρού το οποίο περιέχει κατιόντα χαλκού, θα οδηγήσει στις εξής αντιδράσεις:



Ο βασικός κανόνας της διάβρωσης επιβάλλει ότι το ηλεκτραρνητικότερο διαβρώνεται (οξειδώνεται) και το ηλεκτροθετικότερο προστατεύεται (ανάγεται). Στην περίπτωση μας ο σίδηρος ($E_0(\text{V})=-0.441$) είναι πιο ηλεκτροαρνητικός από ότι ο χαλκός ($E_0(\text{V})=+0.52$).

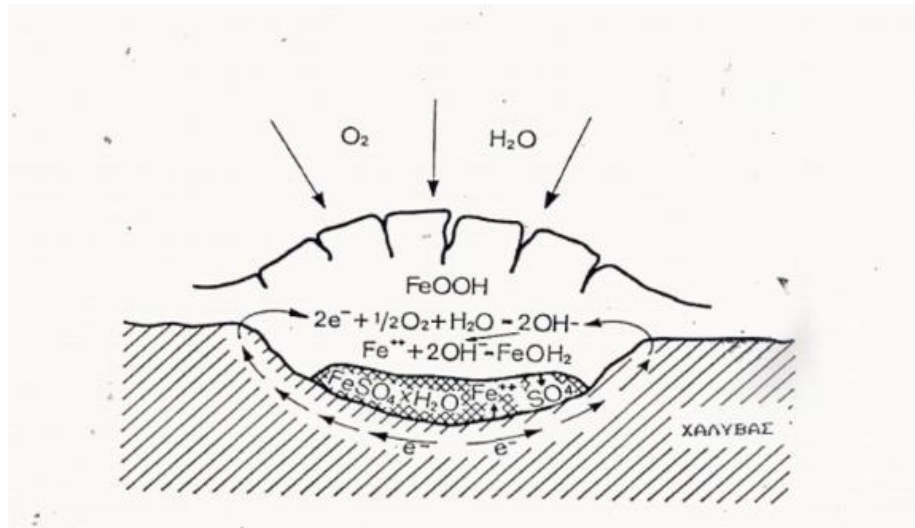
Στον Πίνακα 9-1 παρουσιάζονται στοιχεία, που αφορούν τα πρότυπα ηλεκτροδιακά δυναμικά. Όσο πιο πάνω στη λίστα είναι ένα στοιχείο, τόσο πιο ηλεκτροαρνητικό είναι.

Πίνακας 9- 1: Πρότυπα ηλεκτροδιακά δυναμικά (στους 25 °C, πίεση 1 Atm και διάλυμα ενεργότητας 1)

Ημιαντιόραση	Εο (V)
$K^+ + e^- \rightarrow K$	-2,9241
$Ca^{2+} + 2e^- \rightarrow Ca$	-2,7630
$Na^+ + e^- \rightarrow Na$	-2,7614
$Mg^{2+} + 2e^- \rightarrow Mg$	-1,866
$Al^{3+} + 3e^- \rightarrow Al$	-1,69
$Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn$	-0,76
$Fe^{2+} + 2e^- \rightarrow Fe$	-0,441
$Cd^{2+} + 2e^- \rightarrow Cd$	-0,4021
$Ni^{2+} + 2e^- \rightarrow Ni$	-0,236
$Sn^{2+} + 2e^- \rightarrow Sn$	-0,1406
$Pb^{2+} + 2e^- \rightarrow Pb$	-0,1264
$H^+ + e^- \rightarrow H_2$	0,000
$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$	+0,3441
$Co^{3+} + 3e^- \rightarrow Co$	+0,40
$S^{2-} + 2e^- \rightarrow S$	+0,48
$Cu^+ + e^- \rightarrow Cu$	+0,52
$Ag^+ + e^- \rightarrow Ag$	+0,7990
$Pt^{2+} + 2e^- \rightarrow Pt$	+1,20
$Au^{3+} + 3e^- \rightarrow Au$	+1,36

Σημαντική μπορεί να θεωρηθεί παράλληλα η κινητική μελέτη του φαινομένου της διάβρωσης, η οποία μπορεί να αποκαλύψει το μικροσκοπικό μηχανισμό της δράσης και σε γενικές γραμμές το βραδύτερο στάδιο, κατά τη διάρκεια του οποίου επιβάλλεται, όχι μόνο η ταχύτητά τους αλλά παράλληλα και οι συνθήκες πραγματοποίησής τους στο ευρύτερο φαινόμενο. Αποκαλύπτοντας ταυτόχρονα τις μακροσκοπικές και μικροσκοπικές συνθήκες, που ασκούν επιρροή στην ταχύτητα του φαινομένου, μπορεί να επιτευχθεί η επιβράδυνση του φαινομένου (Μανδήτσιοι, 2012).

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η μορφή της ατμοσφαιρικής διάβρωσης του χάλυβα κάτω από ήδη σχηματισμένη σκουριά



Σχήμα 9- 2: Ατμοσφαιρική διάβρωση του χάλυβα κάτω από ήδη σχηματισμένη σκουριά

Για τις μορφές διάβρωσης του χάλυβα ενδεικτική είναι η μελέτη, η οποία παραγματοποιήθηκε το 2009 στη Ρουμανία, με θέμα τη μελέτη των συμπεριφορών σε Διάβρωση Επιψευδαργυρωμένων Δοκιμίων Χάλυβα Παρουσία κόκκων TiO_2 στο Επίστρωμα. Με βάση τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας παρουσιάζεται η άσκηση επιρροής των νανοσωματιδίων της τιτανίας στη μορφολογία του επιστρώματος, κάνοντάς το πιο λεπτόκοκκο καθώς η παρουσία της τιτανίας επιβραδύνει την αύξηση του μεγέθους των κόκκων-κρυστάλλων (19,89nm για Zn-5g/L TiO_2 , 19,14nm για Zn-10g/L TiO_2 , 20,35nm χωρίς TiO_2)» (Αλεξόπουλος, 2013). Κύριος παράγοντας άσκησης επιρροής στη μορφολογία της επιφάνειας μπορεί να θεωρηθεί η συγκέντρωση της TiO_2 και όχι ο τύπος της τιτανίας, αλλά η συγκέντρωση της TiO_2 . Επίσης, παρουσιάστηκε ότι «μελέτη της διάβρωσης μέσω open-circuit, καμπυλών πόλωσης και της μεθόδου impedance, έδειξε πως τα επιψευδαργυρωμένα δοκίμια με εναπόθεση TiO_2 στο επίστρωμα παρουσιάζουν καλύτερη αντιδιαβρωτική συμπεριφορά» (Αλεξόπουλος, 2013).

Ενδεικτική είναι παράλληλα η έρευνα, που πραγματοποιήθηκε το 2010 με θέμα τις σύνθετες επικαλύψεις Zn-ZrO₂ Δοκιμίων Χάλυβα. Με βάση την έρευνα αυτή επισημάνθηκε ότι «οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα του SEM και της μεθόδου EDX έδειξαν πως το μέγεθος των κόκκων της ζirkονίας ZrO₂ κινήθηκε στα 30-35 nm.

Οι κόκκοι παρουσίασαν σε ορισμένες περιοχές της επιφάνειας συσσωμάτωση. Αυτό αιτιολογείται από την υψηλή επιφανειακή ενέργεια των σωματιδίων» (Αλεξόπουλος, 2013). Με τις έρευνας αυτές, λοιπόν, διαφαίνεται το έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον που έχει

Πτυχιακή Εργασία – Ιωάννης Τσάλλας, Βασίλειος Χάλαρης
Τμήμα Μηχανολόγίας

αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια για το φαινόμενο της διάβρωσης , αναδεικνύοντας την ιδιαίτερη σημασία της.

10. Κάμψη τριών σημείων

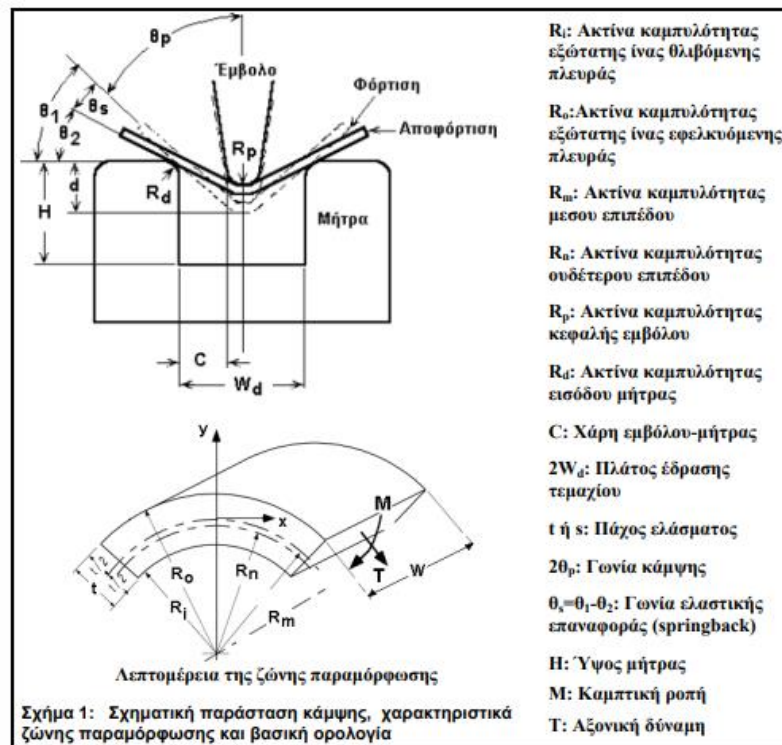
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών, οι οποίες προσδιορίζουν σε αριθμητικό επίπεδο την αντίσταση που παρατηρείται στη δράση εξωτερικών δυνάμεων, που επιδιώκουν να τα παραμορφώσουν και πιο συγκεκριμένα να μεταβάλουν το σχήμα και παράλληλα τις διαστάσεις τους. Ως προς τα δομικά υλικά, οι μηχανικές τους ιδιότητες θεωρούνται πιο σπουδαίες, επειδή τα διάφορα τμήματα είναι υποχρεωμένα στις διάφορες κατασκευές να αντέχουν σε εξωτερικά φορτία (Αγόρος, 2012).

Στο πλαίσιο αυτό σε αρκετές περιπτώσεις το ενδιαφέρον εστιάζεται στην καταπόνηση, η οποία αναφέρεται στην ένταση των δυνάμεων, που αναπτύσσουν τα υλικά στη μονάδα επιφάνειας. Η καταπόνηση μπορεί να διακριθεί σε (Beer & Johnston, 1999):

- i. κάμψη
- ii. διάτμηση
- iii. θλίψη
- iv. εφελκυσμό

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα αναλυθεί το φαινόμενο της κάμψης τριών σημείων, το οποίο θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικό. Κάμψη αποτελεί μία ομοιόμορφη μόνιμη παραμόρφωση υλικού, η οποία μπορεί να παρουσιαστεί με τη μορφή ταινίας ή ελάσματος, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται με την περιστροφή ενός τμήματος του γύρω από έναν ευθύγραμμο άξονα. Ο συγκεκριμένος άξονας εντοπίζεται στο ουδέτερο επίπεδο της διατομής του και, επίσης, παρουσιάζεται κάθετος σ' αυτή. Σε γενικές γραμμές, η μηχανική δοκιμή της καθαρής κάμψης αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές μηχανικές δοκιμές, που μπορούν να πραγματοποιηθούν σε μεταλλικά, αλλά και σε μη μεταλλικά υλικά (Beer & Johnston, 1999).

Η κάμψη αποτελεί την πιο απλή κατεργασία διαμόρφωσης του επιπέδου ελάσματος, επιδεικνύοντας μεγάλη πρακτική εφαρμογή. Στο πλαίσιο αυτό υποστηρίζεται ότι με τον κατάλληλο συνδυασμό και παράλληλα την επανάληψη καμπτικών παραμορφώσεων στο τεμάχιο, μπορούν να ληφθούν ποικίλες διατομές, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευρέως στον βιομηχανικό τομέα (Αγόρος, 2012)..



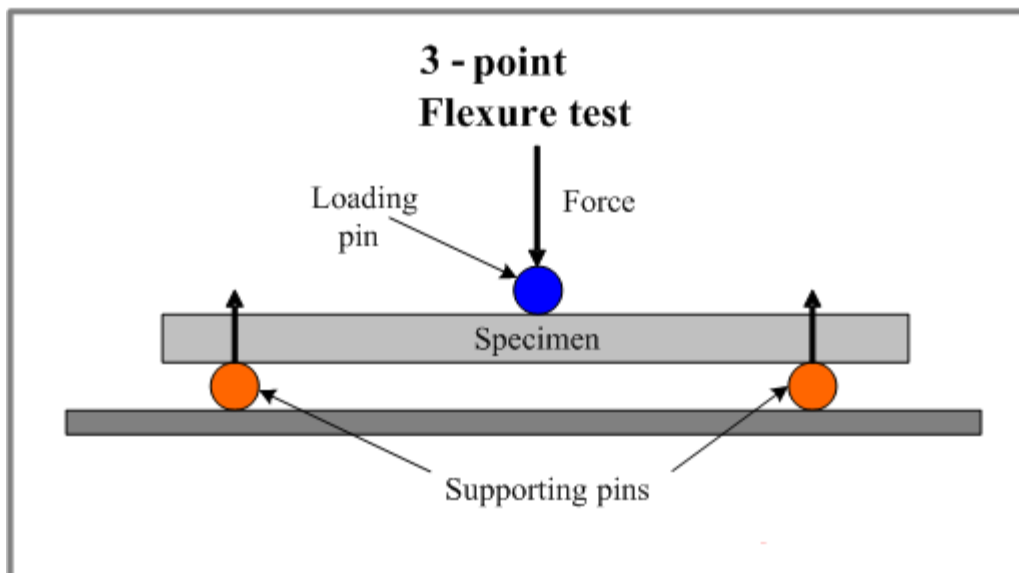
Σχήμα 10- 1: Σχηματική παράσταση – χαρακτηριστικά ζώνης παραμόρφωσης – βασική ορολογία κάμψης

Παράλληλα, η αντοχή σε κάμψη αναφέρεται στη μέγιστη εφελκυστική τάση, η οποία μπορεί να υπολογιστεί σε δοκίμιο υπό κάμψη. Στο πλαίσιο αυτό μπορεί να υποθεθεί γραμμική κατανομή των τάσεων ως προς τις ύψος της διατομής, κατά τη διάρκεια της θραύσης του δοκιμίου. Κύριο χαρακτηριστικό της κάμψης αποτελεί η καμπύλη μορφή, που παίρνει ο αρχικά ευθύγραμμος, όπως για παράδειγμα ο άξονας του φορέα, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ταυτόχρονα εφελκυσμού και θλίψης στις ανώτερες και κατώτερες ίνες του φορέα. Επιπλέον, έχουμε το βέλος κάμψης, που αποτελεί τη μέγιστη βύθιση του φορέα. Παραδείγματα κάμψης παρατηρούνται στους μοχλούς, στα δόντια των οδοντωτών τροχών, στους προβόλους και σε αρκετές περιπτώσεις στα δοκάρια (Γιαννακόπουλος, 2012).

Κατά τη διάρκεια της κάμψης, μπορούν να παρατηρηθούν τα εξής (Αγόρος, 2012) :

- ανάπτυξη θλιπτικής εντατικής κατάστασης στη φορτιζόμενη περιοχή του δοκιμίου
- ανάπτυξη εφελκυστικής εντατικής κατάστασης στην αφόρτιστη περιοχή του δοκιμίου
- απουσία μεταβολών στο διαμήκη ουδέτερο άξονα του δοκιμίου
- η εφελκυστική περιοχή θεωρείται η πιο επικίνδυνη περιοχή

Στο Σχήμα 10-2 παρουσιάζεται, η «δοκιμή της κάμψης τριών σημείων (3 point bending test), κατά την οποία η δοκός στηρίζεται αμφιέρειστα ή ως αμφιπροέχουσα και φέρει στο μέσον της σημειακό φορτίο P » (Γιαννακόπουλος, 2012).



Σχήμα 10- 2: Σχηματική αναπαράσταση κάμψης 3 σημείων

Η κάμψη αποτελεί μία ιδιαίτερα δημοφιλή μηχανική δοκιμή, επειδή :

- η διάταξη της δοκιμής μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί
- η γεωμετρία του δοκιμίου θεωρείται η απλούστερη δυνατή



Σχήμα 10- 3: Εξοπλισμός για δοκιμή 3 σημείων

11. Πειραματικό Μέρος

Μετά από συνεννόηση με το γραφείο μελετών του Πολεμικού Ναυτικού (Ναύσταθμος Σαλαμίνας), παραλήφθηκαν 2 μεγάλα τεμάχια χάλυβα S275NL και S355NL τα οποία κόπηκαν στο ελασματοουργείο του ναυστάθμου. Στη συνέχεια τα τεμάχια αυτά κοπήκαν με παντογράφο σε επιμέρους δοκίμια, σε εξωτερικό μηχανουργείο για τη σωστή διενέργεια των πειραμάτων κάμψης 3 σημείων στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Τμήματος Μηχανολογίας, Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Κάθε χαλύβδινο δοκίμιο κατηγοριοποιήθηκε σε as received, διαβρωμένο για 1 μήνα ή και διαβρωμένο για 2 μήνες.

Για την επίτευξη της διάβρωσης χρησιμοποιήθηκε ένα δοχείο με νερό και αλάτι (NaCl). Δέκα λίτρα νερό αναμείχθηκαν με 500 g NaCl για τον σχηματισμό υδατικού διαλύματος συγκεντρώσεως 0.855M όπως υπολογίστηκε από την παρακάτω εξίσωση.

$$C = \frac{m_{NaCl}}{V \cdot MW_{NaCl}} = \frac{500g}{10l \cdot 58.44 g/mol} = 0.855 M$$

Πραγματοποιήθηκε ανάδευση του υδατικού διαλύματος για περίπου 1 λεπτό για την πλήρη ομογενοποίησή του. Στους πίνακες 11-1 και 11-2 παρουσιάζεται η αρίθμηση κάθε δοκιμίου, η κατάσταση διάβρωσής του, οι διαστάσεις του, καθώς επίσης και η ταχύτητα της κεφαλής η οποία ασκεί το φορτίο στο δοκίμιο.

Πίνακας 11- 1: Πληροφορίες δοκιμίων για τον χάλυβα S275NL

S275NL	a (cm)	b (cm)	Ταχύτητα Φόρτισης (mm/min)
1 (as received)	1	1	4
2 (as received)	1	1	2
5 (1 month)	1	1	4
6 (1 month)	1	1	4
11 (1 month)	1	1	2
12 (1 month)	1	1	1
13 (as received)	1	1	1
15 (2 months)	1	1.05	4
16 (2 months)	1	1.05	2
17 (2 months)	1	1	2
18 (2 months)	1	1	1
20 (2 months)	1	1	4

Πίνακας 11- 2: Πληροφορίες δοκιμίων για τον χάλυβα S355NL

S355NL	a (cm)	b (cm)	Ταχύτητα Φόρτισης (mm/min)
2 (as received)	1.2	1.2	2
7 (1 month)	1.2	1.2	1
9 (1 month)	1.2	1.2	4
12 (1 month)	1.2	1.2	2
13 (as received)	1.2	1.2	1
30 (2 month)	1.2	1.25	4
32 (2 month)	1.25	1.25	4
33 (2 month)	1.2	1.3	2
34 (2 month)	1.2	1.2	2
35 (2 month)	1.3	1.3	1
36 (2 month)	1.2	1.3	1
37 (as received)	1.2	1.2	4

Στους πίνακες 11-3 έως 11-6 παρουσιάζονται όλες οι προδιαγραφές των χαλύβων όπως λήφθηκαν από το Ευρωπαϊκό Standard EN10027-1.

Πίνακας 11- 3: Chemical composition of the ladle analysis for normalized steel

Designation		C % max.	Si % max.	Mn %	P % max. _a	S % max. _{a,b}	Nb % max.	V % max.	Al _{total} % min. _c	Ti % max.	Cr % max.	Ni % max.	Mo % max.	Cu % max. _d	N % max.
According EN 10027-1 and CR 10260	According EN 10027-2														
S275N	1.0490	0,20	0,45	0,45 - 1,60	0,035	0,030	0,06	0,07	0,015	0,06	0,35	0,35	0,13	0,60	0,017
S275NL	1.0491	0,18			0,030	0,025									
S355N	1.0545	0,22	0,55	0,85 - 1,75	0,035	0,030	0,06	0,14	0,015	0,06	0,35	0,55	0,13	0,60	0,017
S355NL	1.0546	0,20			0,030	0,025									
S420N	1.8902	0,22	0,65	0,95 - 1,80	0,035	0,030	0,06	0,22	0,015	0,06	0,35	0,85	0,13	0,60	0,027
S420NL	1.8912				0,030	0,025									
S460N ^e	1.8901 ^e	0,22	0,65	0,95 - 1,80	0,035	0,030	0,06	0,22	0,015	0,06	0,35	0,85	0,13	0,60	0,027
S460NL ^e	1.8903 ^e				0,030	0,025									

^a For long products the P and S content can be 0,005 % higher.
^b For railway applications a maximum S content of 0,012 % may be agreed at the time of enquiry and order.
 See option 32.
^c If sufficient other N-binding elements are present the minimum total Al content does not apply.
^d Cu content above 0,45 % may cause hot shortness during hot forming.
^e V + Nb + Ti ≤ 0,26 % and Mo + Cr ≤ 0,38 %.

Πίνακας 11- 4: Maximum CEV based on the ladle analysis for normalized steel

Designation		Maximum CEV in % for nominal product thickness in mm		
According EN 10027-1 and CR 10260	According EN 10027-2	≤ 63	> 63 ≤ 100	> 100 ≤ 250
		S275N ^a S275NL ^a	1.0490 ^a 1.0491 ^a	0,40
S355N ^a S355NL ^a	1.0545 ^a 1.0546 ^a	0,43	0,45	0,45
S420N S420NL	1.8902 1.8912	0,48	0,50	0,52
S460N S460NL	1.8901 1.8903	0,53	0,54	0,55

^a For the optional increase of elements which influence the CEV see 7.4.3.

Πίνακας 11- 5: Mechanical properties at ambient temperature for normalized steel

Designation		Minimum yield strength R_{eH} ^a MPa ^b								Tensile strength R_m ^a MPa ^b			Minimum percentage elongation after fracture ^a %					
According EN 10027-1 and CR 10260	According EN 10027-2	Nominal thickness mm								Nominal thickness mm			$L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$ Nominal thickness mm					
		≤ 16	>16 ≤ 40	>40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250	≤ 100	> 100 ≤ 200	> 200 ≤ 250	≤ 16	>16 ≤ 40	>40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 200	> 200 ≤ 250
S275N S275NL	1.0490 1.0491	275	265	255	245	235	225	215	205	370 to 510	350 to 480	350 to 480	24	24	24	23	23	23
S355N S355NL	1.0545 1.0546	355	345	335	325	315	295	285	275	470 to 630	450 to 600	450 to 600	22	22	22	21	21	21
S420N S420NL	1.8902 1.8912	420	400	390	370	360	340	330	320	520 to 680	500 to 650	500 to 650	19	19	19	18	18	18
S460N S460NL	1.8901 1.8903	460	440	430	410	400	380	370	-	540 to 720	530 to 710	-	17	17	17	17	17	-

^a For plate, strip and wide flats with widths ≥ 600 mm the direction transverse (t) to the rolling direction applies. For all other products the values apply for the direction parallel (l) to the rolling direction.

^b 1 MPa = 1 N/mm²

Πίνακας 11- 6: Minimum values of impact energy for impact tests on longitudinal V-notch test pieces for normalized steel

Designation		Minimum values of impact energy in J at test temperatures, in °C						
According EN 10027-1 and CR 10260	According EN 10027-2	+ 20	0	- 10	- 20	- 30	- 40	- 50
S275N S355N S420N S460N	1.0490 1.0545 1.8902 1.8901	55	47	43	40 ^{a)}	-	-	-
S275NL S355NL S420NL S460NL	1.0491 1.0546 1.8912 1.8903	63	55	51	47	40	31	27

^a This value corresponds with 27J at - 30 °C (see Eurocode 3).

Για το πείραμα κάμψης 3 σημείων χρησιμοποιήθηκε η μηχανή Quasar 100, Galdabini η οποία και απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 11- 1: Πειραματική διάταξη, Quasar 100 Galdabini

Η διατομή κάθε δοκιμίου δίνεται αναλυτικά στον πίνακα που συνοψίζονται όλα τα δοκίμια όπου a είναι το ύψος και b το πλάτος του δοκιμίου. Το μήκος του δοκιμίου δεν είναι απαραίτητη μεταβλητή, ωστόσο σημαντική είναι η απόσταση των 2 εδράσεων όπου στηρίζεται το δοκίμιο. Η συγκεκριμένη απόσταση είχε ρυθμιστεί στα 28 cm για όλες τις

δοκιμές. Μία άλλη απαραίτητη ρύθμιση του εξοπλισμού είναι και η ταχύτητα βυθίσματος του εμβόλου η οποία ρυθμίστηκε στα 1 mm/min, 2 mm/min, 4 mm/min.

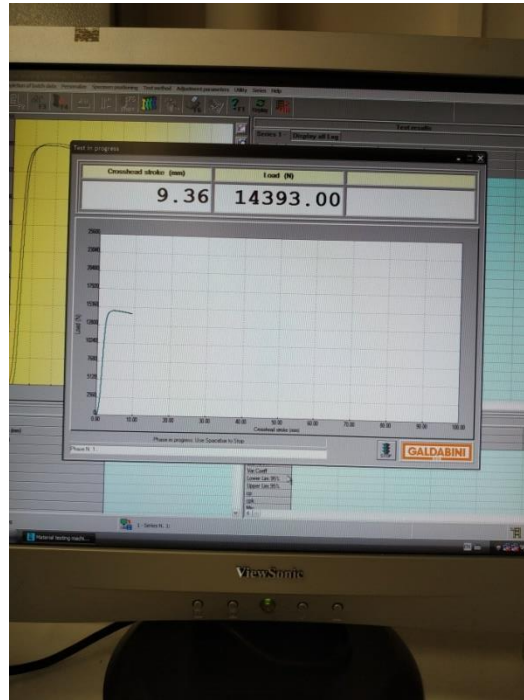
Για την κάθε δοκιμή, το δοκίμιο τοποθετείται προσεκτικά μεταξύ των 2 εδράσεων. Στην συνέχεια, με τη βοήθεια τηλεχειριστηρίου, το έμβολο τοποθετείται ακριβώς στην κορυφή του δοκιμίου. Αυτό γίνεται ώστε όταν ξεκινήσει η μέτρηση, το έμβολο να βρίσκει αντίσταση και να ξεκινά η αποτύπωση των γραφικών παραστάσεων τάσης ως συνάρτηση της μετατόπισης του εμβόλου. Σε διαφορετική περίπτωση η μηχανή θα κατέγραφε μηδενική τάση μέχρι να ακουμπήσει το δοκίμιο.

Στη συνέχεια η εντολή εκκίνησης της δοκιμής γίνεται από τον υπολογιστή. Η δοκιμή σταματάει όταν η μετατόπιση της κεφαλής γίνεται ίση με περίπου 25 mm και η κεφαλή απομακρύνεται ξανά με τη χρήση του τηλεχειριστηρίου το οποίο απεικονίζεται παρακάτω.



Σχήμα 11- 2: Τηλεχειριστήριο μετακίνησης της κεφαλής πριν την εκκίνηση και μετά την περάτωση της δοκιμής

Η εκκίνηση και το σταμάτημα της δοκιμής δίνονται με εντολές από PC μέσω ειδικού προγράμματος οδήγησης της Galadabini. Το πρόγραμμα αυτό έδινε μία γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων άλλα και τις συντεταγμένες των σημείων μέτρησης. Ένα παράδειγμα απεικόνισης της γραφικής παράστασης του προγράμματος οδήγησης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 11- 3: Γραφική απεικόνιση δοκιμής από το πρόγραμμα οδήγησης της Galdabini

Τα δεδομένα αυτά στη συνέχεια αποθηκεύονται σε μορφή .txt. Το αρχείο αυτό χρησιμοποιήθηκε για περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων στο Microsoft Excel στο οποίο συγκροτήθηκαν όλες οι γραφικές παραστάσεις. Στη συνέχεια φαίνονται φωτογραφικά στιγμιότυπα από την πειραματική διαδικασία.



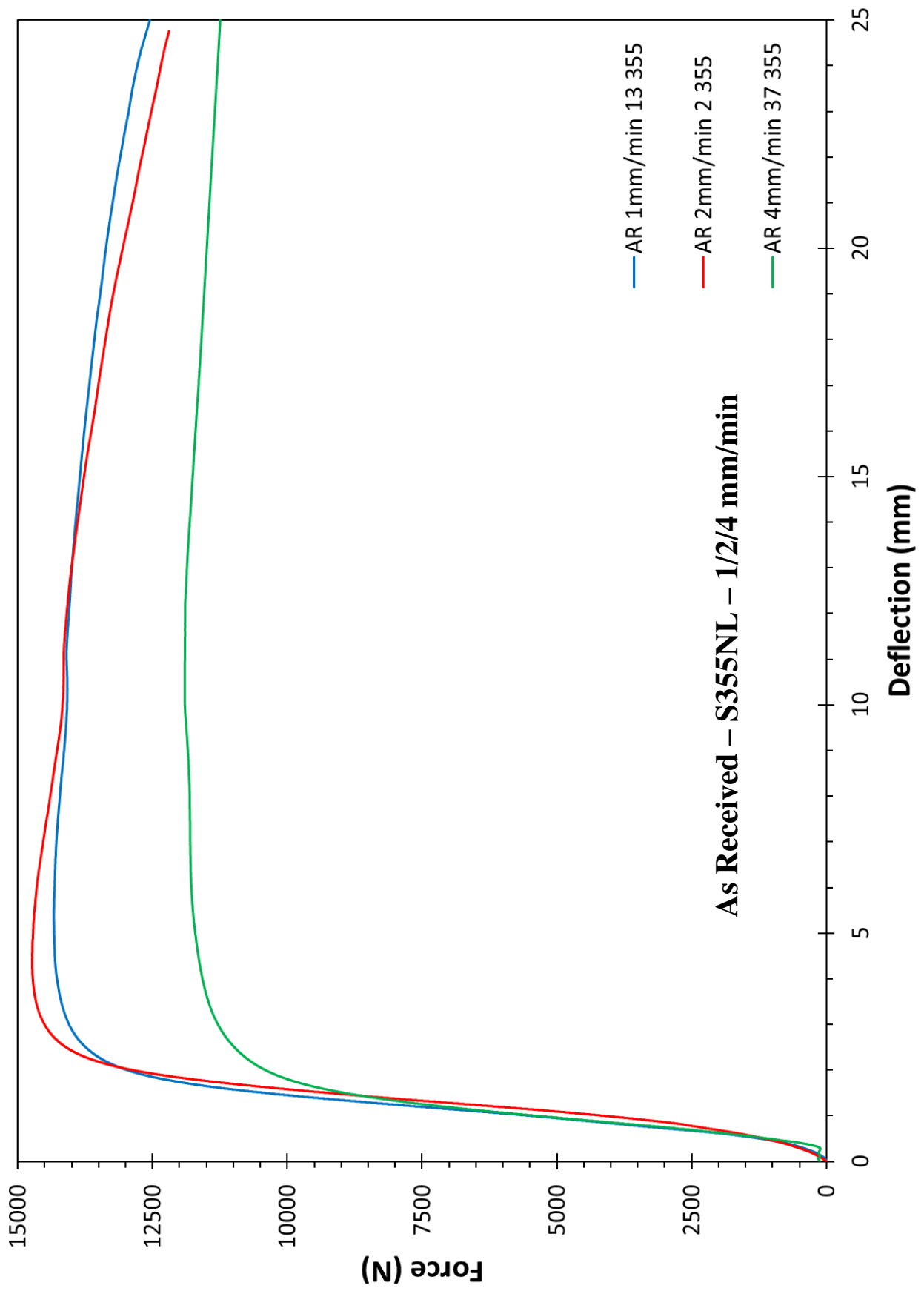
Σχήμα 11- 4: Φωτογραφίες κατά την διάρκεια της δοκιμής

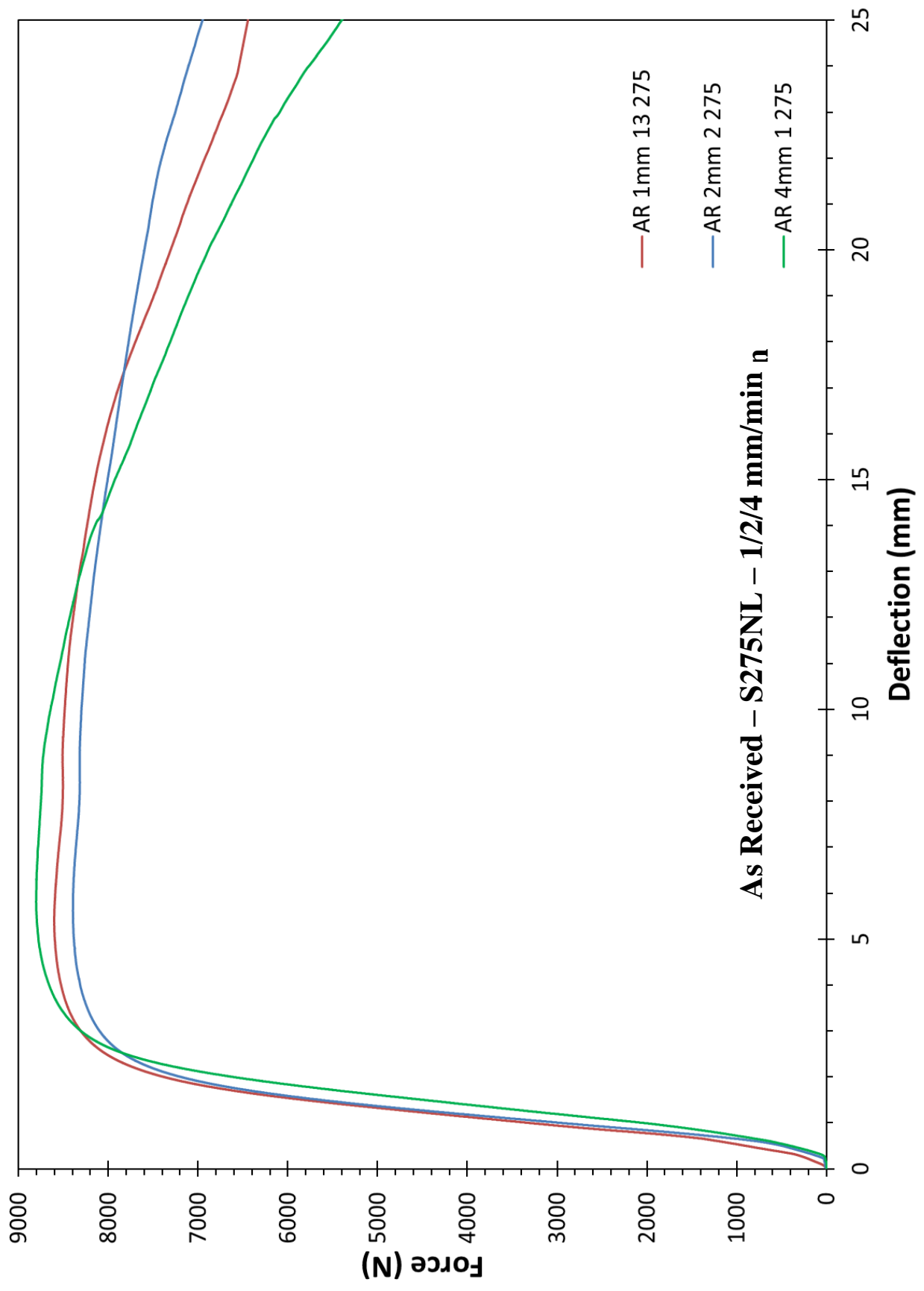
12. Αποτελέσματα και Συζήτηση

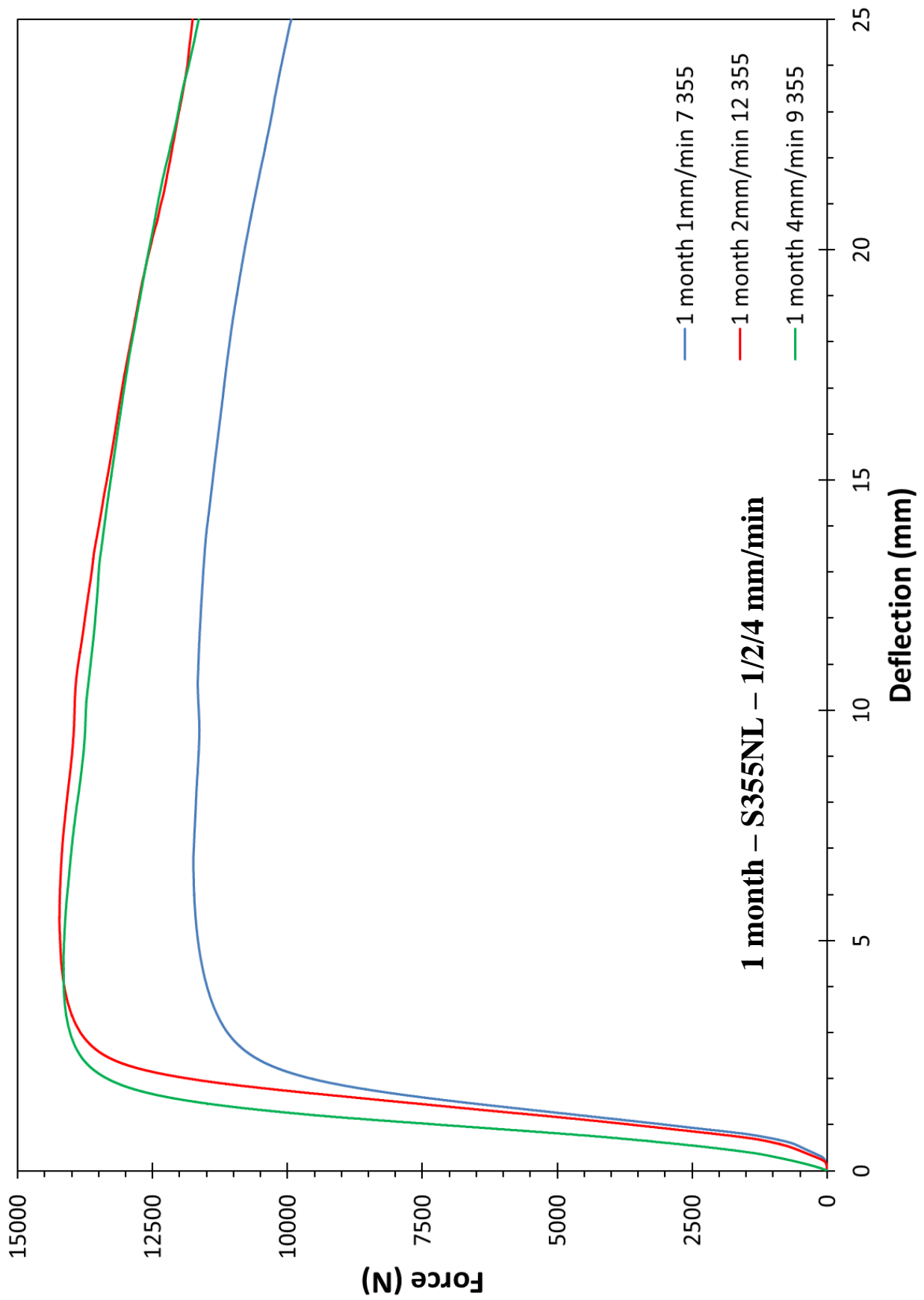
Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, θα θέλαμε να τονίσουμε κάποια σφάλματα τα οποία φυσικά πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων.

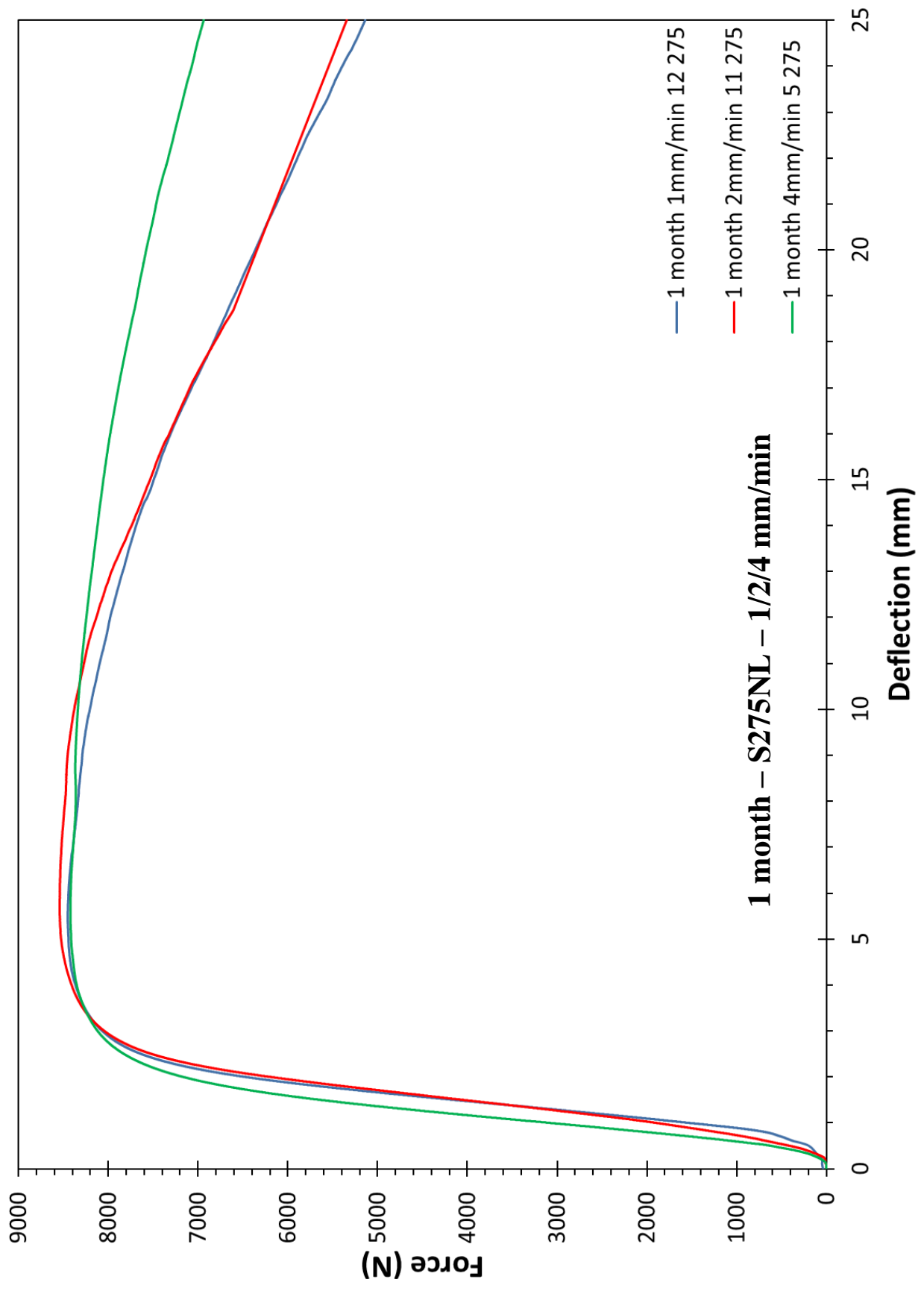
- Η δημιουργία των δοκιμίων έγινε σε μηχανουργείο με την χρήση παντογράφου. Παρατηρήθηκε ότι το μηχάνημα είχε δυσκολία στο να κόψει τον ανθεκτικότερο χάλυβά μας S355NL. Με αποτέλεσμα να μην να τον κόβει αλλά παράλληλα και να τον συμπιέζει στο σημείο κοπής δημιουργώντας τάσεις στα δοκίμια. Σε μελλοντικό πείραμα θα συνιστούσαμε ο συγκεκριμένος χάλυβας να κοπεί με την χρήση laser για την αποφυγή της συμπίεσης και την δημιουργία τάσεων.
- Τα δοκίμια τα οποία διαβρώθηκαν στο υδατικό μας διάλυμα NaCl δεν ήταν βυθισμένα εξολοκλήρου μέσα στο διάλυμα, 5 cm βρίσκονταν σε επαφή με την ατμόσφαιρα. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε ανομοιομορφία της διάβρωσης κατά μήκος του δοκιμίου και κατ'επέκταση σε ανομοιομορφία τάσεων.
- Τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ήταν στην πλειοψηφία τους τετραγωνικής διατομής, όμως υπήρξαν δοκίμια όπως το 33 και το 36 του S355NL στα οποία μετά από παχυμέτρηση παρατηρήθηκε διαφορά 1mm μεταξύ ύψους και πλάτους.
- Πιθανό σφάλμα παρατηρητή κατά την τοποθέτηση των δοκιμίων είναι να μην τοποθετήθηκαν συμμετρικά ανάμεσα στις εδράσεις της πειραματικής μηχανής
- Ο αριθμός των δοκιμίων που είχαμε στην διάθεση ήταν περιορισμένος με αποτέλεσμα το πείραμα μας να χαρακτηρίζεται από μικρή επαναληψιμότητα.

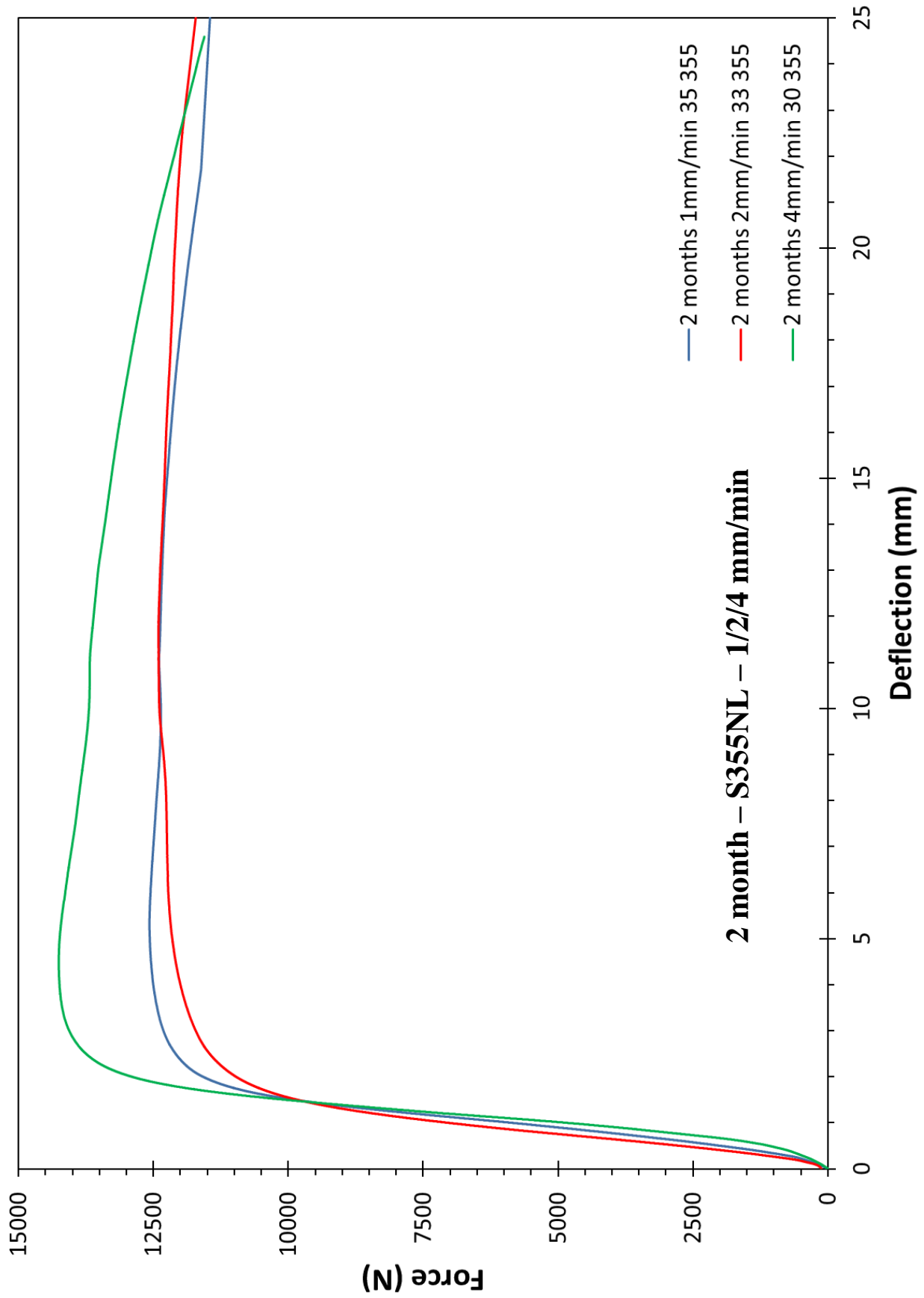
Στις επόμενες σελίδες, παρουσιάζονται τα διαγράμματα δύναμης-βυθίσματος (στην θέση της κεφαλής) όπως αυτά προέκυψαν μετά από επεξεργασία στο Microsoft Excel. Στη συνέχεια παρατίθεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

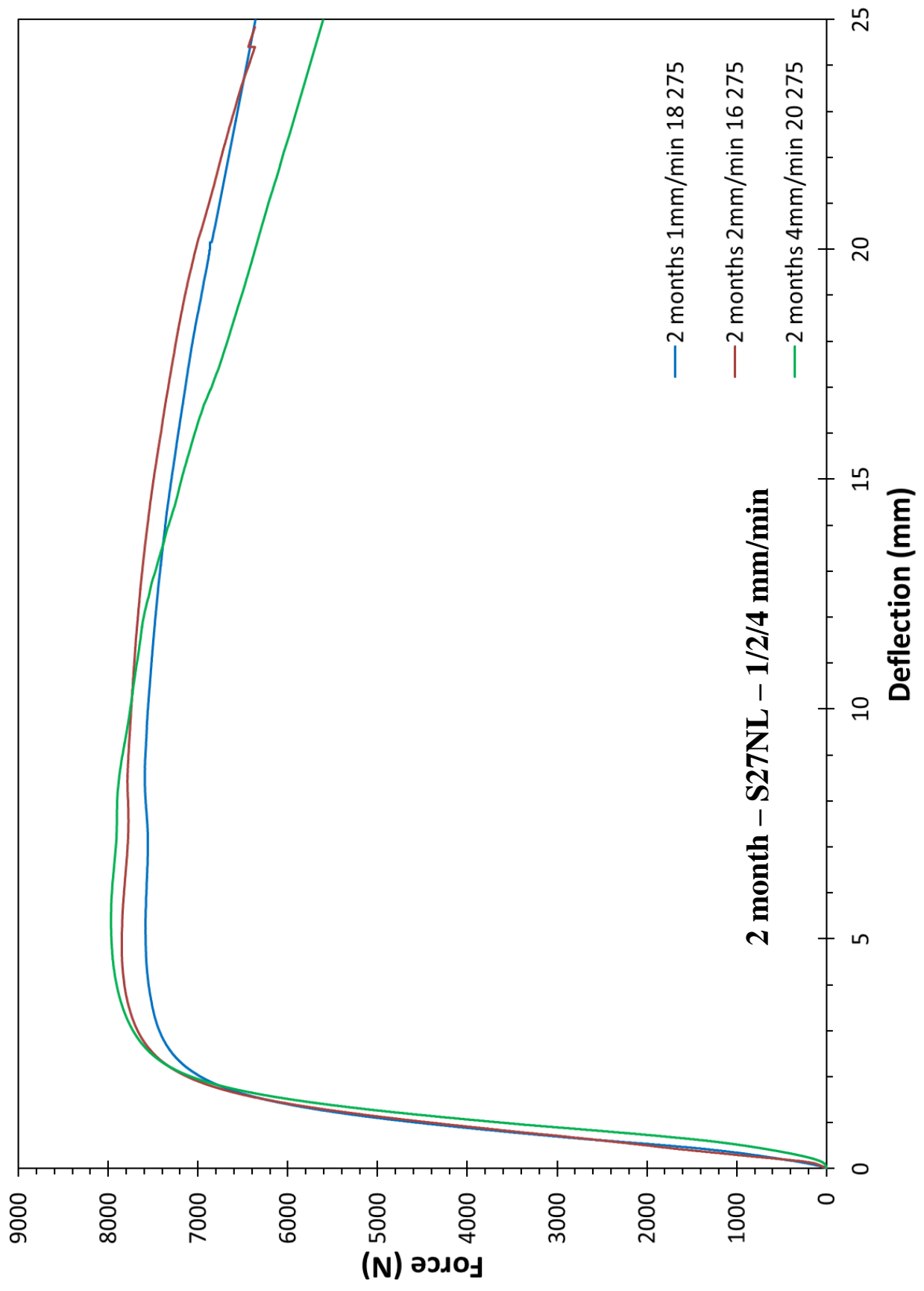


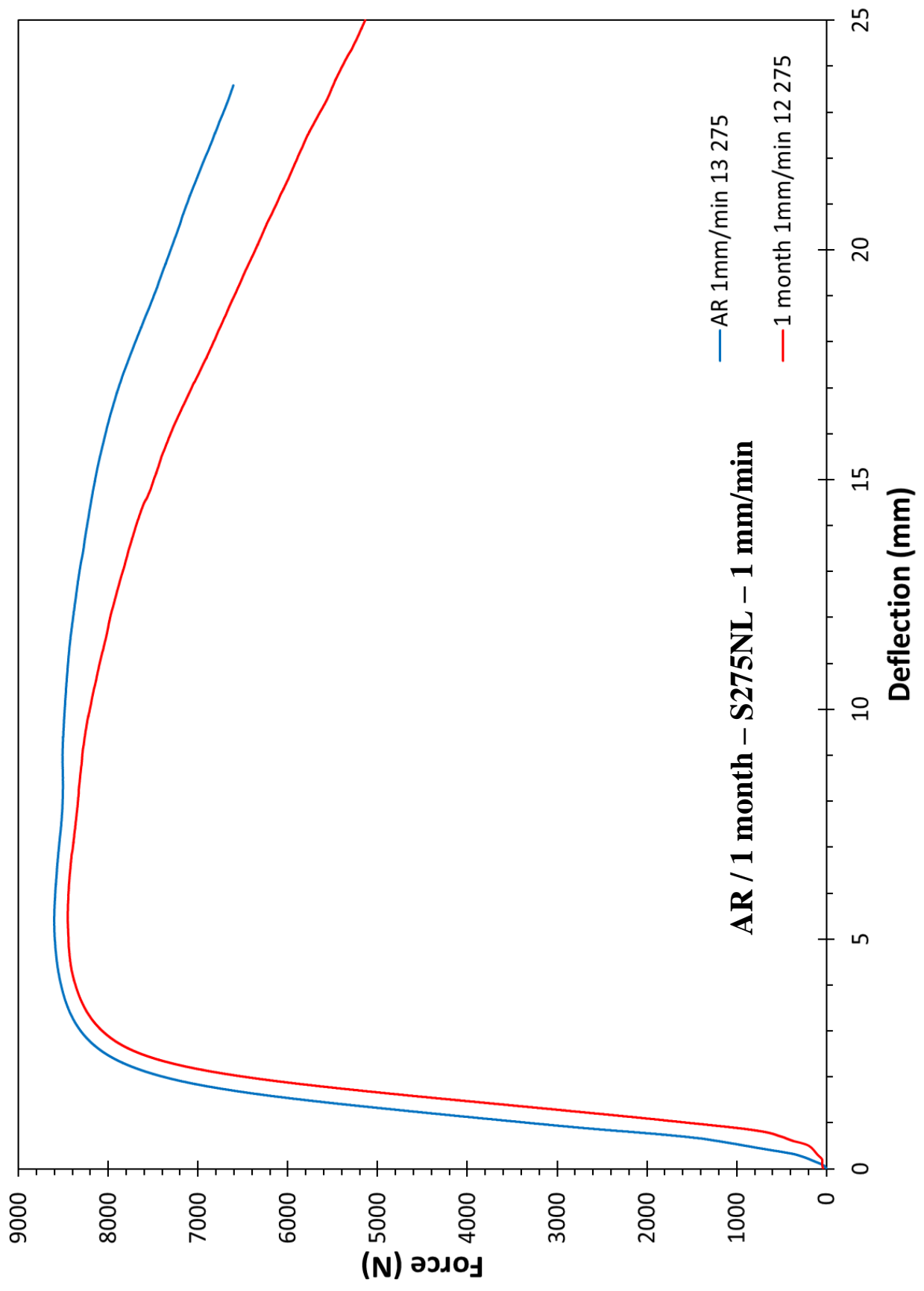


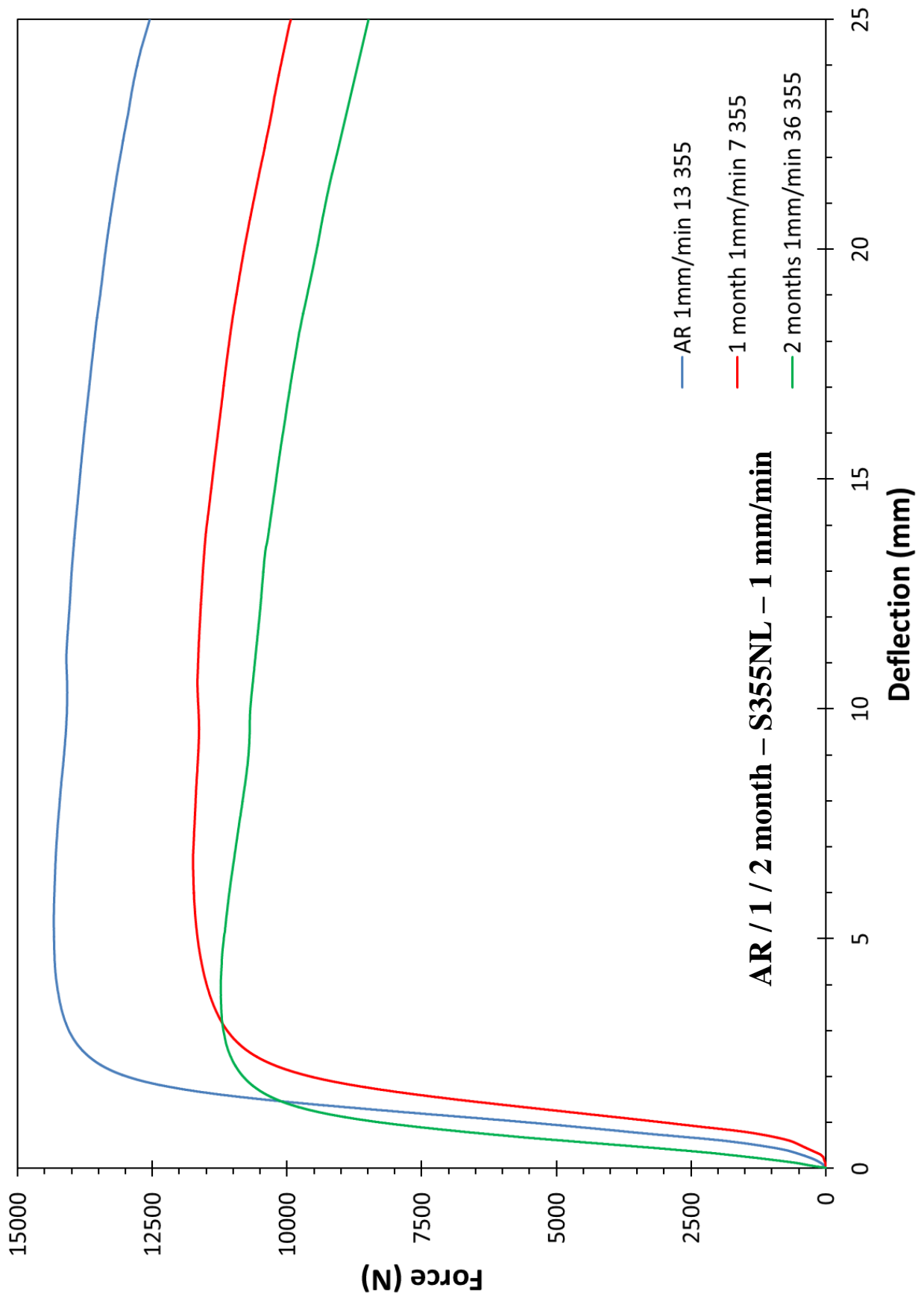


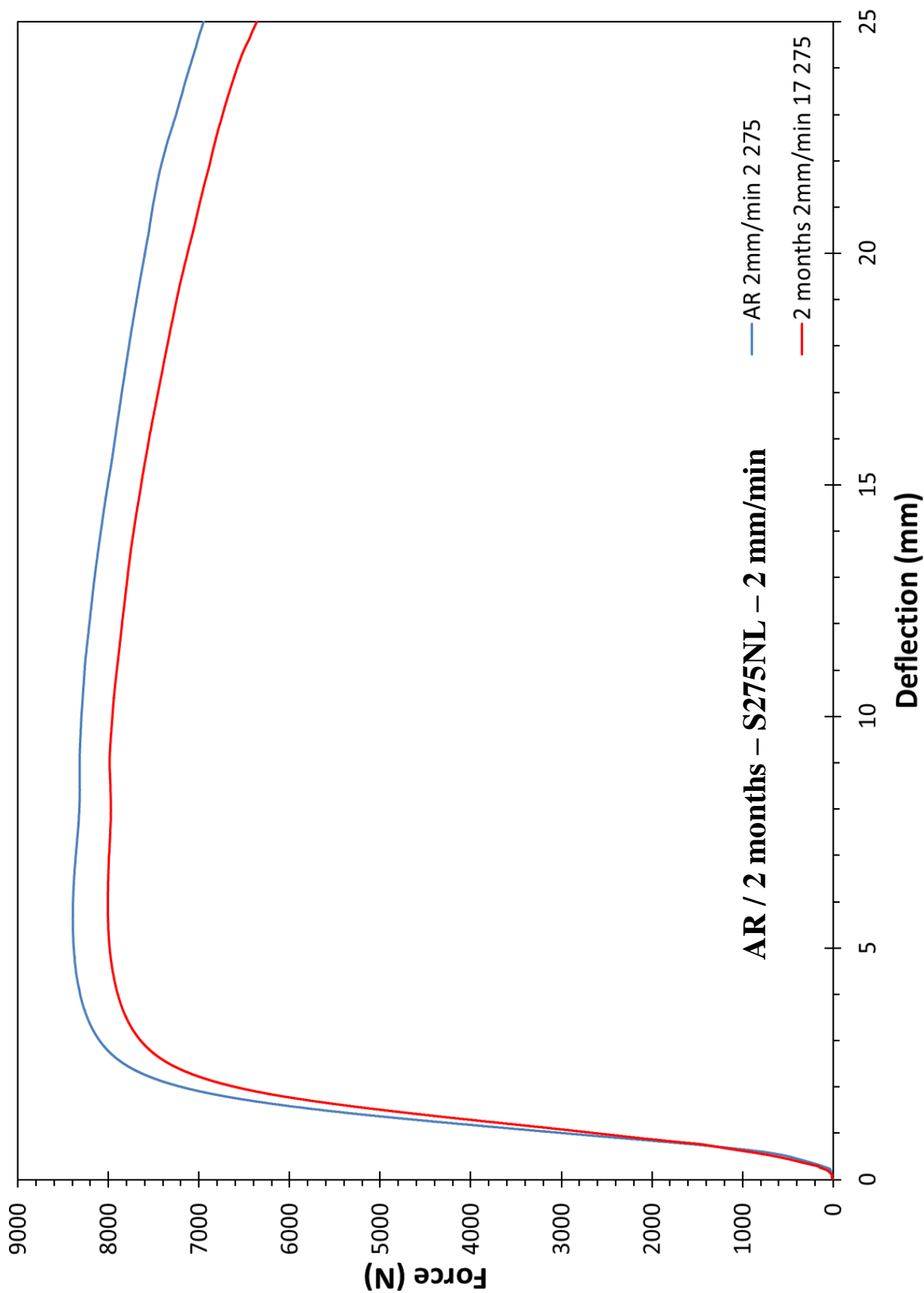


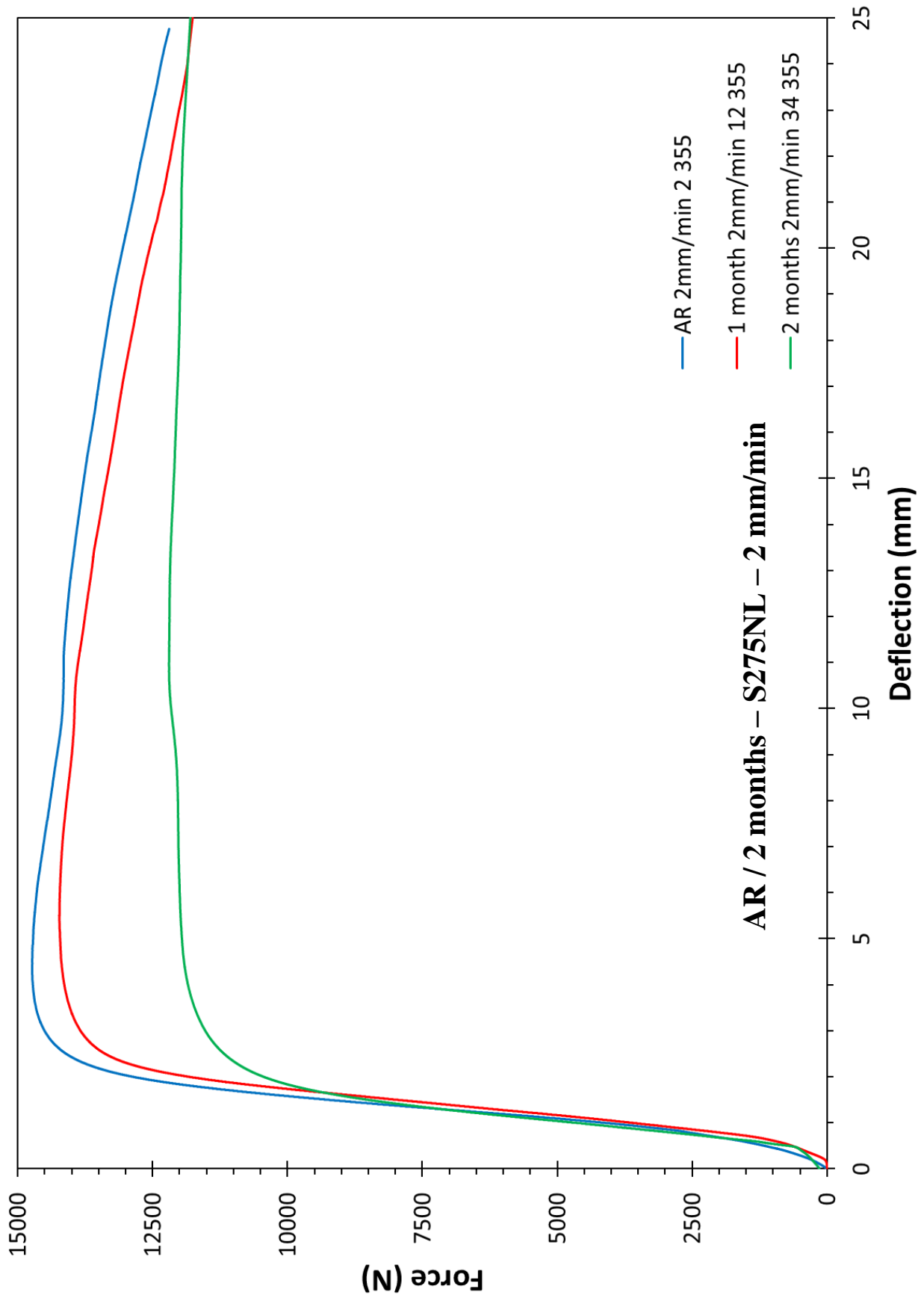


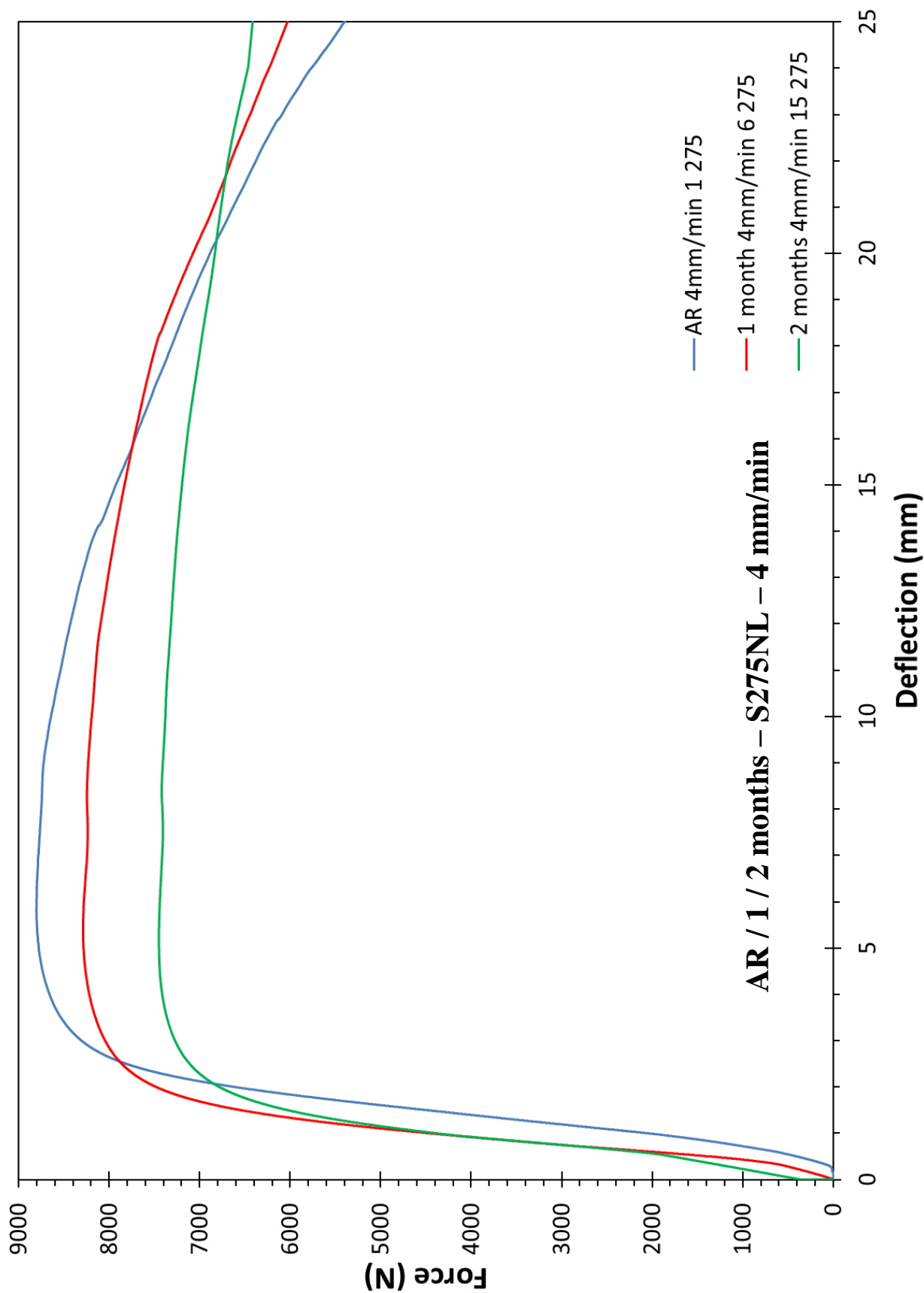


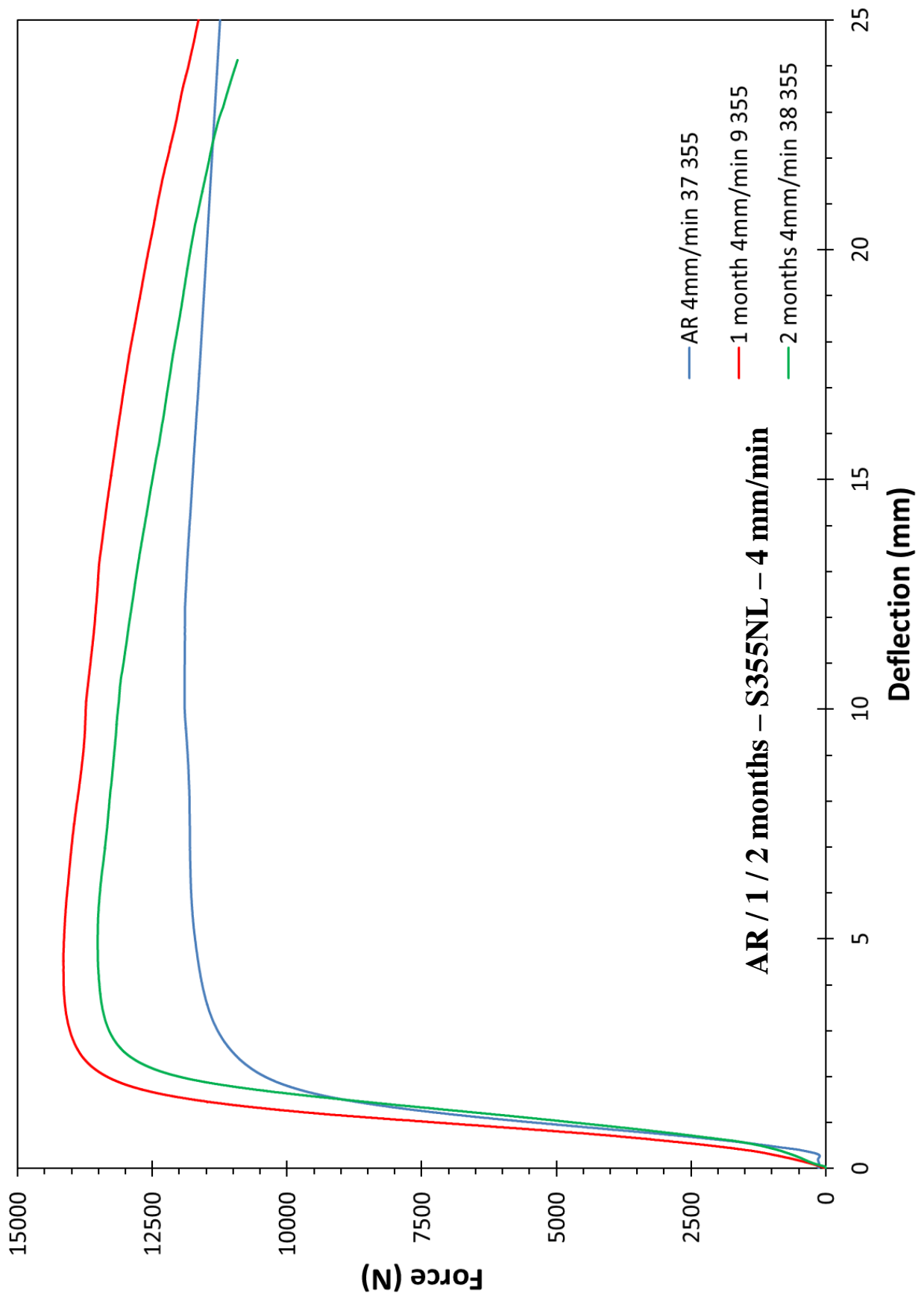


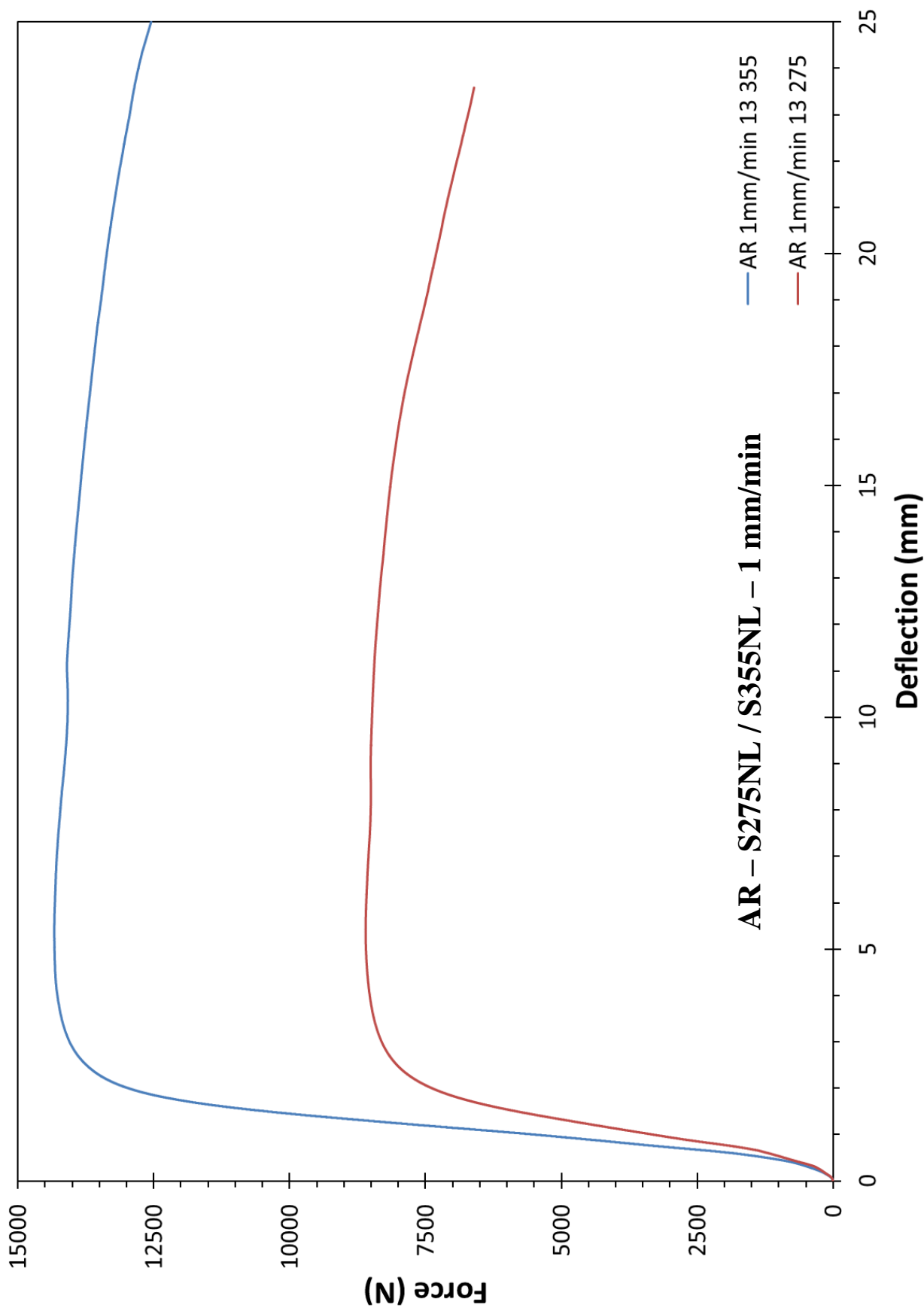


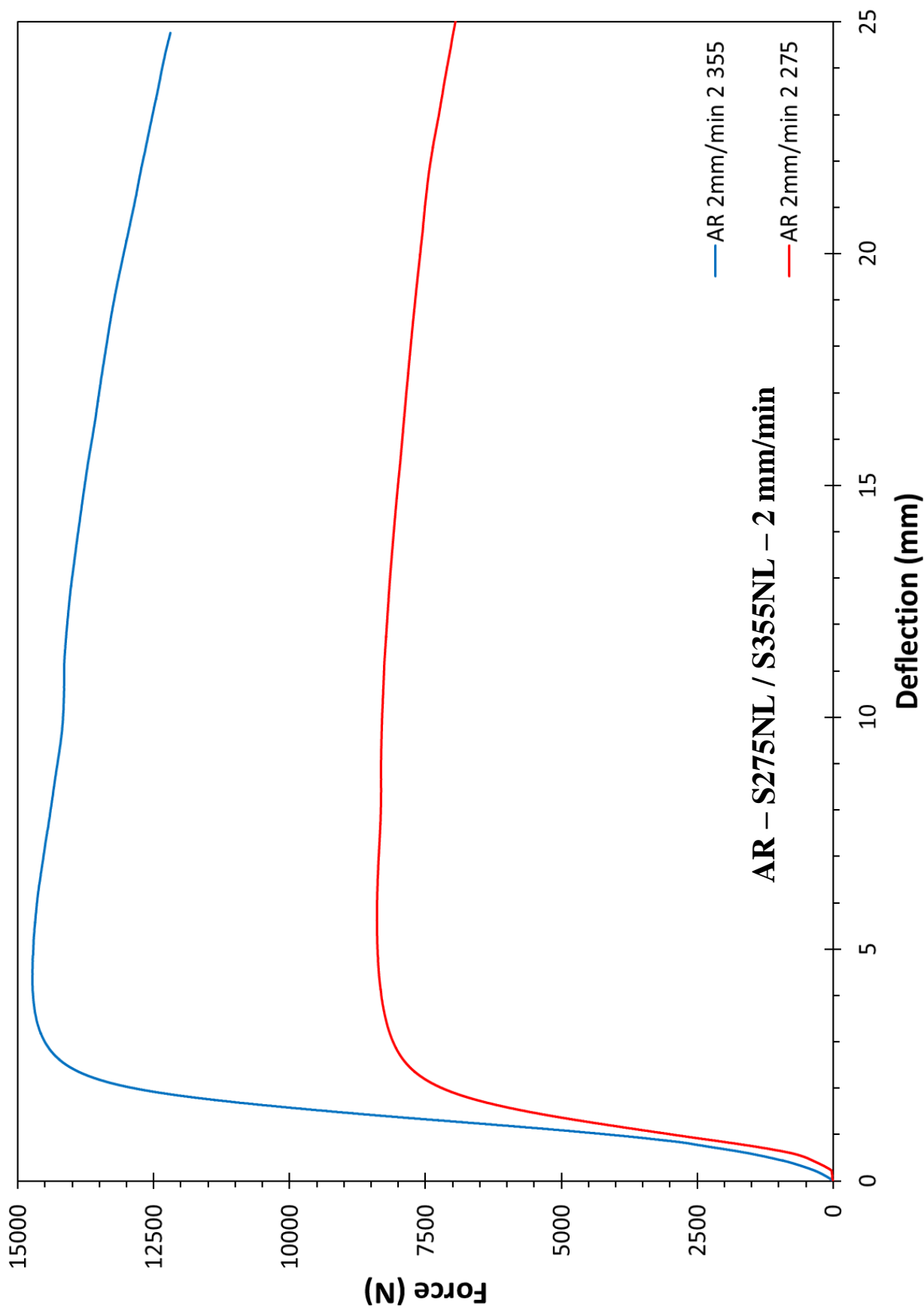


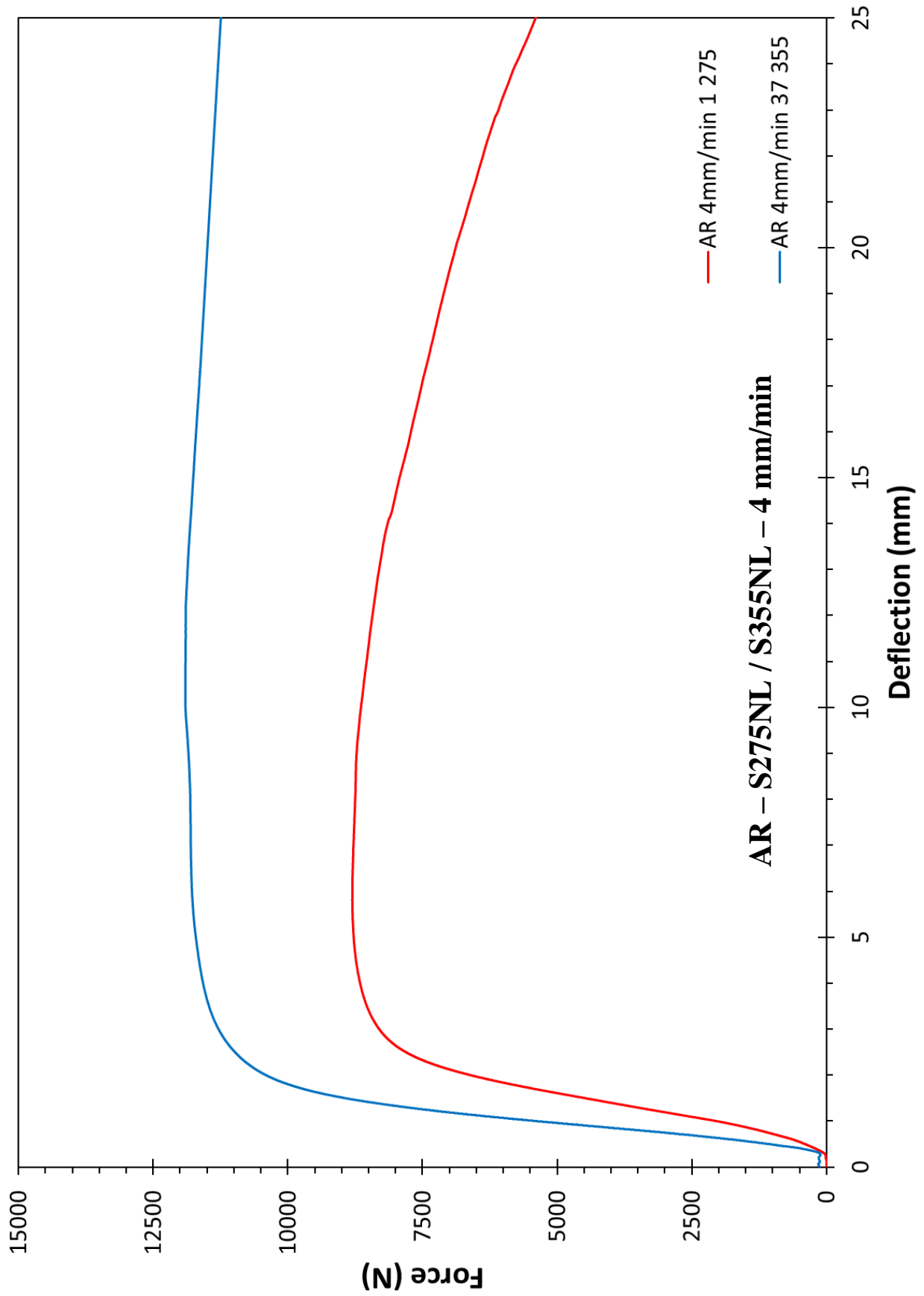




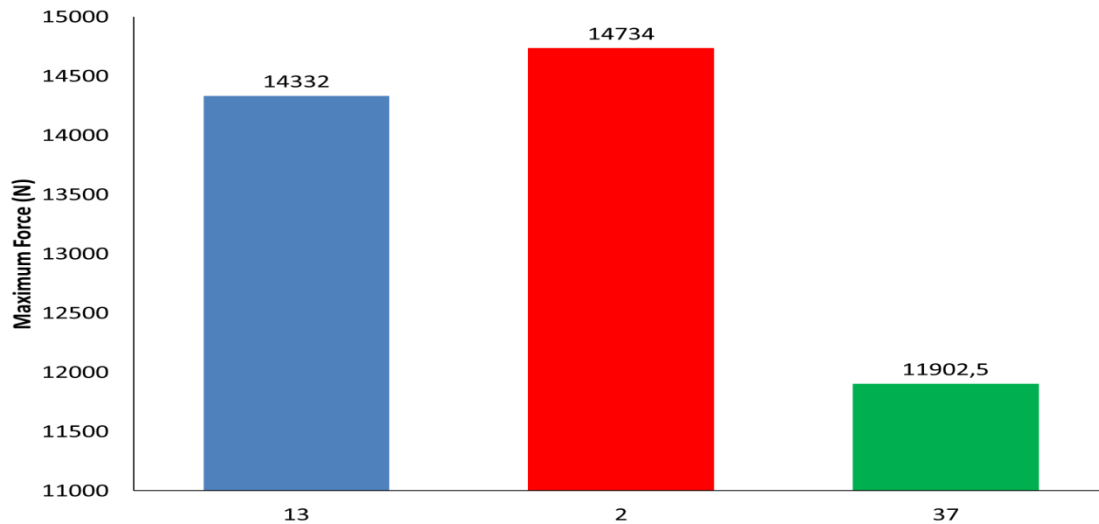




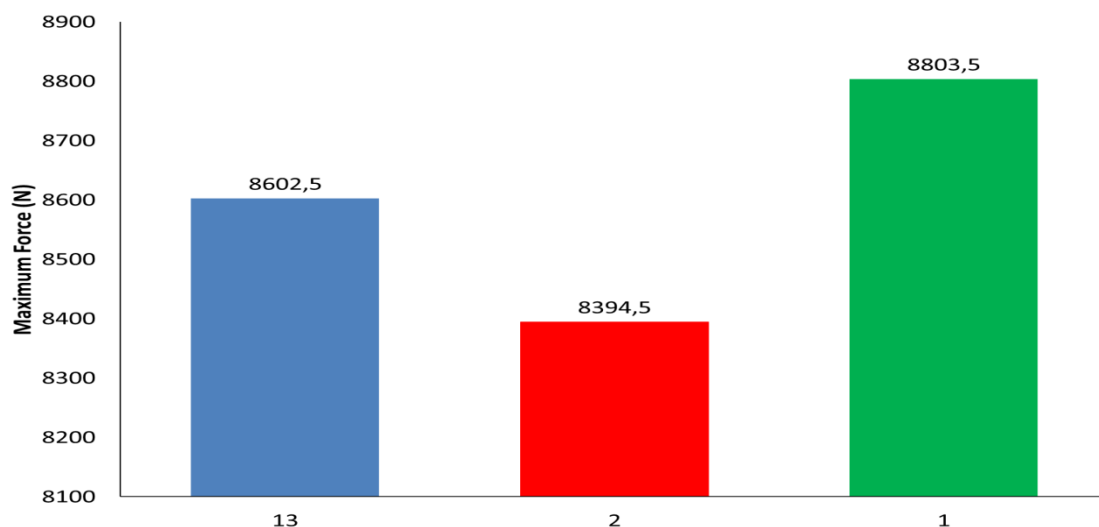




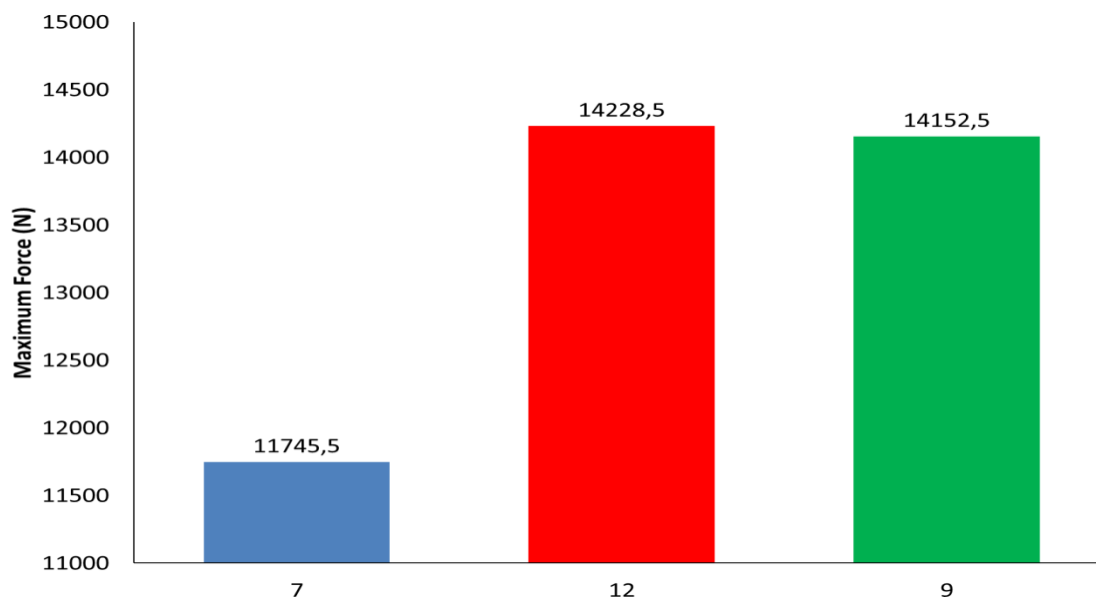
Διάγραμμα 1 (Σελίδα 50): Στο διάγραμμα αυτό συγκρίθηκαν 3 δοκίμια μη διαβρωμένων χαλύβων S355NL για διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης (1 mm/min, 2 mm/min, 4 mm/min). Παρατηρήθηκε ότι ενώ αυξάνοντας τον ρυθμό φόρτισης από 1 mm/min σε 2 mm/min η τάση διαρροής αυξήθηκε, το οποίο είναι σύμφωνο με την θεωρία δεν συνέβη το ίδιο και για ρυθμό φόρτισης 4 mm/min.



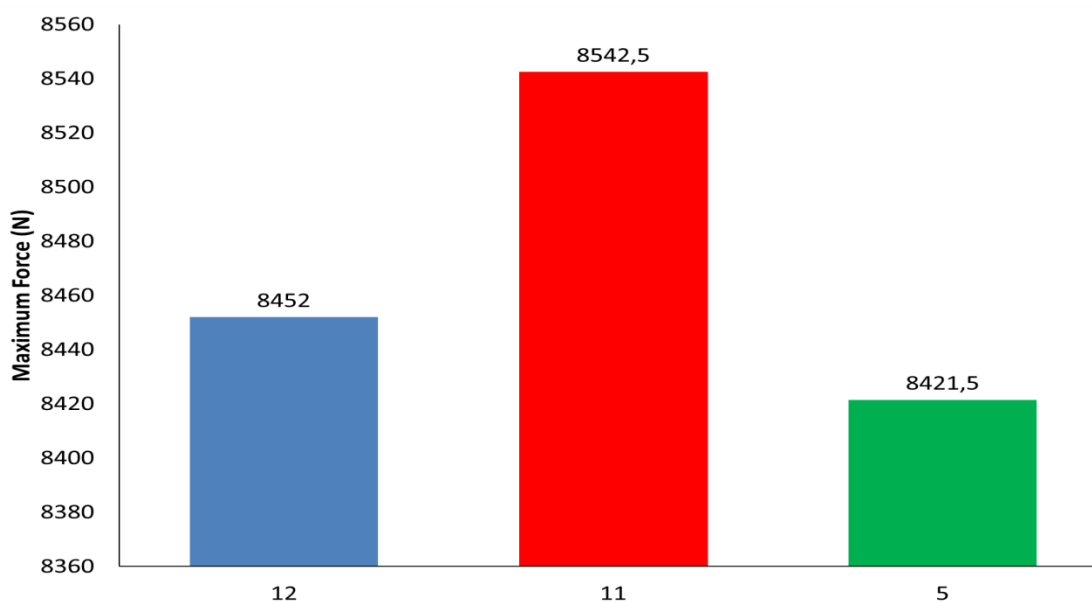
Διάγραμμα 2 (Σελίδα 51): Στο διάγραμμα αυτό συγκρίθηκαν 3 δοκίμια μη διαβρωμένων χαλύβων S275NL για διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης (1 mm/min, 2 mm/min, 4 mm/min). Παρατηρήθηκε ότι ενώ για τον μέγιστο ρυθμό φόρτισης (4 mm/min) η καμπύλη παρουσιάζει την μέγιστη τάση διαρροής, το οποίο είναι σύμφωνο με την θεωρία, το δοκίμιο με ρυθμό φόρτισης (1 mm/min) παρουσίασε επίσης μεγαλύτερη τάση διαρροής από το δοκίμιο με ρυθμό φόρτισης (2 mm/min).



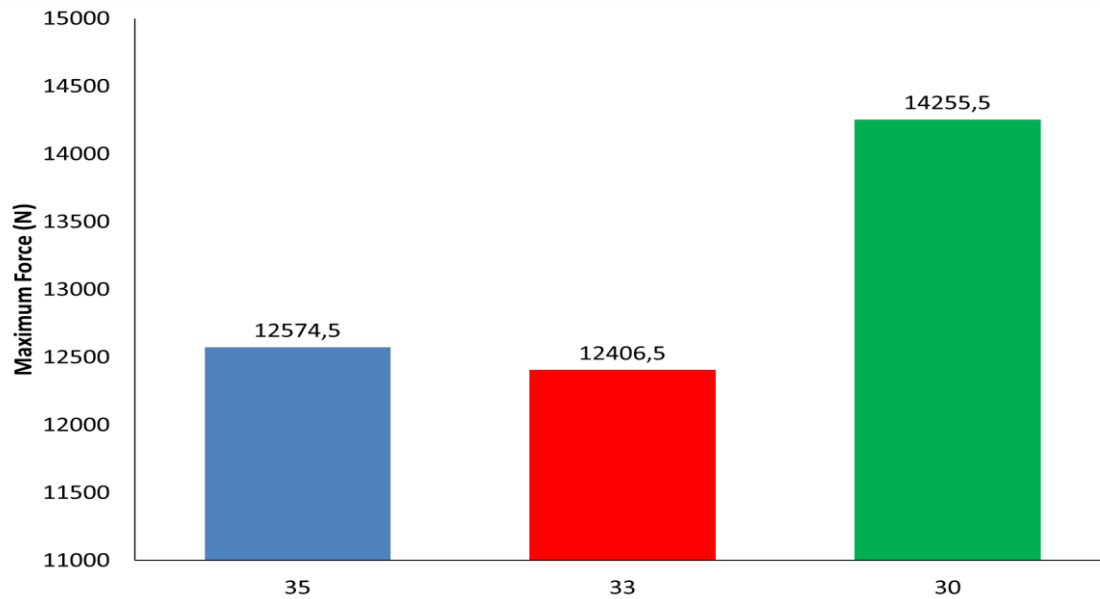
Διάγραμμα 3 (Σελίδα 52): Στο διάγραμμα αυτό συγκρίθηκαν 3 δοκίμια διαβρωμένων χαλύβων S355NL για 1 μήνα για διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης (1 mm/min, 2 mm/min, 4 mm/min). Παρατηρήθηκε ότι αυξανόμενου του ρυθμού φόρτισης, η τάση διαρροής αυξανόταν επίσης, το οποίο είναι σύμφωνο με την θεωρία.



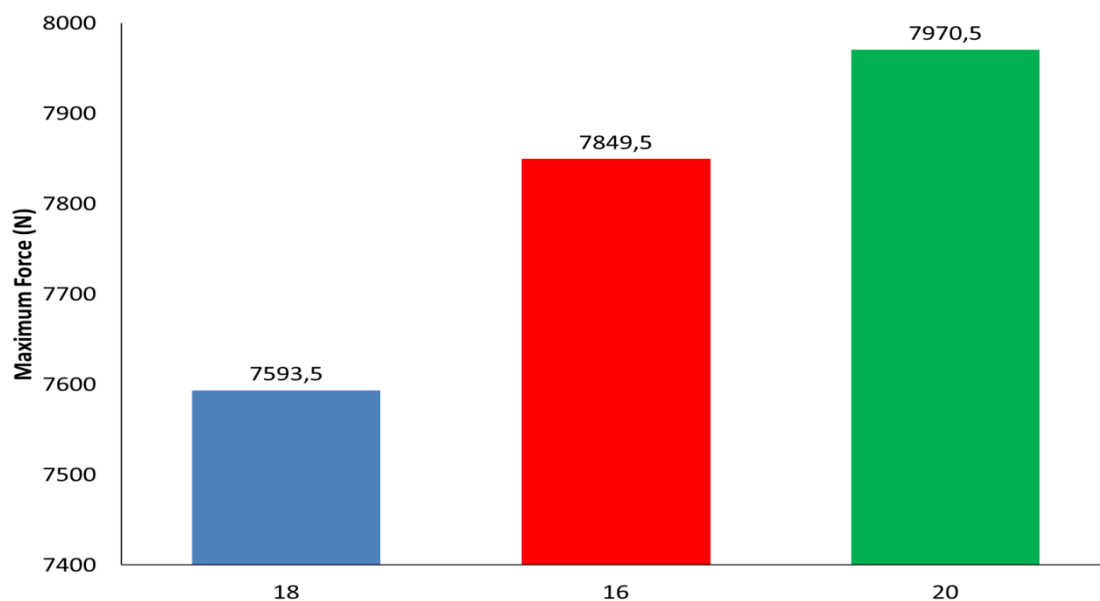
Διάγραμμα 4 (Σελίδα 53): Στο διάγραμμα αυτό συγκρίθηκαν 3 δοκίμια διαβρωμένων χαλύβων S275NL για 1 μήνα για διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης (1 mm/min, 2 mm/min, 4 mm/min). Ενώ αυξάνοντας τον ρυθμό φόρτισης από 1 mm/min σε 2 mm/min η τάση διαρροής αυξήθηκε, δεν παρατηρήθηκε το ίδιο και για περαιτέρω αύξηση του ρυθμού φόρτισης στα 4 mm/min.



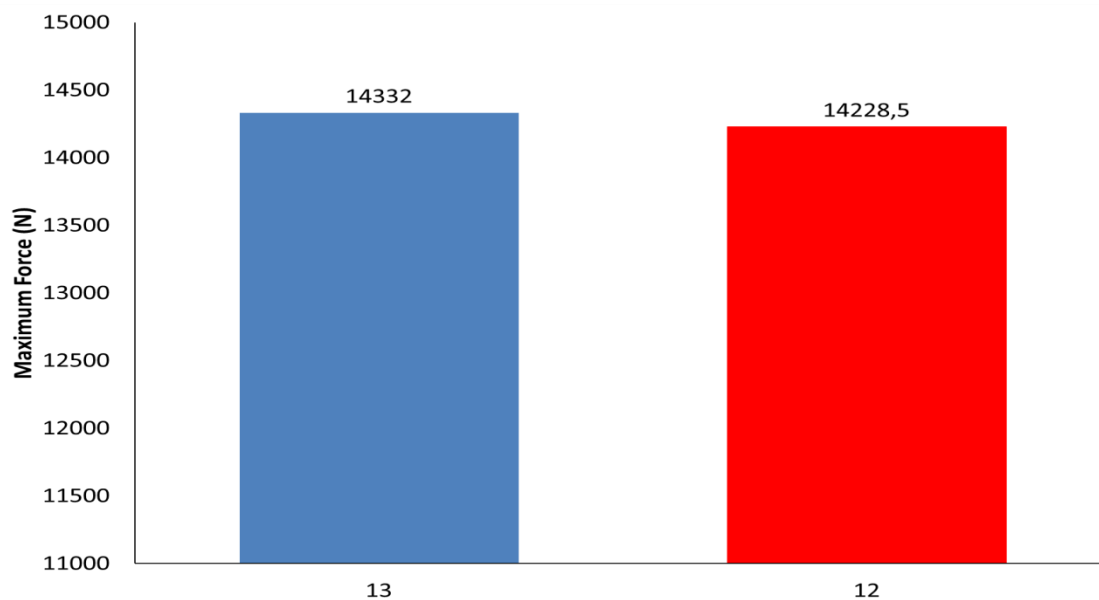
Διάγραμμα 5 (Σελίδα 54): Στο διάγραμμα αυτό συγκρίθηκαν 3 δοκίμια διαβρωμένων χαλύβων S355NL για 2 μήνες για διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης (1 mm/min, 2 mm/min, 4 mm/min). Παρατηρήθηκε ότι ενώ για τον μέγιστο ρυθμό φόρτισης (4 mm/min) η καμπύλη παρουσιάζει την μέγιστη τάση διαρροής, το οποίο είναι σύμφωνο με την θεωρία, το δοκίμιο με ρυθμό φόρτισης (1 mm/min) παρουσίασε επίσης μεγαλύτερη τάση διαρροής από το δοκίμιο με ρυθμό φόρτισης (2 mm/min).



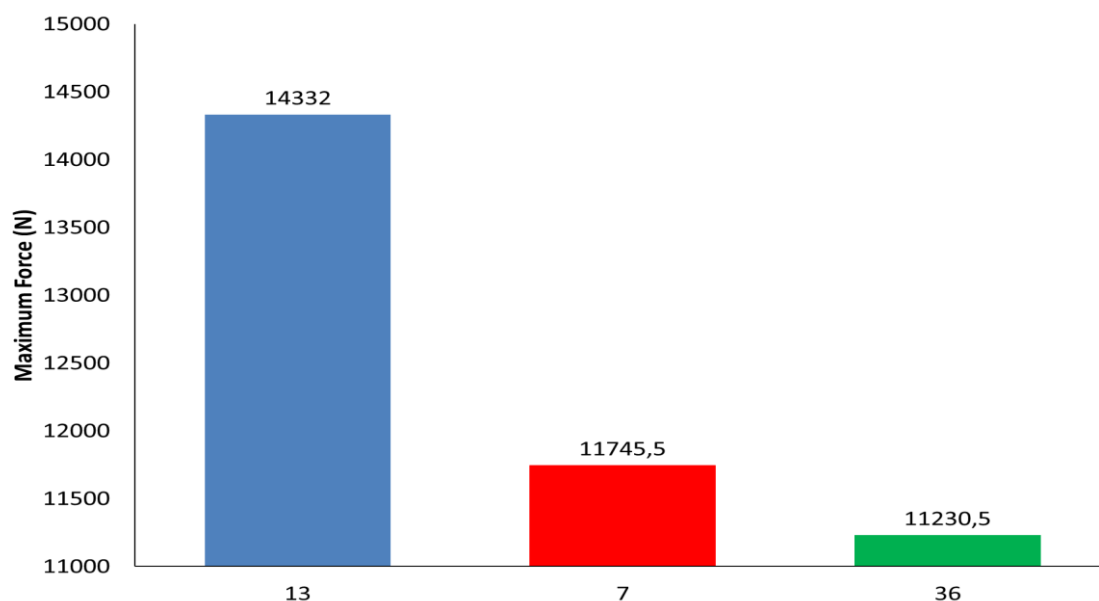
Διάγραμμα 6 (Σελίδα 55): Στο διάγραμμα αυτό συγκρίθηκαν 3 δοκίμια διαβρωμένων χαλύβων S275NL για 2 μήνες για διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης (1 mm/min, 2 mm/min, 4 mm/min). Παρατηρήθηκε ότι αυξανόμενου του ρυθμού φόρτισης, η τάση διαρροής αυξανόταν επίσης, το οποίο είναι σύμφωνο με την θεωρία.



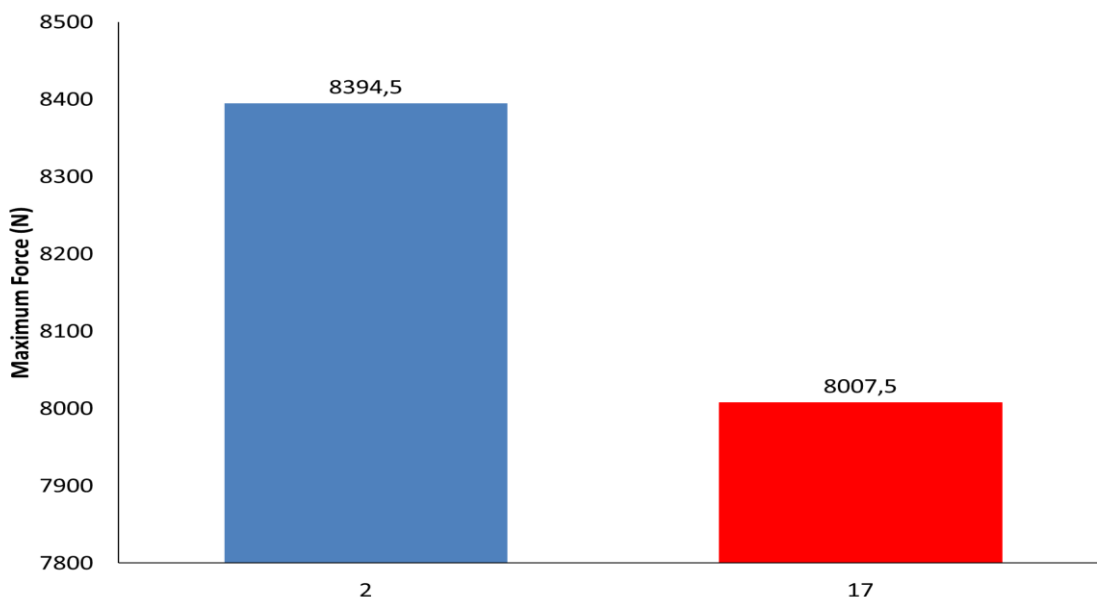
Διάγραμμα 7 (Σελίδα 56): Στο διάγραμμα αυτό συγκρίθηκαν 2 δοκίμια χαλύβων S275NL. Το ένα είναι μη διαβρωμένο ενώ το δεύτερο έχει υποστεί διάβρωση για ένα μήνα. Ο ρυθμός φόρτισης ήταν κοινός και ίσος με 1mm/min. Παρατηρήθηκε ότι η τάση διαρροής του διαβρωμένου χάλυβα ήταν μικρότερη σε σύγκριση με του μη διαβρωμένου χάλυβα.



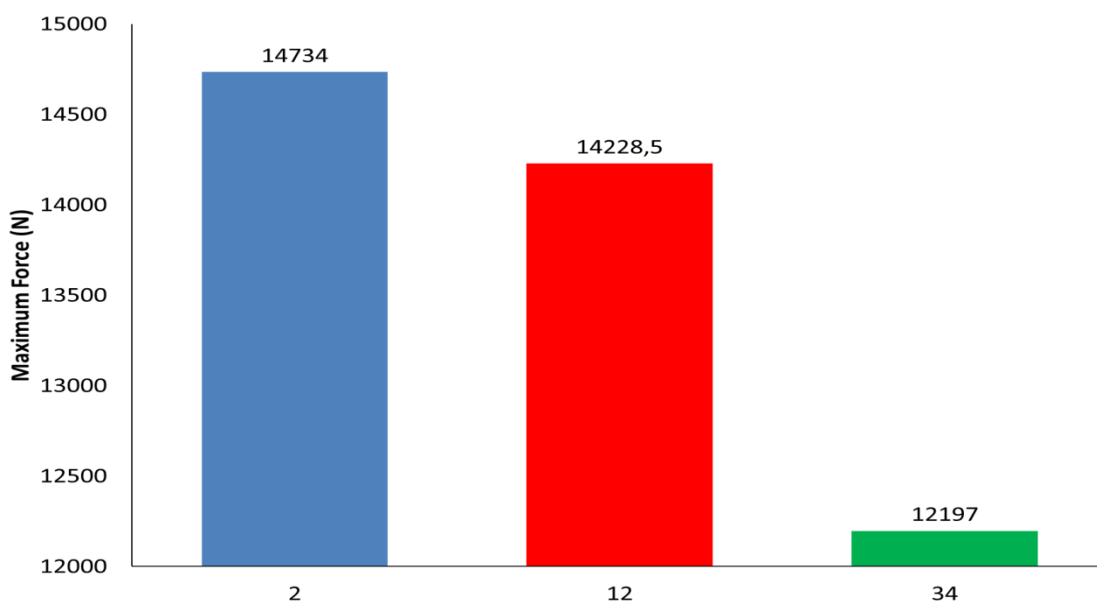
Διάγραμμα 8 (Σελίδα 57): Στο διάγραμμα αυτό συγκρίθηκαν 3 δοκίμια χαλύβων S355NL (μη διαβρωμένου, διαβρωμένου για 1 μήνα και για 2 μήνες) με κοινό ρυθμό φόρτισης ίσο με 1 mm/min. Παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερη ήταν η διάρκεια έκθεσης του χάλυβα σε διαβρωτικό περιβάλλον, τόσο μεγαλύτερη και η μείωση της τάσης διαρροής.



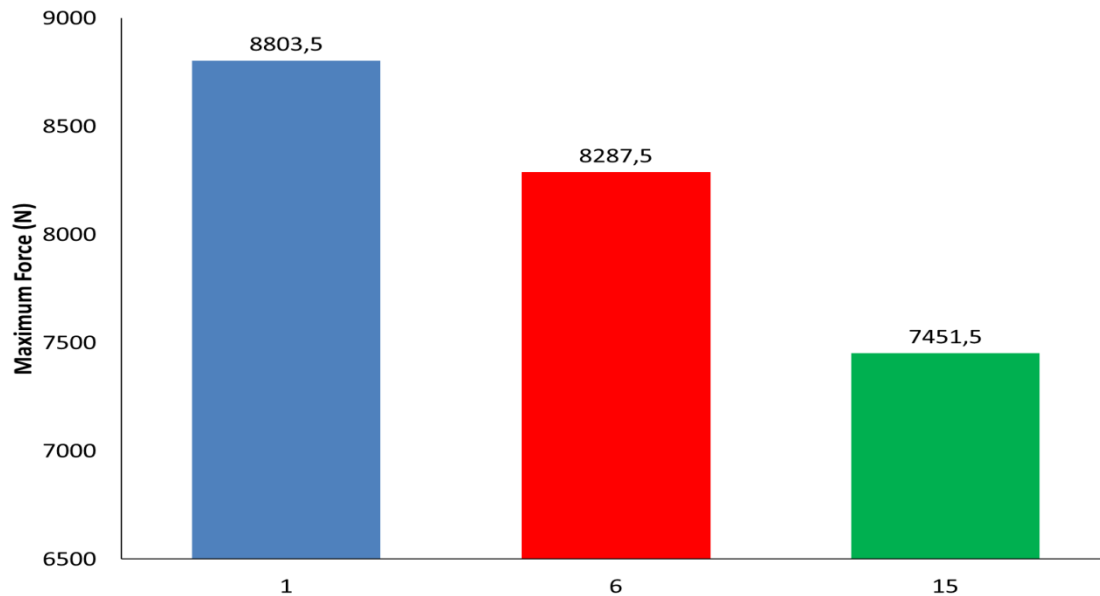
Διάγραμμα 9 (Σελίδα 58): Στο διάγραμμα αυτό συγκρίθηκαν 2 δοκίμια χαλύβων S275NL (μη διαβρωμένου και για διαβρωμένου για 2 μήνες) με κοινό ρυθμό φόρτισης ίσο με 2 mm/min. Παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερη ήταν η διάρκεια έκθεσης του χάλυβα σε διαβρωτικό περιβάλλον, τόσο μεγαλύτερη και η μείωση της τάσης διαρροής.



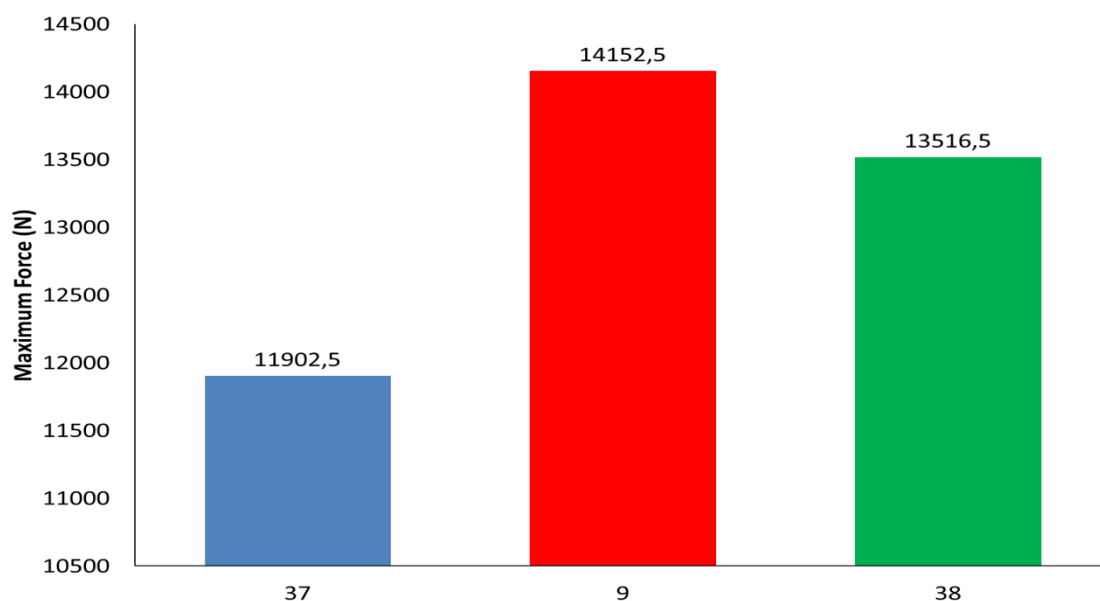
Διάγραμμα 10 (Σελίδα 59): Στο διάγραμμα αυτό συγκρίθηκαν 3 δοκίμια χαλύβων S355NL (μη διαβρωμένου, διαβρωμένου για 1 και 2 μήνες) με κοινό ρυθμό φόρτισης ίσο με 2 mm/min. Παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερη ήταν η διάρκεια έκθεσης του χάλυβα σε διαβρωτικό περιβάλλον, τόσο μεγαλύτερη και η μείωση της τάσης διαρροής.



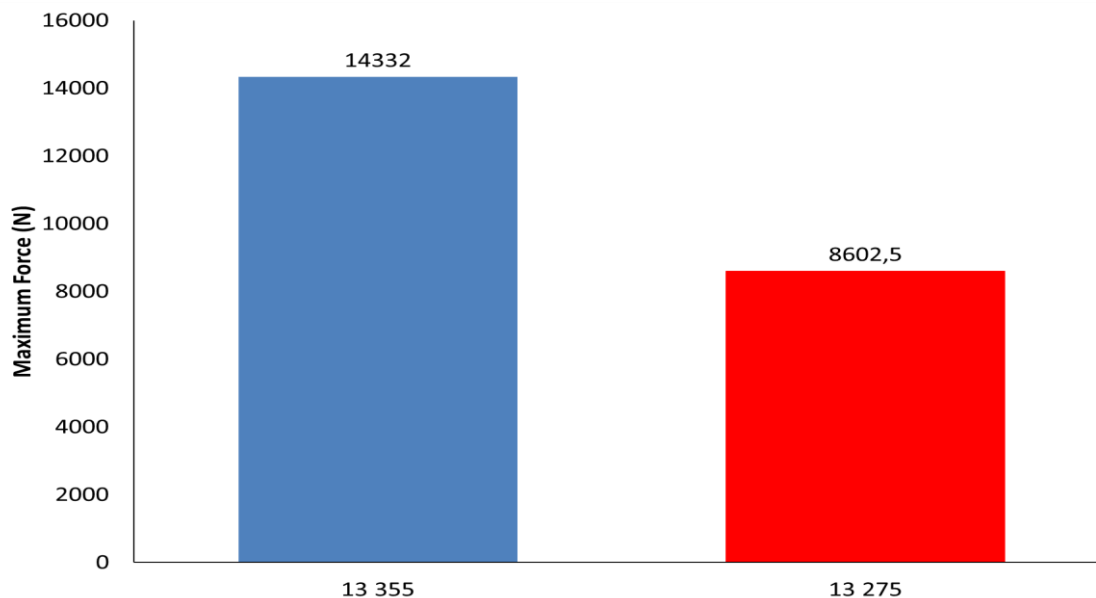
Διάγραμμα 11 (Σελίδα 60): Στο διάγραμμα αυτό συγκρίθηκαν 3 δοκίμια χαλύβων S275NL (μη διαβρωμένου, διαβρωμένου για 1 και 2 μήνες) με κοινό ρυθμό φόρτισης ίσο με 4 mm/min. Παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερη ήταν η διάρκεια έκθεσης του χάλυβα σε διαβρωτικό περιβάλλον, τόσο μεγαλύτερη και η μείωση της τάσης διαρροής.



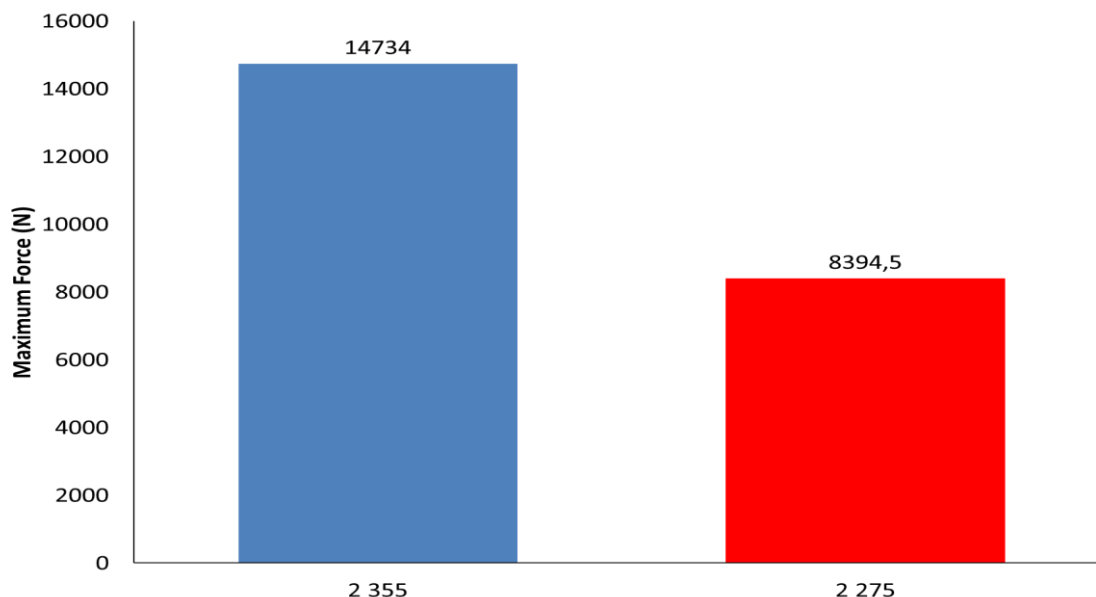
Διάγραμμα 12 (Σελίδα 61): Στο διάγραμμα αυτό συγκρίθηκαν 3 δοκίμια χαλύβων S355NL (μη διαβρωμένου, διαβρωμένου για 1 και 2 μήνες) με κοινό ρυθμό φόρτισης ίσο με 4 mm/min. Παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερη ήταν η διάρκεια έκθεσης του χάλυβα σε διαβρωτικό περιβάλλον, τόσο μεγαλύτερη και η μείωση της τάσης διαρροής.



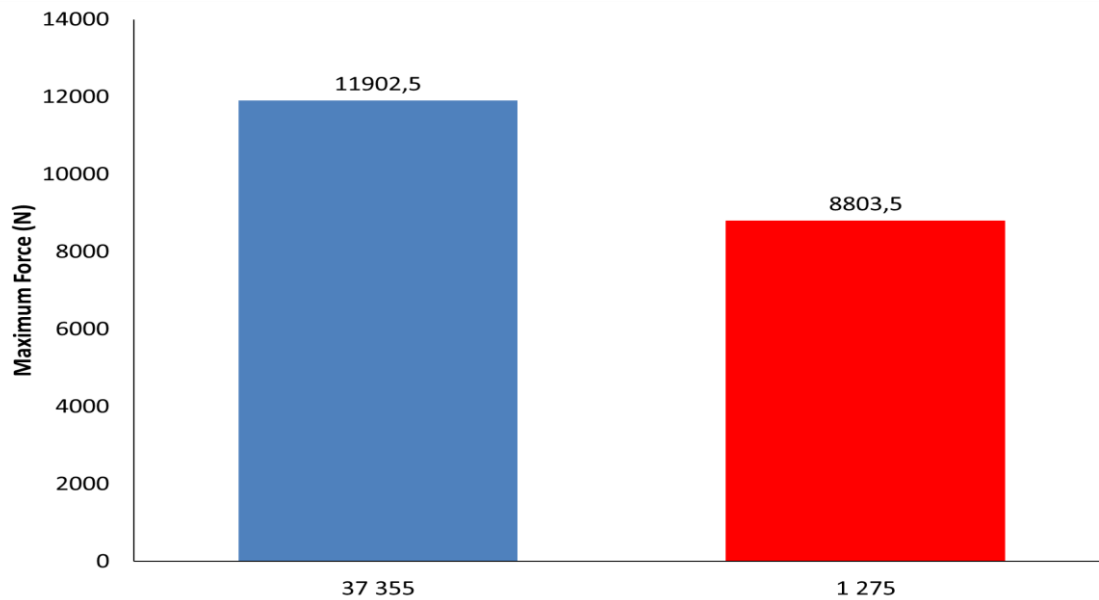
Διάγραμμα 13 (Σελίδα 62): Στο διάγραμμα αυτό συγκρίθηκαν 2 δοκίμια διαφορετικών χαλύβων (S275NL και S355NL) με κοινό ρυθμό φόρτισης ίσο με 1 mm/min. Όπως αναμενόταν, ο χάλυβας S355NL εμφανίζεται μεγαλύτερο όριο διαρροής από τον S275NL.



Διάγραμμα 14 (Σελίδα 63): Στο διάγραμμα αυτό συγκρίθηκαν 2 δοκίμια διαφορετικών χαλύβων (S275NL και S355NL) με κοινό ρυθμό φόρτισης ίσο με 2 mm/min. Όπως αναμενόταν, ο χάλυβας S355NL εμφανίζεται μεγαλύτερο όριο διαρροής από τον S275NL.



Διάγραμμα 15 (Σελίδα 64): Στο διάγραμμα αυτό συγκρίθηκαν 2 δοκίμια διαφορετικών χαλύβων (S275NL και S355NL) με κοινό ρυθμό φόρτισης ίσο με 4 mm/min. Όπως αναμενόταν, ο χάλυβας S355NL εμφανίζεται μεγαλύτερο όριο διαρροής από τον S275NL.



13. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη της κάμψης με διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης διαβρωμένων και μη δοκιμίων υπό διαφορά pH. Με την υλοποίηση αυτής της εργασίας δόθηκε η δυνατότητα κατανόησης των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των μετάλλων και του τρόπου επιρροής τους σε διάφορους τομείς της καθημερινότητας μας. Επιπλέον, δόθηκε η δυνατότητα κατανόησης του τρόπου διαμόρφωσης των ιδιοτήτων τους, ενώ παράλληλα παρουσιάστηκαν στοιχεία, που αφορούν τα κράματα σιδήρου και άνθρακα και παράλληλα την ονοματολογία χαλύβων, σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα. Επίσης, σημαντικά μπορούν να θεωρηθούν τα στοιχεία, που αφορούν τη διαδικασία της κάμψης, θραύσης και μηχανισμών ρηγματώσεων. Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον εστιάζεται στη χρήση των μη – κραματωμένων κατασκευαστικών χαλύβων, αλλά και στους χάλυβες υψηλής αντοχής, οι οποίοι αξιοποιούνται ολοένα και περισσότερο. Επιπλέον, με την εργασία αυτή αναδείχτηκε ο ρόλος της χρήσης των χαλύβων στη ναυπηγική βιομηχανία και ταυτόχρονα παρουσιάστηκαν οι γενικές αρχές διάβρωσης χαλύβων.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονιστεί η χρησιμότητα των αποτελεσμάτων που προέκυψαν μέσα από την πειραματική διαδικασία, τα οποία συμφωνούν με την σχετική θεωρία της φυσικής και πιο συγκεκριμένα με την αντοχή των υλικών. Όπως είδαμε οι μη διαβρωμένοι χάλυβες παρουσίασαν καλύτερες ιδιότητες και μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με αυτούς που είχαν διαβρωθεί για ένα ή δύο μήνες. Αντίστοιχα αυτοί που είχαν διαβρωθεί για ένα μήνα παρουσίασαν καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με αυτούς που είχαν διαβρωθεί για δύο μήνες. Μια άλλη παράμετρος του πειράματός μας ήταν η ταχύτητα βυθίσματος του εμβόλου η οποία κυμαινόταν σε 1mm/min, 2mm/min, 4mm/min. Σύμφωνα με την αντίστοιχη θεωρία όσο αυξάνεται η ταχύτητα βυθίσματος παρατηρείται και αύξηση του Ultimate tensile strength (UTS) και μείωση της ολκιμότητας, κάτι που παρατηρήθηκε και στα διαγράμματά μας καθώς έφταναν σε υψηλότερες τάσεις όσο η ταχύτητα αυξανόταν. Επίσης η διαφορά των δύο χαλύβων που είχαμε στη διάθεση μας, έγινε αντιληπτή μέσα από το πείραμά μας. Ο S355NL ο οποίος έχει ελάχιστη τιμή ορίου διαρροής τα 355 MPa είχε σαφώς καλύτερη αντοχή και έφτασε σε υψηλότερες τάσεις πριν καμφθεί σε σχέση με τον S275NL που έχει όριο διαρροής τα 275 MPa.

Η συνέχεια αυτής της έρευνας θα μπορούσε να αφορά τη μελέτη της μικροδομής των χαλύβων μας πριν και μετά από την διάβρωση και την κάμψη τους καθώς και τις μεθόδους που μπορούν να ακολουθηθούν για να αποκτήσουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες.

Τέλος, η μελέτη και η αξιολόγηση των δεδομένων αυτής της έρευνας μπορούν να αξιοποιηθούν σε περαιτέρω έρευνες για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των διαβρωμένων ναυπηγικών χαλύβων.

Βιβλιογραφία

- Αλεξόπουλος, Ν., (2013), *Μελέτη ιδιοτήτων επιψευδαργυρωμένων δοκιμίων χάλυβα*, ΕΜΠ, Αθήνα
- Μαγκανάρης, Δ., (2000), *Διπλωματική Εργασία*, ΕΜΠ, Αθήνα
- Μανδήτσιος. Γ. Ν., (2012), *Προστασία χάλυβα & σύνθετων υλικών σε τεχνητό θαλάσσιο περιβάλλον*, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ
- Παντελής, Δ. Ι & Τσιούρβα, Θ., (2006), *Διάβρωση και Προστασία Ναυπηγικών Κατασκευών*, Έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα
- Παντελής, Δ. Ι. & Χρυσουλάκης, Δ., (2007), *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*, ΕΜΠ, Αθήνα, Εκδόσεις Παπασωτηρίου,
- Παπάζογλου, Β. Ι., (1995), *Ναυπηγική Τεχνολογία*, Έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα
- Πασπαλάς, Κ., (2009), *Η ευρωπαϊκή τυποποίηση των χαλύβων και χυτοσιδήρων Σύλλογος Μηχανολόγων- Ηλεκτρολόγων Β. Ελλάδος*, Θεσσαλονίκη
- Σαριδάκης, Α. Ν., (2011), *Μελέτη Μηχανικών Ιδιοτήτων Ηλεκτρολυτικών Επικαλύψεων Ψευδαργύρου για Ηλεκτρομηχανολογικές Εφαρμογές*», Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ,
- Σπυρέλλης, Ν.Σ., (1997), : *Τεχνολογία Επιμεταλλώσεων*», Έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα
- Munger, C. G., (1997), *Corrosion Prevention by Protective Coatings*, NACE Publications
- Αγόρος Β.. (2012), *Δοκιμές κάμψεως τριών σημείων σε νέα μη εμπορική μηχανή με σύστημα καταγραφής των ανοιγμένων παραμορφώσεων*, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης
- Γιαννακόπουλος, Κ., (2012), *Πειραματική αντοχή Υλικών*, ΑΤΕΙ Πειραιά, Πειραιάς
- Beer, F. P. & Johnston, E., R., (2003), *Μηχανική των Υλικών*, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Τζιόλα, 2η Έκδοση