



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

**Προσομοίωση της θερμής και ψυχρής έλασης κράματος
αλουμινίου με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων**

Διπλωματική Εργασία

Ράπτης Δημήτριος

Επιβλέπων: Dr. – Ing. Σπύρος Παπαευθυμίου, Επίκουρος Καθηγητής



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

Προσομοίωση της θερμής και ψυχρής έλασης κράματος αλουμινίου με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

Διπλωματική Εργασία

Ράπτης Δημήτριος

Επιβλέπων: Dr. – Ing. Σπύρος Παπαευθυμίου, Επίκουρος Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 23/07/2016

Γ. Φούρλαρης, Καθηγητής(Υπογραφή)

Δ. Πάνιας, Καθηγητής(Υπογραφή)

Σπ. Παπαευθυμίου, Επικ. Καθηγητής(Υπογραφή)

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	6
Εισαγωγή.....	7
Σκοπός.....	7
Κίνητρο διπλωματικής εργασίας.....	8
Περίληψη.....	9
Synopsis.....	10
Μέρος Πρώτο.....	13
1. Θεωρία της Πλαστικότητας.....	13
1.1. Τάση και παραμόρφωση.....	13
1.1.1. Η πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης.....	14
1.2. Τανυστής των τάσεων.....	16
1.2.1. Ο κύκλος του Mohr.....	18
1.2.2. Παραμόρφωση.....	19
1.2.3. Ρυθμός παραμόρφωσης.....	20
1.3. Τάση ροής του υλικού.....	22
1.3.1. Κριτήρια Διαρροής.....	22
1.3.2. Κριτήριο Tresca.....	22
1.3.3. Κριτήριο Von Mises.....	23
1.3.4. Κανόνες Ροής του Υλικού.....	24
1.3.5. Επίδραση της ενδοτράχυνσης στο γεωμετρικό τόπο διαρροής.....	25
1.3.6. Μεταφορά θερμότητας.....	26
1.3.7. Τριβή και λίπανση.....	28
1.3.8. Μοντέλα τριβής.....	30
2. Μορφοποίηση αλουμινίου.....	31
2.1. Ιστορική αναδρομή αλουμινίου.....	31
2.2. Δομή αλουμινίου και Φυσικές ιδιότητες του.....	31
2.3. Κράματα αλουμινίου.....	33
2.3.1. Ονοματολογία κραμάτων αλουμινίου.....	35
2.3.2. Τυποποίηση κατεργασιών αλουμινίου.....	37
3. Έλαση.....	39
3.1. Γενικά – Ορισμός.....	39

3.2. Θερμή έλαση αλουμινίου	41
3.3. Ψυχρή έλαση αλουμινίου	42
3.1.1. Διάκριση προϊόντων έλασης	42
3.1.2. Μηχανές έλασης : Ορισμός και Διάκριση	44
4. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων	49
4.1. Γενικά.....	49
4.2. Βασικές Έννοιες	49
4.3. Στατική-έμμεση μέθοδος και άμεση-δυναμική μέθοδος.....	52
4.4. Μηχανική της παραμόρφωσης στη Μ.Π.Σ.....	53
Μέρος Δεύτερο	56
5. Πειραματική Διαδικασία	56
5.1. Προετοιμασία.....	56
5.2. Θερμοκρασιακή Μελέτη	68
5.3. Μελέτη της επίδρασης διαφορετικού υποβιβασμού της πλάκας.....	68
5.4. Μελέτη επίδρασης της θερμοκρασίας της πλάκας στη δύναμη έλασης	69
5.5. Συγκριτική μελέτη έλασης του κράματος 7075 σε δύο διαφορετικές καταστάσεις του	69
5.6. Αποτελέσματα - Σχολιασμός	70
5.6.1. Θερμοκρασιακή Μελέτη	70
5.6.2. Μελέτη της επίδρασης διαφορετικού υποβιβασμού της πλάκας κατά τη θερμή έλαση.....	74
5.6.3. Μελέτη επίδρασης της θερμοκρασίας στη δύναμη έλασης.....	79
5.6.4. Συγκριτική μελέτη έλασης του κράματος 7075 σε δύο διαφορετικές καταστάσεις του	84
6. Σύνοψη και Ερευνητική εξέλιξη	87
6.1. Συμπεράσματα	87
6.2. Συζήτηση και Μελλοντική Έρευνα	87
6. Βιβλιογραφία.....	89

‘Μονοτονία’

*Την μια μονότονην ημέραν άλλη
μονότονη, απαράλλακτη ακολουθεί. Θα γίνουν
τα ίδια πράγματα, θα ξαναγίνουν πάλι
οι όμοιες στιγμές μας βρίσκουνε και μας αφήνουν.*

*Μήνας περνά και φέρνει άλλον μήνα.
Αυτά που έρχονται κανείς εύκολα τα εικάζει·
είναι τα χθεσινά τα βαρετά εκείνα.
Και καταντά το αύριο πια σαν αύριο να μη μοιάζει.*

Κ.Π. Καβάφης

(Από τα Ποιήματα 1897-1933, Ίκαρος 1984)

Ευχαριστίες

Θα ήθελα μέσα από την καρδιά μου να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου, που βρίσκονται παρόντες στην κάθε μου προσπάθεια και με υποστηρίζουν με κάθε δυνατό τρόπο.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Dr. – Ing. Σπύρο Παπαευθυμίου, Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π., πρωτίστως, γιατί μου εμπιστεύτηκε ένα τόσο σύγχρονο και ενδιαφέρον θέμα διπλωματικής εργασίας, αλλά φυσικά και κύρια για την διαρκή του επιστημονική καθοδήγηση, τη συμπαράσταση και την ενθάρρυνσή του, για την αμέριστη υποστήριξή του σε κάθε επίπεδο και βήμα μέχρι την περαίωση της προσπάθειάς μου ως και την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Τον ευχαριστώ θερμά για την οργάνωση της παραμονής μου κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου στις εταιρείες ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε. και ΕΛΒΑΛ Α.Ε., αλλά και το διαρκές του ενδιαφέρον.

Κατόπιν, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου προς την εταιρία ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε., ερευνητική εταιρεία της ΒΙΟΧΑΛΚΟ Α.Ε. (Viohalco S.A.) για την παροχή, πρώτα απ'όλα του απαραίτητου εξοπλισμού για την περαίωση του υπολογιστικού μέρους της παρούσας διπλωματική εργασίας, για την οργάνωση της παραμονής μου στην εταιρεία ΕΛΒΑΛ Α.Ε., αλλά και για την καθοδήγηση, που μου παρείχαν τα στελέχη της σε κάθε βήμα της προσπάθειάς μου.

Ευχαριστώ θερμά τον κ. Ευάγγελο Γαβαλά, υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π. και εργαζόμενο στην ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε. για την αμέριστη συμπαράστασή του, την υποστήριξη και την επιστημονική συζήτηση, που είχαμε τους τελευταίους έξι μήνες.

Τέλος, εκφράζω τις ευχαριστίες μου προς τη διοίκηση της ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε., ιδιαίτερα τον κ. Κ. Δανιηλίδη, Γενικό Διευθυντή, για την φιλοξενία μου στους χώρους της εταιρείας, αλλά και τη διοικητική υποστήριξή του για την παρουσία μου στους χώρους της ΕΛΒΑΛ Α.Ε., συγκεκριμένα στο θερμό έλαστρο.

Ευχαριστώ τα στελέχη και τους εργαζόμενους της ΕΛΚΕΜΕ για το ευχάριστο κλίμα κατά τη διάρκεια της παραμονής μου στην εταιρεία. Ευχαριστώ θερμά τα στελέχη της ΕΛΒΑΛ, κ. Π. Λουκογεωργιάκη και Μ. Γονιδάκη, αλλά και τους εργαζόμενους της ΕΛΒΑΛ για την κατανόηση και την υποστήριξή τους.

Εισαγωγή

Στην σύγχρονη εποχή είναι επιτακτική ανάγκη η τέλεση βιομηχανικών δοκιμών, με σκοπό την διάνθιση της τεχνολογίας, δηλαδή την βελτιστοποίηση των κατεργασιών, την αύξηση της ποιότητας των προϊόντων και τη μείωση του κόστους παραγωγής της εκάστοτε βιομηχανίας. Ανασταλτικός παράγοντας αυτής της διαδικασίας είναι το σημαντικό κόστος, που συνοδεύει τις βιομηχανικές δοκιμές. Η ανάπτυξη της προσομοίωσης με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων συμβάλλει στην καλύτερη προετοιμασία και στην ελαχιστοποίηση του κόστους στην πλειάδα των περιπτώσεων.

Η προσομοίωση βιομηχανικών δοκιμών, με τη χρήση οποιασδήποτε μεθόδου, αφορά σαφώς σε κατεργασίες διαφόρων ειδών. Μία από τις γνωστότερες και ίσως η πιο διαδεδομένη κατεργασία διαμόρφωσης μετάλλων είναι η έλαση, διότι προσφέρει ευκολία στον αυτοματισμό της, υψηλή παραγωγικότητα, δυνατότητες επέμβασης στη μικροδομή και ως εκ τούτου στις μακροσκοπικές και μικροσκοπικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού, αλλά προσφέρει και σχετική ελευθερία στην πρόσδοση διάφορων γεωμετρικών μορφών.

Είναι σαφές ότι η προσομοίωση αποτελεί ένα εξαιρετικά δύσκολο εγχείρημα. Ως εκ τούτου δεν είναι δυνατόν στα πλαίσια μόνο μιας διπλωματικής εργασίας και για τη διάρκεια μελέτης έξι μηνών να ολοκληρωθεί μια τέτοια προσπάθεια. Για τον λόγο αυτό στην παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρωθήκαμε σε δύο βασικά παραδείγματα, ένα θερμής και ένα ψυχρής έλασης. Αρχικά στήσαμε το μοντέλο και στη συνέχεια, όταν λάβαμε τελικά ένα λειτουργικό σύστημα, πήραμε κάποια ενδεικτικά δεδομένα εισόδου από τη βιομηχανική παραγωγή, διενεργήσαμε μια σειρά προσομοιώσεων κραμάτων αλουμινίου και τις συγκρίναμε μεταξύ τους.

Επομένως, στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μια πρώτη απόπειρα προσομοίωσης της κατεργασίας της έλασης με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Επιδιώκεται να αναδειχθεί η επίδραση των κυριότερων παραμέτρων της έλασης, όπως η μείωση πάχους του τεμαχίου, η μεταβολή της θερμοκρασίας στο έλαστρο και στο τεμάχιο, η τριβή μεταξύ των αντίστοιχων επιφανειών.

Σκοπός

Η παρούσα εργασία στοχεύει σε βαθύτερη κατανόηση των φαινομένων, που διενεργούνται κατά την διάρκεια της έλασης και στον άμεσο συσχετισμό τους με την αλλαγή των παραμέτρων της κατεργασίας. Απώτερος σκοπός η βελτιστοποίησή της. Η χρήση των πεπερασμένων στοιχείων για την επίτευξη αυτού του στόχου δείχνει την άμεση ανάγκη της βιομηχανίας για μελέτες με αριθμητική προσομοίωση με σκοπό την περαιτέρω βελτιστοποίηση της κατεργασίας και της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων

Κίνητρο διπλωματικής εργασίας

Το διαρκές ζητούμενο σε κάθε επιστήμη είναι η κατανόηση του αγνώστου και επακόλουθο είναι η περιγραφή του. Μέσω της γνωστής συλλογιστικής και εκτελεστικής πορείας υπόθεση- πείραμα-συμπέρασμα ολοκληρώνεται η προσέγγιση του προς μελέτη θέματος και, τελικώς συμβάλλουμε ελπίζουμε στην συμπλήρωση της γνώσης. Πνευματικό κίνητρο αυτής της εργασίας αποτελεί η διαρκής και πηγαία ανάγκη για κατανόηση του φαινομένου της έλασης υπό μία νέα προσεγγιστική πορεία, δηλαδή χρησιμοποιώντας ως βασικό εργαλείο τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προσεγγίστηκε η πραγματικότητα της θερμής και ψυχρής έλασης, μέσω της επίδρασης των κυριότερων παραμέτρων τους, χρησιμοποιώντας ως εργαλείο επιστημονικής προσέγγισης την προσομοίωση με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Στα πλαίσια αυτά, κατασκευάστηκαν στο πρόγραμμα προσομοίωσης δύο ρόλλοι εργασίας, η πλάκα αλουμινίου και τέσσερα κουζινέτα έδρασης των ρόλλων και εκτελέστηκαν τέσσερις διαφορετικές μελέτες με την κάθεμία να εξετάζει το φαινόμενο της έλασης υπό διαφορετική γωνία.

- Η πρώτη μελέτη αφορούσε στην απόψυξη της πλάκας από τη θερμοκρασία των 550°C και του ρόλλου εργασίας από τη θερμοκρασία των 150°C και συνέκρινε την απαγωγή θερμότητας σε διαφορετικά σημεία των σωμάτων. Καταλήγοντας, έτσι, ότι στο κέντρο και των δύο σωμάτων ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας τους είναι αρκετά μικρότερος απ'ότι στα άκρα τους.
- Στη δεύτερη μελέτη εξετάστηκε η επίδραση της διαφορετικής μείωσης πάχους της πλάκας αλουμινίου κράματος 5052 στην προκύπτουσα δύναμη έλασης. Και υπολογίστηκε η αύξηση της δύναμης έλασης σε κάθε μεγαλύτερη μείωση πάχους της πλάκας.
- Η τρίτη μελέτη εξέτασε τον αντίκτυπο του παραγόντα της θερμοκρασίας στη δύναμη έλασης της πλάκας αλουμινίου κράματος 5052. Όσο μειώνεται η θερμοκρασία της πλάκας αυξάνεται και η απαραίτητη δύναμη έλασης.
- Στην τέταρτη και τελευταία μελέτη εξετάστηκε η διαφοροποίηση της δύναμης έλασης σε δύο διαφορετικές θερμικές κατεργασίες του ίδιου κράματος αλουμινίου 7075. Στην ανοπτημένη κατάσταση της πλάκας μετρήθηκαν αρκετά μικρές δυνάμεις έλασης συγκριτικά με εκείνες, που μετρήθηκαν στην κατάσταση μετά την υπερβαφή και γήρανση.

Synopsis

This Diploma Thesis attempts to achieve a better understanding of the mechanics of hot and cold rolling using the Finite Element Method (FEM). The software ANSYS R17.0 was used. The Thesis consists of four different simulation studies. These consider the effect of the basic parameters of hot and cold rolling. Two H13 steel work rolls, one 5052 aluminum plate and four H13 steel housings, for the rolls, were designed in ANSYS R17.0 (**Figure 1**). Two symmetry planes were applied to reduce the computational time. Simulation time for every experiment in the second, the third and the fourth study was 10sec.

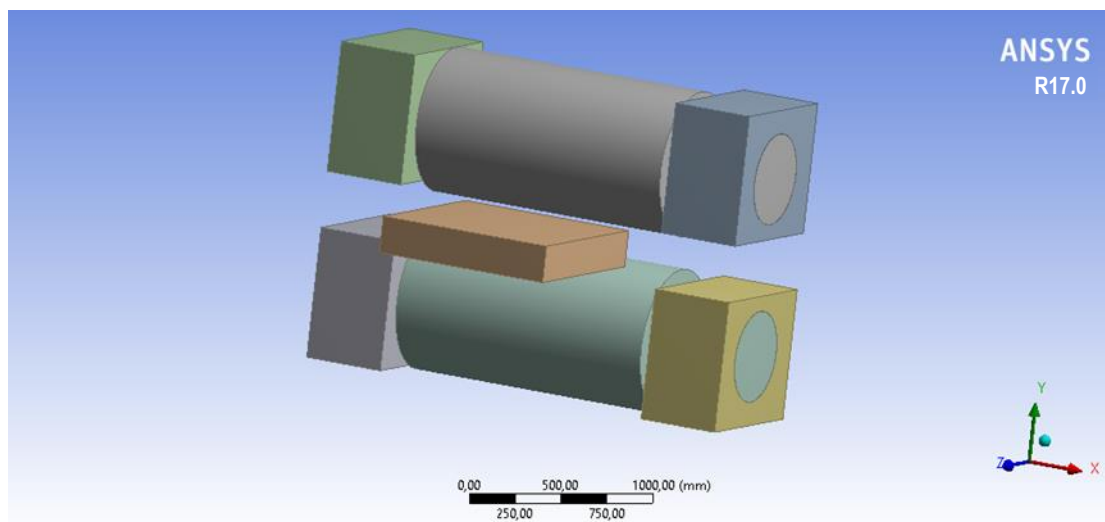


Figure 1. Complete design .

The cooling of the plate and the work roll, for 10min, was simulated in the first study. The cooling of the plate started from the temperature of 550°C and that of the roll from 150°C. The thermal profile of both was observed. Temperature reduction at the center and at the ends of the plate and the roll was measured (**Figure 2.**). The reduction was larger at the ends of the bodies for both materials.

In the second study, different thickness reductions of the plate were investigated and compared to the respective rolling loads in a one-pass hot rolling simulation. The maximum rolling load was observed at the maximum thickness reduction of the plate (**Figure 3.**)

Then, in the third study another parameter of the hot rolling was investigated. For different plate temperatures starting from 550°C the respective rolling loads were identified. At the highest plate temperature, the minimum rolling load was observed in this hot rolling simulation (**Figure 4.**).

The fourth and final study, compares the rolling load produced from the simulation of the cold rolling of an 7075 annealed aluminum alloy and the same 7075 aluminum alloy, but artificially aged this time. The largest rolling load is produced by the artificially aged 7075 alloy and in comparison with the rolling load of the annealed, the increase is about 32,9%.

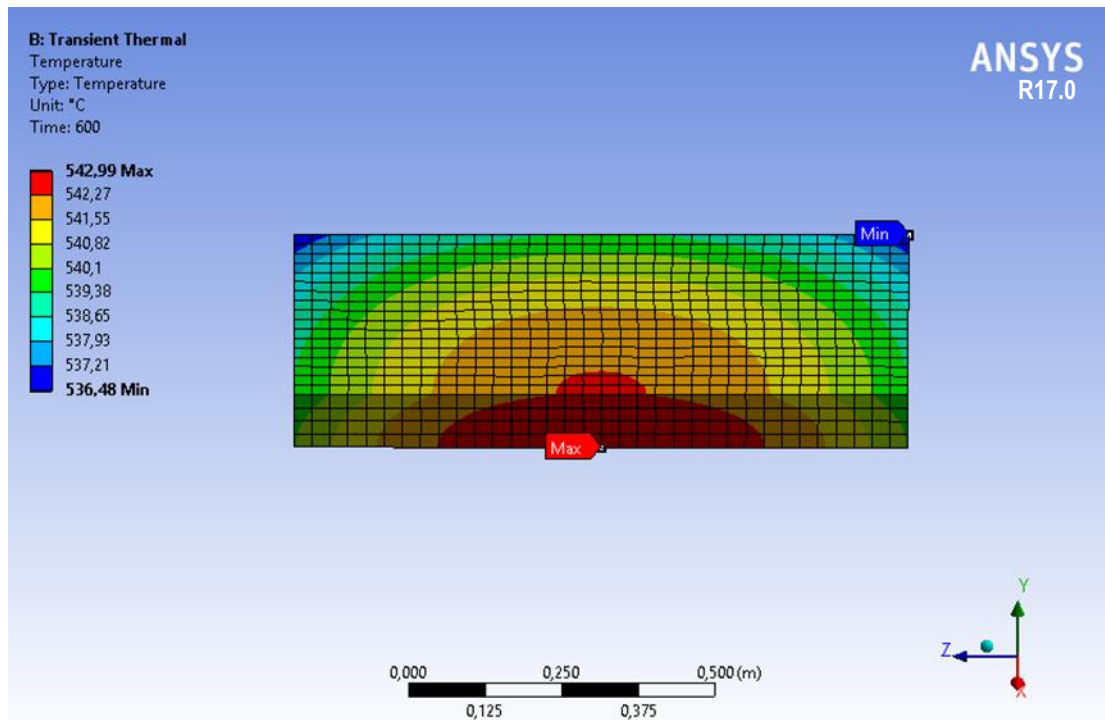


Figure 2. Thermal profile of the aluminum plate.

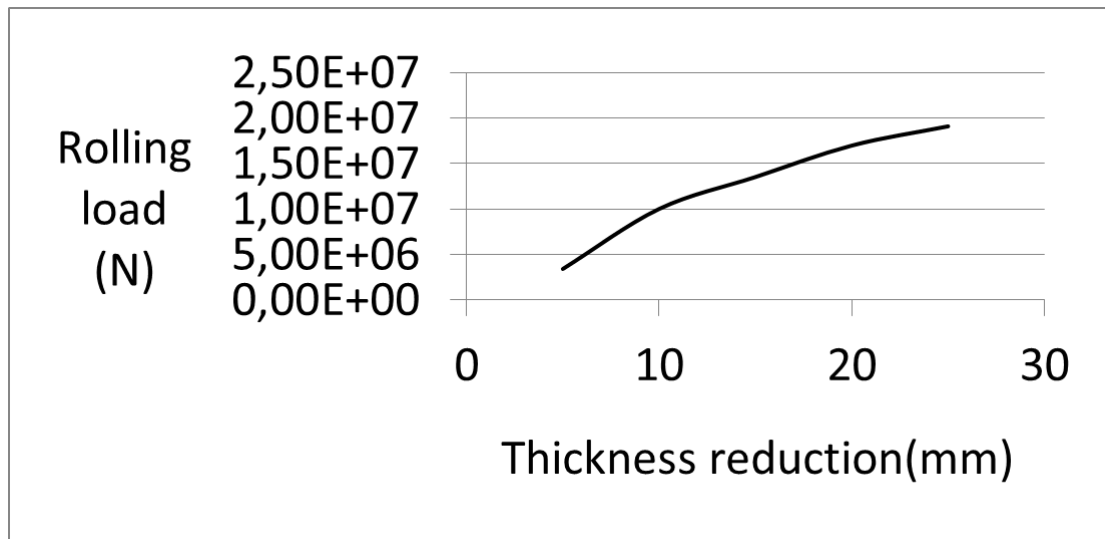


Figure 3. Rolling load – Plate thickness reduction curve.

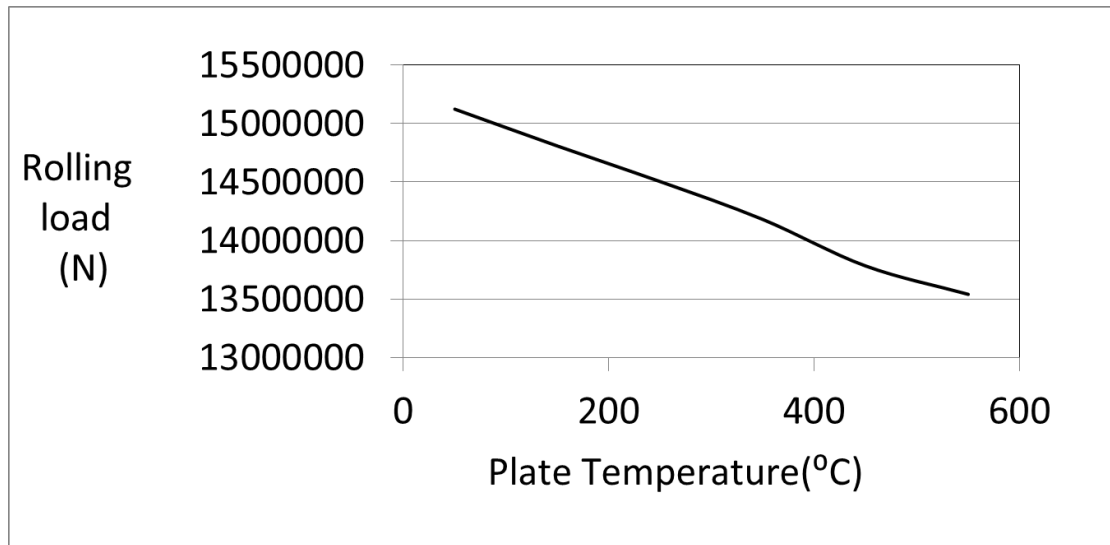


Figure 4. Curve of rolling load and plate temperature.

Μέρος Πρώτο

1. Θεωρία της Πλαστικότητας

Η θεωρία της πλαστικότητας αναφέρεται στην ιδιότητα των υλικών να εισέρχονται στην περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης κάτω από την επιβολή σύνθετου φορτίου όταν το φορτίο ξεπεράσει μία δεδομένη τιμή, η οποία καλείται σημείο ή τάση διαρροής. Μέχρι εκείνο το σημείο τα υλικά παραμορφώνονται ελαστικά. Η παραπάνω θεωρία βασίζεται σε πειραματικές παρατηρήσεις (Chakrabarty, 2006) της μακροσκοπικής συμπεριφοράς των μεταλλικών υλικών σε συνθήκες ομοιόμορφης επιβολής τάσεων. Τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων αυτών συσχετίζονται με τη χρήση μαθηματικών σχέσεων, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τη διερεύνηση και κατανόηση των μηχανισμών της «ροής» των μεταλλικών υλικών κατά τη μορφοποίησή τους, της μεταβολής της θερμοκρασίας τους συνδυαστικά με τη μεταφορά θερμότητας και της ενέργειας και του φορτίου παραμόρφωσης σε οριακές συνθήκες.

Ένα μεταλλικό υλικό θεωρείται ισότροπο και ομοιογενές. Τα κρυσταλλογραφικά επίπεδα των κόκκων, από τους οποίους αποτελείται έχουν τυχαίο προσανατολισμό και οι ιδιότητές τους είναι ίδιες σε όλες τις διευθύνσεις. Κατά την πλαστική παραμόρφωση του υλικού ο προσανατολισμός των κόκκων αλλάζει και η νέα διεύθυνση είναι πλέον εκείνη της «ροής» του υλικού. Με αυτόν τον τρόπο τα υλικά γίνονται ανισότροπα, δηλαδή οι μηχανικές τους ιδιότητες ποικίλλουν ανάλογα με τον προσανατολισμό των κόκκων. Η περιγραφή αυτού του φαινομένου βάσει μαθηματικών μοντέλων είναι εξαιρετικά περίπλοκη και για αυτό το λόγο η ανισοτροπία δεν λαμβάνεται υπόψιν στην περίπτωση μορφοποίησης κοινών μετάλλων (bulk metals).

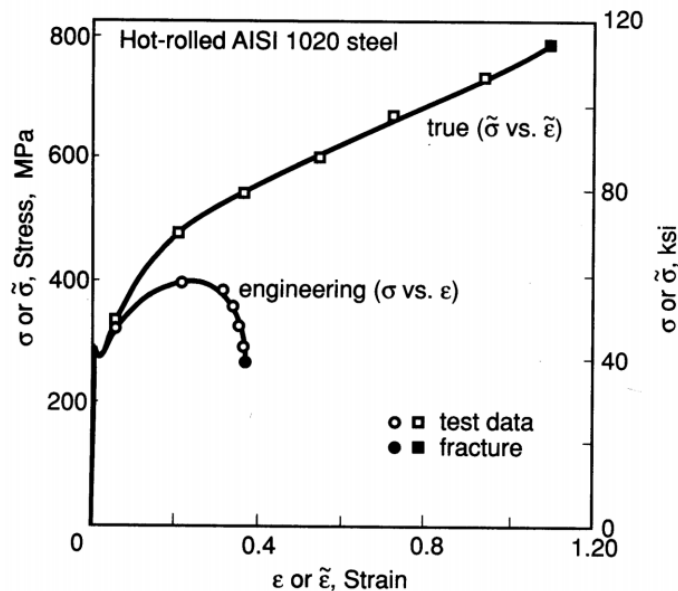
Επιπλέον, κάποιες υποθέσεις γίνονται αποδεκτές, ώστε να γίνει ακριβέστερη η περιγραφή της διαδικασίας παραμόρφωσης (Matsumoto, R., Osumi, Y., Utsunomiya, H., 2014). Αυτές είναι ότι α) το υλικό που παραμορφώνεται θεωρείται συνεχές, β) το φαινόμενο «Bauschinger» δεν λαμβάνεται υπόψιν, γ) ο όγκος παραμένει σταθερός, δ) η τριβή εκφράζεται με απλουστευμένες μαθηματικές σχέσεις.

1.1. Τάση και παραμόρφωση

1.1.1. Η πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης

Η πραγματική τάση ορίζεται ως το φορτίο διαιρούμενο με τη στιγμιαία περιοχή διατομής του δείγματος και μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετική από την ονομαστική τάση, η οποία εκφράζεται ως το φορτίο διαιρούμενο με την κανονική διατομή (**Σχήμα 1.1.**). Η πραγματική παραμόρφωση είναι ο φυσικός λογάριθμος του παρόντος μήκους ενός δείγματος που υφίσταται εφελκυσμό πολλαπλασιαζόμενο με τη αύξηση του μήκους λόγω μίας μικρής αύξησης της τάσης. Επομένως, αν το αρχικό μήκος είναι L_0 και το παρόν μήκος είναι L , τότε η ολική παραμόρφωση είναι :

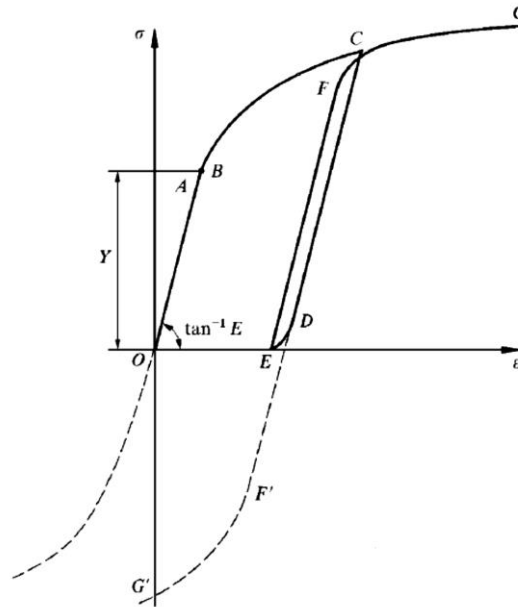
$$\varepsilon = \int \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad 1.1.$$



Σχήμα 1.1. Διάγραμμα πραγματικής τάσης-παραμόρφωσης και μηχανικής τάσης-παραμόρφωσης (Χάλυβας θερμής έλασης AISI 1020) (Φιλόπουλος, 2014)

Στο **Σχήμα 1.2.** απεικονίζεται η πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης η οποία λήφθηκε από πείραμα κυκλικής φόρτισης (Chakrabarty, 2006). Όταν μία εφελκυστική δύναμη ασκείται σε ένα υλικό, τότε αρχικά το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά, δηλαδή παραμορφώνεται ανάλογα με τη δύναμη και επιμηκύνεται ελάχιστα. Η καμπύλη έχει κλίση $\tan^{-1} E$, η οποία ταυτίζεται με το «Young's modulus», (**Σχήμα 1.2.**) (Chakrabarty, 2006). Στην ελαστική περιοχή όταν το δείγμα αποφορτίζεται, επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση. Όταν όμως η ασκούμενη δύναμη υπερβεί ένα όριο (σημείο A), το υλικό εισέρχεται στην ανελαστική ή πλαστική περιοχή, όπου το υλικό παραμορφώνεται πλέον πλαστικά. Τότε η νέα κλίση της καμπύλης ορίζεται ως ο βαθμός σκλήρυνσης του υλικού λόγω παραμόρφωσης ή αλλιώς ενδοτράχυνση. Αν τώρα το φορτίο στο δείγμα, που του έχει ασκηθεί τάση μέχρι και το σημείο C, σταματήσει, τότε υπάρχει αυτό που καλείται ελαστική επαναφορά του υλικού σύμφωνα με την καμπύλη CD, η οποία είναι μία ευθεία γραμμή

κλίσης $\tan^{-1} E$. Όταν το φορτίο αρχίσει να ασκείται και πάλι στο δείγμα, αυτό παραμορφώνεται ελαστικά μέχρι το νέο ,αυτή τη φορά, σημείο F. Αν η φόρτιση συνεχιστεί, τότε το υλικό παραμορφώνεται πλαστικά, όπως δείχνει η καμπύλη FG, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως η εικονική συνέχεια της καμπύλης BC. Αν το υλικό έχει ήδη παραμορφωθεί με το ποσό OE, τότε η πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του είναι η EFG. Όσο μεγαλύτερη η αρχική παραμόρφωση, τόσο υψηλότερο το νέο σημείο διαρροής και πιο επίπεδη η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης. (Gavalas, 2015)



Σχήμα 1.2. Πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για κυκλική φόρτιση.

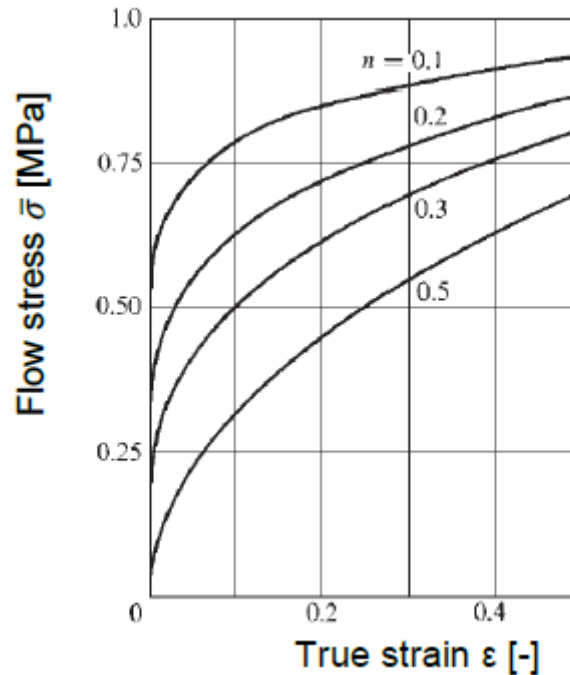
Ένα μέταλλο ήδη εκτενώς παραμορφωμένο έχει πολύ μικρό βαθμό ενδοτράχυνσης άρα πολύ μικρή κλίση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης, ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ιδανικά πλαστικό.

Εάν στο ήδη παραμορφωμένο υλικό ασκηθούν αντίρροπα συμπιεστικά φορτία, τότε επιτυγχάνεται συνήθως ένα χαμηλότερο σημείο διαρροής, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα το υλικό να διαρρέει πλαστικά όταν εφαρμοστεί χαμηλότερη τάση. Το φαινόμενο αυτό καλείται «Bauschinger» και η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης είναι η F'G' (Bauschinger, 1886). Η χαμηλότερη τάση διαρροής (ή σημείο διαρροής) προκύπτει λόγω των παραμένων τάσεων στο υλικό. Κάτα γενική ομολογία, το φαινόμενο «Bauschinger», εκτός από κάποιες πολύ συγκεκριμένες προσεγγίσεις, δεν λαμβάνεται υπόψιν στη θεωρία παραμόρφωσης των υλικών, τα οποία θεωρείται ότι έχουν πανομοιότυπα σημεία διαρροής ανεξαρτήτως της ιστορίας τους.

Όσον αφορά την μαθηματική περιγραφή αυτών των φαινομένων είναι επιτακτική ανάγκη να χρησιμοποιηθούν εξισώσεις κατάλληλες και εύκολα υπολογίσιμες. Τέτοιου τύπου εξισώσεις είναι εμπειρικές και προέρχονται από πειραματικές παρατηρήσεις της πλαστικής συμπεριφοράς των μεταλλικών υλικών (Equation 2.1) (Ludwik, 1909).

$$\bar{\sigma} = C e^n \quad 1.2$$

Όπου $\bar{\sigma}$ είναι η τάση διαρροής, C είναι μία διαρκής τάση, και n είναι ένας δείκτης ενδοτράχυνσης ο οποίος συνήθως παίρνει τιμές από 0 έως 0.5. Η τάση διαρροής ορίζεται ως η τάση, που χρειάζεται το υλικό για να εισέλθει στην πλαστική περιοχή και ως εκ τούτου να παραμορφωθεί πλαστικά. Η εξίσωση θεωρεί ότι δεν υπάρχουν αρχικά τάσεις και ότι η αρχική κλίση είναι άπειρη, εκτός από όταν το $n=0$, το οποίο σημαίνει ότι το υλικό δεν ενδοατραχύνεται περαιτέρω. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του n, τόσο πιο έντονο είναι το χαρακτηριστικό της ενδοτράχυνσης του υλικού (**Σχήμα 1.3.**) (Chakrabarty, 2006).



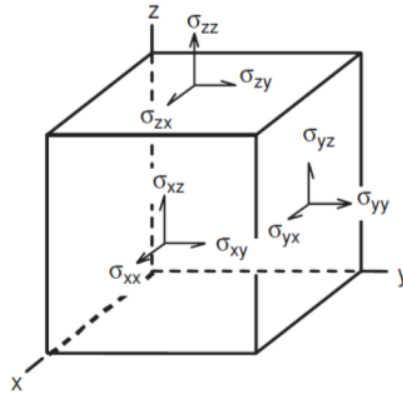
Σχήμα 1.3. Καμπύλες τάσης ροής για διαφορετικά n.

1.2. Τανυστής των τάσεων

Το ποσό της παραμόρφωσης που αποκτά ένα σώμα όταν οι δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό περιγράφονται ως τάσεις. Σύμφωνα με τον ορισμό της τάσης :

$$\sigma_n = \frac{F}{A} \quad 1.3$$

Στην περίπτωση που ένα στοιχείο υποβάλλεται σε τρεις δυνάμεις F1, F2 and F3, αυτές μπορούν να αναλυθούν η κάθε μια σε τρεις συνιστώσες τάσεων. Κατά μήκος του συστήματος συντεταγμένων (**Σχήμα 1.4.**), υπάρχουν τρεις κύριες τάσεις σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} και έξι διατμητικές τάσεις σ_{xy} , σ_{xz} , σ_{yx} , σ_{zx} , σ_{yz} , σ_{zy} (Hosford, 2010).



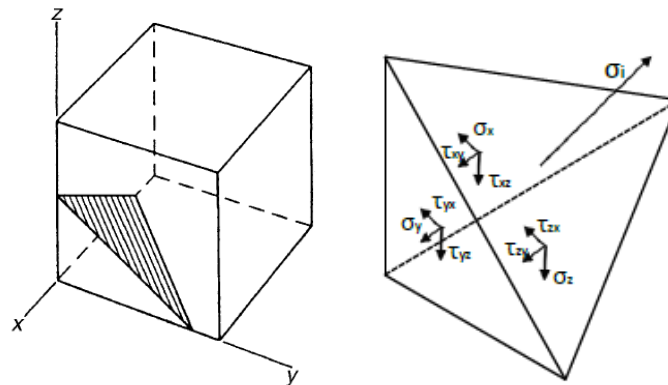
Σχήμα 1.4. Κύριες και διατμητικές τάσεις ως αποτέλεσμα των ασκούμενων δυνάμεων.

Ο ταυιστής των τάσεων ορίζεται ως :

$$\sigma_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yx} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{zy} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{vmatrix} \quad 1.4$$

Για ευκολότερη διάκριση μεταξύ των τάσεων, οι κύριες τάσεις απλοποιούνται ως εξής για παράδειγμα $\sigma_{xx} \equiv \sigma_x$, και για τις διατμητικές τάσεις χρησιμοποιείται το σύμβολο τ , για παράδειγμα $\sigma_{xy} \equiv \tau_{xy}$. Ο πρώτος δείκτης συμβολίζει το επίπεδο όπου ασκείται η τάση και ο δεύτερος τη διεύθυνση με την οποία ασκείται.

Σε μία γενικευμένη περίπτωση, υπάρχουν ορισμένες συντεταγμένες κατά μήκος των οποίων οι διατμητικές τάσεις παύουν να υπάρχουν. Σε αυτό το σύστημα, η κύριες τάσεις συμβολίζονται ως $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.



Σχήμα 1.5. Το τρισδιάστατο ισοζύγιο τάσεων.

Λαμβάνοντας υπόψιν το ισοζύγιο τάσεων ως ένα τετράεδρο το οποίο έχει αποκοπεί από τη γωνία ενός κύβου (Σχήμα 1.5.), μία τάση σ_i ασκείται στο κεκλιμένο επίπεδο. Οι τιμές των τάσεων υπολογίζονται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση (Chakrabarty, 2006) (Altan, T., Ngaile, G., Shen, G., 2005):

$$\sigma_i^3 - I_1\sigma_i^2 - I_2\sigma_i - I_3 = 0 \quad 1.5$$

Όπου,

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad 1.6$$

$$I_2 = -\sigma_x\sigma_y - \sigma_y\sigma_z - \sigma_z\sigma_x + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 = -(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) \quad 1.7$$

$$I_3 = \sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{yx} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{zx}^2 - \tau_{zx}\tau_{xy}^2 = \sigma_1\sigma_2\sigma_3 \quad 1.8$$

1.2.1. Ο κύκλος του Mohr

Ο κύκλος του Mohr είναι η δισδιάστατη απεικόνιση του τανυστή των τάσεων. Χρησιμοποιείται για να καθοριστούν οι τάσεις, που ασκούνται σε ένα περιστρεφόμενο σύστημα αξόνων (Hosford, 2010) (Chakrabarty, 2006).

Σε μία γενική περίπτωση για την κατασκευή του τρισδιάστατου κύκλου, οι τιμές των κύριων τάσεων ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$), αλλά και οι διευθύνσεις τους (l, m, n), πρέπει πρώτα να καθοριστούν (Σχήμα 1.6.). Οι τρεις κύκλοι έχουν ακτίνες:

$$R_1 = \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3); \quad R_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3); \quad R_3 = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \quad 1.9\alpha,\beta,\gamma$$

Και κέντρα με συντεταγμένες:

$$C_1: \left[\frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3), 0 \right]; \quad C_2: \left[\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3), 0 \right]; \quad C_3: \left[\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2), 0 \right] \quad 1.10\alpha,\beta,\gamma$$

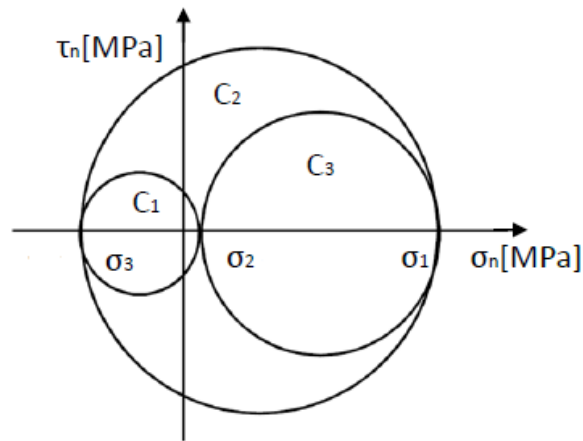
Επομένως, οι εξισώσεις των κύκλων στο σύστημα συντεταγμένων είναι (Σχήμα 1.5):

$$C_1: \tau_n^2 + \left[\sigma_n - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) \right]^2 \geq \left[\frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3) \right]^2 \quad 1.11\alpha$$

$$C_2: \tau_n^2 + \left[\sigma_n - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \right]^2 \geq \left[\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \right]^2 \quad 1.11\beta$$

$$C_3: \tau_n^2 + \left[\sigma_n - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \right]^2 \geq \left[\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \right]^2 \quad 1.11\gamma$$

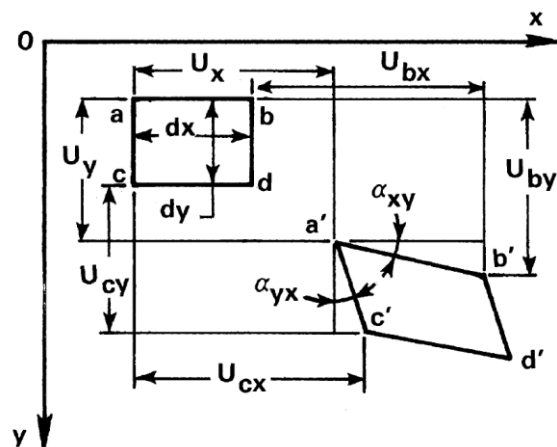
Οι εξισώσεις για τους κύκλους του Mohr δείχνουν ότι όλα τα αποδεκτά σημεία τάσεων (σ_n, τ_n) βρίσκονται είτε πάνω στους κύκλους ή εντός αυτών. Τα σημεία αυτά ικανοποιώντας μία εκ των εξισώσεων, δείχνει ότι βρίσκονται είτε στην περιμετρο είτε εσωτερικά του κύκλου C_2 , αλλά εκτός των κύκλων C_1 και C_3 .



Σχήμα 1.6. Ο τρισδιάστατος κύκλος του Mohr.

1.2.2. Παραμόρφωση

Με σκοπό τη διερεύνηση της έλασης, πρέπει να αναφερθούν και να περιγραφούν ποσοτικά η σχετιζόμενη με το χρόνο παραμόρφωση και η ταχύτητα. Ένα σώμα παραμορφώνεται όταν συμβαίνουν αλλαγές στη σχετική θέση στοιχείων του όγκου. Καθώς το σώμα παραμορφώνεται, συχνά υπόκειται σε κινήσεις κατά τις οποίες όλα τα σημεία του σώματος κινούνται για την ίδια απόσταση και παράλληλα το ένα με το άλλο και σε περιστροφές. Η παραμόρφωση πρέπει να υπολογίζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι ανεξάρτητη των αποτελεσμάτων άλλων κινήσεων. Θεωρούμε ένα απειροελάχιστο δισδιάστατο σώμα, $abcd$, το οποίο υπόκειται μία παραμόρφωση σε παραλληλόγραμμο $a'b'c'd'$ (Σχήμα 1.7.) (Altan, T., Ngaile, G., Shen, G., 2005) (Chakrabarty, 2006) (Altan, T., Oh, S.-I., Gegel, H.L., 1983).



Σχήμα 1.7. Παραμόρφωση στο επίπεδο x-y .

Οι συνταταγμένες του σημείου είναι αρχικά x και y . Έπειτα από μία μικρή παραμόρφωση, το ίδιο σημείο έχει τις συντεταγμένες x' και y' . Αμελώντας τις υψηλότερης τάξης

συνιστώσες, μπορεί να καθοριστεί το μέγεθος της μετατόπισης του σημείου b, U_{bx} , συναρτήσει της μετατόπισης του σημείου a, U_x . Όπως φαίνεται στην εξίσωση 1.12α, η μετατόπιση U_{bx} διαφέρει από τη μετατόπιση U_x κατά το γινόμενο της μερικής παραγώγου της U_x ως προς x επί το μήκος dx. Οι παραπάνω αρχές εφαρμόζονται και σε περιπτώσεις τρισδιάστατης απεικόνισης.

$$u_{bx} = u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x} dx; \quad u_{by} = u_y + \frac{\partial u_y}{\partial y} dy \quad 1.12\alpha,\beta$$

Η παραμόρφωση στην διεύθυνση του x είναι :

$$\varepsilon_x = \frac{u_{bx} - u_x}{dx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad 1.13$$

Αντίστοιχα :

$$\varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad 1.14\alpha,\beta$$

Σε μικρές παραμορφώσεις, οι αλλαγές της γωνίας είναι μικρές και ως εκ τούτου αμελητέες. Επομένως :

$$a_{xy} = \frac{u_{bx} - u_y}{u_{bx} + dx - u_x} \quad 1.15$$

Αντικαθιστώντας από την εξίσωση 1.12 και θεωρώντας ότι το ε είναι πολύ μικρό :

$$a_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x}; \quad a_{yx} = \frac{\partial u_x}{\partial y} \quad 1.16\alpha,\beta$$

Έτσι, οι ολικές γωνιακές παραμορφώσεις είναι :

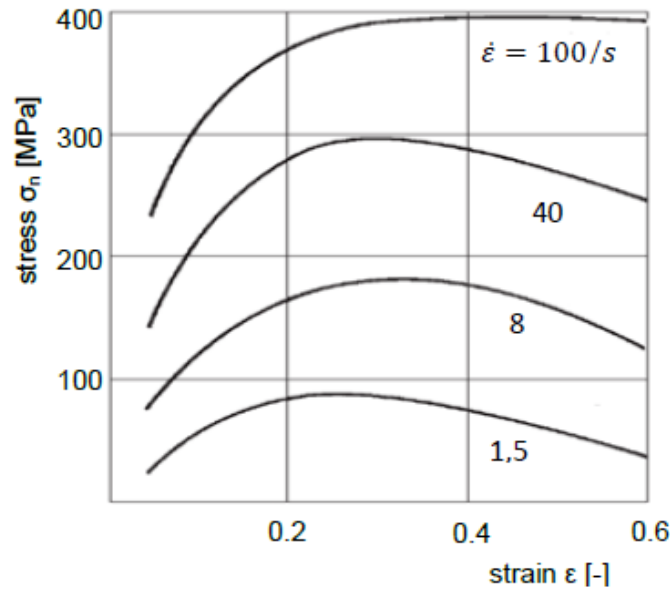
$$\gamma_{xy} = a_{xy} + a_{yx} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \quad 1.17\alpha$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \quad 1.17\beta$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \quad 1.17\gamma$$

1.2.3. Ρυθμός παραμόρφωσης

Ο στιγμιαίος βαθμός παραμόρφωσης σε οποιοδήποτε σημείο του σώματος ορίζεται από την κατανομή των συνιστώσων ταχύτητας κοντά σε αυτό το σημείο. Σε πειράματα υψηλής ταχύτητας εφελκυσμού παρατηρείται, ότι η τάση διαρροής αυξάνει όσο αυξάνει ο ρυθμός παραμόρφωσης. (Σχήμα 1.8.) (Cook, 1957).



Σχήμα 1.8. Οι διαφορετικές καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης ανάλογα με το ρυθμό παραμόρφωσης.

Η ταχύτητα είναι η διαφοροποίηση της μετατόπισης στο χρόνο ή διαφορετικά στις διευθύνσεις x , y και z (Backofen, 1972) (Altan, T., Ngaile, G., Shen, G., 2005).

$$v_x = \frac{\partial u_x}{\partial t}; \quad v_y = \frac{\partial u_y}{\partial t}; \quad v_z = \frac{\partial u_z}{\partial t}; \quad 1.18\alpha,\beta,\gamma$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι η μερική παράγωγος της ταχύτητας u_x στις διευθύνσεις x , y και z .

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{\partial v_x}{\partial x}; \quad \dot{\epsilon}_y = \frac{\partial v_y}{\partial y}; \quad \dot{\epsilon}_z = \frac{\partial v_z}{\partial z}; \quad 1.19\alpha,\beta,\gamma$$

Η κατάσταση, κατά την οποία διενεργείται η παραμόρφωση στις μεθόδους μορφοποίησης, μπορεί να περιγραφεί εξ' ολοκλήρου από τις ταχύτητες, τους ρυθμούς παραμόρφωσης και τις παραμορφώσεις του σώματος στο σύστημα συντεταγμένων. Παρ' ότι δεν θεωρείται λυγισμός ή συστροφή στην κατάσταση αυτή, είναι δυνατό να προσανατολιστεί το σύστημα συντεταγμένων, έτσι ώστε τα στοιχεία να μην υπόκεινται σε διατμητικές, αλλά μόνο σε κύριες τάσεις (εφελκυστικές ή συνθλιπτικές).

Όταν το ποσό της πλαστικής παραμόρφωσης είναι αρκετά μεγαλύτερο από το ποσό της ελαστικής παραμόρφωσης, το οποίο συμβαίνει σε αρκετές μεθόδους μορφοποίησης, η ελαστική παραμόρφωση μπορεί να αγνοηθεί και να μετρηθεί μόνο η πλαστική. Αυτή η υπόθεση μπορεί να εκφραστεί για την παραμόρφωση κατά τους κύριους άξονες, όπως φαίνεται παρακάτω :

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \quad 1.20$$

$$\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_z = 0 \quad 1.21$$

1.3. Τάση ροής του υλικού

Οι κανόνες ροής του υλικού προβλέπουν τις αλλαγές σχήματος, που θα πραγματοποιηθούν κατά τη ροή του. Αρχικά, πρέπει να καθοριστούν τα κριτήρια διαρροής με τέτοιο τρόπο, ώστε να φαίνεται αν το υλικό θα διαρρεύσει ή όχι και αν ναι, τότε να προβλεφθεί με ακρίβεια η παραμόρφωση υπό την επίδραση πολλαπλών τάσεων.

1.3.1. Κριτήρια Διαρροής

Μία μαθηματική σχέση, που ορίζει το όριο μεταξύ του πέρατος της ελαστικής συμπεριφοράς και της αρχής της πλαστικής κάτω από οποιαδήποτε επίδραση συνδυαστικής άσκησης τάσεων, ονομάζεται κριτήριο διαρροής. Το κριτήριο αυτό δεν εφαρμόζεται μονάχα σε ιδανικές καταστάσεις, αλλά και σε ανισότροπα υλικά που τους έχει ασκηθεί φορτίο προγενέστερα. Για τη διεκπεραίωση των μαθηματικών υπολογισμών είναι απαραίτητο να αναφερθούν κάποιες παραδοχές: Πρώτον, ο ρυθμός παραμόρφωσης και οι θερμικές επιδράσεις δεν λαμβάνονται υπόψη. Δεύτερον, οι όποιες επιδράσεις προκύπτουν από την ανομοιομορφία της μικροδομής του υλικού, όπως το φαινόμενο «Bauschinger», αλλά και η υστέρηση του υλικού παραβλέπονται. Τρίτον, το υλικό θεωρείται ισότροπο, δηλαδή οι μηχανικές του ιδιότητες για κάθε προσανατολισμό των κόκκων του είναι οι ίδιες. Τέλος, βάσει ενός απλουστευμένου πειραματικού αποτελέσματος προκύπτει ότι το σημείο διαρροής δεν επηρεάζεται αν ασκηθεί ομοιόμορφη υδροστατική συμπίεση ή εφελκυσμός (Altan, T., Ngai, G., Shen, G., 2005) (Backofen, 1972).

Στα διαγράμματα του Mohr η βασική παράμετρος είναι το μέγεθος των κύκλων και όχι η θέση τους, γιατί καθορίζει αν το υλικό θα εισέλθει στην πλαστική περιοχή. Αν η φορτισμένη κατάσταση βρίσκεται σε σημείο πάνω στον κύκλο ή εκτός αυτού, τότε το υλικό θα διαρρεύσει πλαστικά, διαφορετικά όχι.

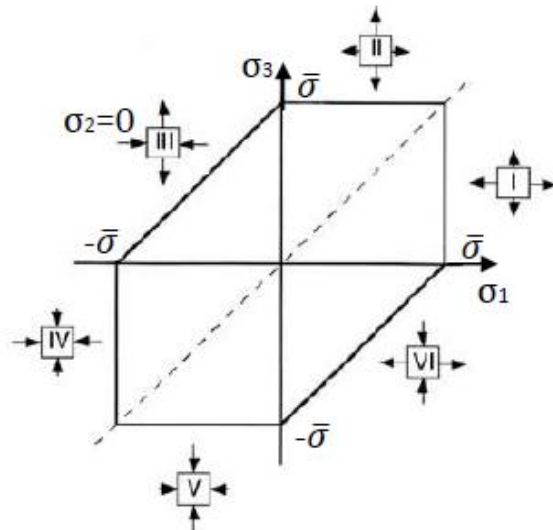
1.3.2. Κριτήριο Tresca

Το απλούστερο από τα κριτήρια διαρροής, είναι το κριτήριο Tresca. Μετά από μία σειρά πειραμάτων εξώθησης μετάλλων, ο «Tresca» συμπέρανε ότι η διαρροή του υλικού συμβαίνει όταν η μεγαλύτερη διατμητική τάση φτάσει μία κρίσιμη τιμή. Σε αυτό το κριτήριο

υπάρχει η παραδοχή ότι η ενδιάμεση κύρια τάση σ_2 δεν έχει καμία επίδραση στη διαρροή του υλικού. Επομένως, το κριτήριο εκφράζεται ως εξής (Hosford, 2010) (Chakrabarty, 2006):

$$\sigma_{max} = \sigma_1 - \sigma_3 = 2\tau_{max} = \bar{\sigma} \quad , \quad \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \quad 1.22$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ο γεωμετρικός τόπος διαρροής, που φαίνεται στο **Σχήμα 1.9**.



Σχήμα 1.9. Διάγραμμα γεωμετρικού τόπου διαρροής σύμφωνα με το κριτήριο «Tresca»

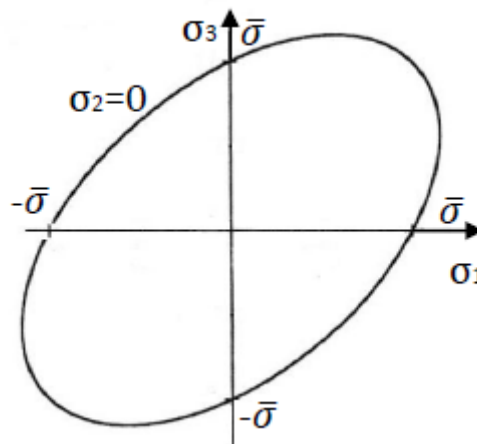
Το παραπάνω κριτήριο εφαρμόζεται σε προβλήματα, στα οποία υπάρχει υψηλός βαθμός συμμετρίας και οι τιμές, αλλά και οι διευθύνσεις των κύριων τάσεων έχουν ήδη καθοριστεί. Αποτελεί πολύ χρήσιμο εργαλείο σε αυτές τις περιπτώσεις, διότι εκτελεί σημαντικές απλουστεύσεις, χωρίς όμως να επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Σε διαφορετικές περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσει σε πολύπλοκους μαθηματικούς υπολογισμούς.

1.3.3. Κριτήριο Von Mises

Το κριτήριο «Von Mises» θεωρεί ότι η πλαστική διαρροή του υλικού είναι απόρροια ενός συνδυασμού κύριων και διατμητικών τάσεων, οι οποίες δεν αλλάζουν τιμή όταν μεταπηδούν από το ένα σύστημα συντεταγμένων στο άλλο και υπολογίζονται ως η μέση τετραγωνική ρίζα της διαμέτρου των τριών κύκλων του «Mohr» όταν οι κύριες ή οι διατμητικές τάσεις φτάσουν μία κρίσιμη τιμή. Για μονοαξονική καταπόνηση εκφράζεται ως:

$$\sigma_{max} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} = \bar{\sigma} \quad 1.23$$

Το κριτήριο «Von Mises» δηλώνει ότι η ελαστική ενέργεια της παραμόρφωσης φτάνει μία χαρακτηριστική τιμή στο σημείο διαρροής. Αυτή είναι η απαραίτητη ενέργεια για την ελαστική αλλαγή του όγκου του υλικού. Έτσι, όλα τα φορτία που προκαλούν αυτή την ελαστική αλλαγή όγκου σε ισότροπα υλικά δεν οδηγούν σε πλαστική διαρροή. Το **Σχήμα 1.10** δείχνει τη μορφή του κριτηρίου Von Mises για $\sigma_2 = 0$ και έχει μορφή έλλειψης.



Σχήμα 1.10. Ο γεωμετρικός τόπος διαρροής του κριτηρίου «Von Mises».

Το κριτήριο διαρροής «Von Mises» μπορεί να γραφεί χωρίς να χρησιμοποιηθούν κύριες τάσεις. Επομένως, έχουμε :

$$(\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 6(\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{xy}^2) = 2\sigma_{max}^2 \quad 1.24$$

1.3.4. Κανόνες Ροής του Υλικού

Οι κανόνες ροής προσδιορίζουν την ροή του υλικού, από το σημείο διαρροής και έπειτα. Για την περιγραφή και ανάλυση της πλαστικής παραμόρφωσης, οι εξισώσεις της παρέχουν τη σχέση μεταξύ των εφαρμοζόμενων τάσεων και του ρυθμού παραμόρφωσης (η κινηματική περιγράφεται από την ταχύτητα, την παραμόρφωση, ϵ , και το ρυθμό παραμόρφωσης, $\dot{\epsilon}$)

$$\dot{\epsilon}_1 = \lambda(\sigma_1 - \sigma_{max}) \quad 1.25\alpha$$

$$\dot{\epsilon}_2 = \lambda(\sigma_2 - \sigma_{max}) \quad 1.25\beta$$

$$\dot{\epsilon}_3 = \lambda(\sigma_3 - \sigma_{max}) \quad 1.25\gamma$$

όπου λ είναι μία μεταβλητή, που εξαρτάται από τις παραμέτρους της κατεργασίας (διεύθυνση της πλαστικής διαρροής, θερμοκρασία, υλικό, παραμόρφωση και ρυθμός παραμόρφωσης). Λαμβάνοντας αυτά υπόψη καταλήγουμε στις εξισώσεις (στην περίπτωση της σ_1):

$$\dot{\epsilon}_1 = \frac{3}{2} \frac{\dot{\epsilon}}{\bar{\sigma}} (\sigma_1 - \sigma_{max}) \quad 1.26$$

Σύμφωνα με την αρχή της κανονικότητας, στο σημείο διαρροής ο λόγος των παραμορφώσεων είναι ίσος με το λόγο των τάσεων που τις προκάλεσαν :

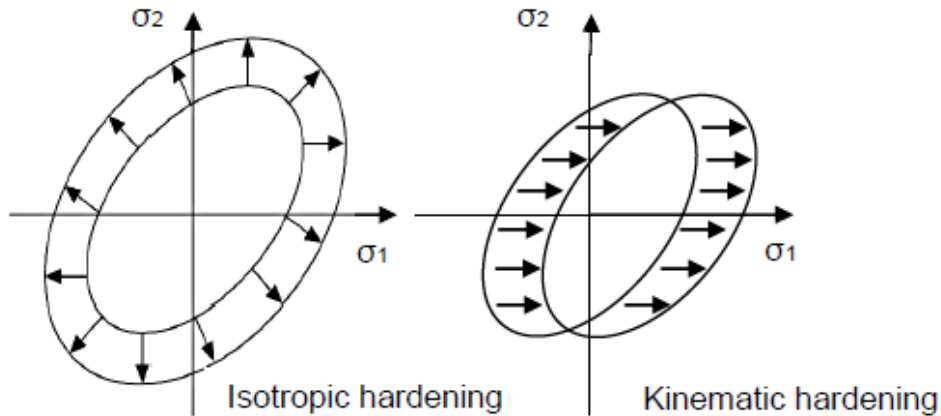
$$\frac{d\epsilon_1}{d\epsilon_2} = -\frac{\partial \sigma_2}{\partial \sigma_1} \quad 1.27$$

Όπου $\partial \sigma_2 / \partial \sigma_1$ είναι η κλίση του γεωμετρικού τόπου διαρροής στο σημείο διαρροής.

1.3.5. Επίδραση της ενδοτράχυνσης στο γεωμετρικό τόπο διαρροής

Στο μοντέλο της ισότροπης σκλήρυνσης επεκτείνεται ο γεωμετρικός τόπος διαρροής λόγω της ενδοτράχυνσης (**Σχήμα 1.11.**). Το σχήμα του γεωμετρικού τόπου παραμένει το ίδιο. Η τάση διαρροής αυξάνεται σύμφωνα με ένα παράγοντα κατά τη διεύθυνση, που ήδη έχει. Η βασική υπόθεση είναι ότι $\sigma = f(\epsilon)$. Παρόλο, που το μοντέλο καλείται ισότροπο, εφαρμόζεται και σε ανισότροπα υλικά.

Ένα εναλλακτικό μοντέλο είναι εκείνο της κινηματικής σκλήρυνσης, το οποίο προβλέπει τη σκλήρυνση μεταφέροντας το γεωμετρικό τόπο διαρροής προς τη διεύθυνση της παραμόρφωσης, χωρίς όμως να αλλάζει το σχήμα του τόπου (**Σχήμα 1.11.**). Αν αυτή η μεταφορά είναι αρκετά μεγάλη, τότε είναι πιθανό η αποφόρτιση του υλικού να προκαλέσει πλαστική παραμόρφωση σε αυτό. Το παραπάνω μοντέλο θεωρείται ότι έχει μεγαλύτερη ακρίβεια στην περιγραφή μικρών παραμορφώσεων όταν έχει αλλάξει το «μονοπάτι» (διεύθυνση) της φόρτισης. Στον αντίποδα, το μοντέλο ισότροπης σκλήρυνσης αντεπεξέρχεται καλύτερα στην περιγραφή της συμπεριφοράς του υλικού κατά τη διάρκεια μεγάλων παραμορφώσεων μετά από μία αλλαγή στη διεύθυνση φόρτισης. (Gavalas, 2015)

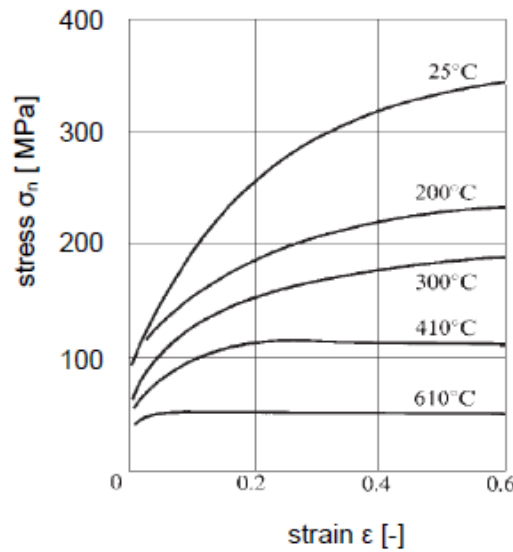


Σχήμα 1.11. Η επίδραση της ενδοτράχυνσης στο γεωμετρικό τόπο διαρροής.

1.3.6. Μεταφορά θερμότητας

Στην έλαση, η θερμότητα που παράγεται είναι ένα κατάφωρο φαινόμενο. Η θερμότητα αυτή έχει καθοριστικό ρόλο επηρεάζοντας άλλες παραμέτρους όπως οι συνθήκες λίπανσης, η ζωή του μηχανικού εξοπλισμού, αλλά και η μικροδομή του ελαστού υλικού και ως εκ τούτου οι μακροσκοπικές και μικροσκοπικές μηχανικές ιδιότητες του. Μεγάλο μέρος του μηχανικού έργου της έλασης μετατρέπεται σε θερμότητα, λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης και της τριβής και μεταφέρεται τόσο στη μηχανή έλασης όσο και στο υπό κατεργασία υλικό και μεταφράζεται σε αύξηση της θερμοκρασίας τους. Η παραγωγή θερμότητας τόσο στο έλαστρο όσο και στο υλικό μπορεί να υπολογιστεί με προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων. (Farren, W.S., Taylor, G.I., 1925) (Chakrabarty, 2006)

Όπως παρουσιάζεται και στο **Σχήμα 1.12.** (Mahtab, F. U., Johnson, Slater, W., 1965) σύμφωνα με δοκιμές, για δοσμένες τιμές παραμόρφωσης, η τάση διαρροής μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του υπό διεργασία εξαρτήματος.



Σχήμα 1.12. Επίδραση της θερμοκρασίας στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης.

Σύμφωνα με τον κο «Altan» (Altan, T., Gerds, A.F., 1970), η μέση στιγμιαία θερμοκρασία, T_A , εκτιμάται ως:

$$T_A = T_W + T_D + T_F - T_T - T_R - T_C \quad 1.28$$

όπου T_W είναι η αρχική θερμοκρασία του υπό διαμόρφωση υλικού, T_D είναι η αύξηση θερμοκρασίας εξαιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης, T_F είναι η αύξηση θερμοκρασίας λόγω της τριβής στην επαφή, T_T είναι η μείωση της θερμοκρασίας λόγω της μεταφοράς θερμότητας στο μηχάνημα, T_R είναι η μείωση της θερμοκρασίας λόγω της ακτινοβολίας της θερμότητας στο χώρο και T_C είναι η πτώση της θερμοκρασίας λόγω της αγωγής της προς το περιβάλλον.

Η αύξηση της θερμοκρασίας εξαιτίας της παραμόρφωσης σε ένα χρονικό διάστημα Δt , είναι η εξής :

$$T_D = \frac{A\bar{\sigma}\dot{\epsilon}\Delta t}{c\rho}\beta = \frac{\bar{\sigma}\Delta\bar{\epsilon}}{Jc\rho}\beta \quad 1.29$$

Όπου $\bar{\sigma}$ είναι η τάση ροής του υλικού υπό διαμόρφωση, $\dot{\epsilon}$ ο ρυθμός παραμόρφωσης, $\Delta\bar{\epsilon}$ είναι η πλαστική παραμόρφωση, που πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια του Δt , A είναι ένας παράγοντας μετατροπής μηχανικής και θερμικής ενέργειας, c είναι η ειδική θερμότητα του υλικού υπό διαμόρφωση, ρ το ειδικό βάρος του υλικού υπό διαμόρφωση και β είναι το κλάσμα παραμόρφωσης, που μετατρέπεται σε θερμότητα ($0 \leq \beta \leq 1$); συνήθως, $\beta = 0.9 \dots 0.95$.

Η αύξηση θερμότητας λόγω τριβής, θ_F , δίνεται ως εξής :

$$T_F = \frac{Af\bar{\sigma}vF\Delta F}{c\rho\rho_\alpha} \quad 1.30$$

Όπου πέρα από τις μεταβλητές που περιγράφηκαν ήδη, f είναι ο συντελεστής τριβής στη διεπιφάνεια υλικού και εξαρτήματος, που ανήκει στο μηχάνημα, ώστε η τάση διατμητικής τριβής να υπολογίζεται ως $\tau = f \bar{\sigma}$, v είναι η ταχύτητα στη διεπιφάνεια υλικού και μηχανήματος και V_a είναι ο όγκος του υλικού υπό διαμόρφωση, ο οποίος εξαρτάται από την αύξηση της θερμοκρασίας.

Η απλούστερη σχέση θερμοκρασίας και ρυθμού παραμόρφωσης, με την τάση είναι εκείνη των «Zener» και «Hollomon» (Blazynski, 1976), οι οποίοι θεώρησαν την πλαστική παραμόρφωση ως μία θερμικά ενεργοποιούμενη διαδικασία. Έτσι, κατέληξαν στην εξής σχέση :

$$\sigma = f \left\{ \dot{\epsilon} e^{\left(\frac{Q}{RT} \right)} \right\} \quad 1.31$$

Όπου, Q είναι η ενέργεια ενεργοποίησης της πλαστικής διαρροής, T η απόλυτη θερμοκρασία πειράματος και R η παγκόσμια σταθερά των αερίων, ίση με 314 J/g mol K.

1.3.7. Τριβή και λίπανση

Σύμφωνα με DIN 50323-3 (50323-3, December 1993), η τριβή είναι μία αλληλεπίδραση μεταξύ συγκεκριμένων επιφανειών δύο σωμάτων, που η σχετική κίνηση τους αντιτίθεται. Η τριβή οδηγεί σε αντίσταση της σχετικής κίνησης της επαφής δύο σωμάτων. Στην έλαση κατέχει κυρίαρχο ρόλο η τριβή μεταξύ της πλάκας και του ρόλου (ράουλου) εργασίας (working roll), αλλά και μεταξύ του ράουλου εργασίας και του ράουλου αντιστήριξης (back-up roll). Για αυτό το λόγο, όποιες παράμετροι επηρεάζουν την τριβή πρέπει να αναλυθούν και να κατανοηθούν, προκειμένου να επιλεγούν τα κατάλληλα λιπαντικά μέσα με στόχο την παραγωγή ανώτερων ποιοτικά προϊόντων.

Η τριβή διακρίνεται σε δύο βασικούς τύπους, στη στατική τριβή και στην τριβή ολίσθησης :

Η τριβή ολίσθησης μεταξύ δύο επιφανειών που εφάπτονται και κινούνται η μία πάνω στην άλλη, οφείλεται στη συνδυασμένη επίδραση της προσκόλλησης των επίπεδων επιφανειών μεταξύ των, της τραχύτητας τους και της αλληλεπίδρασης της και των σωματιδίων, που αποκολλώνται είτε λόγω φθοράς των επιφανειών είτε λόγω εξωγενών παραγόντων, αλλά παραμένουν στη διεπαφή.

Η τριβή κύλισης αποτελείται από πολλά φαινόμενα, γεγονός που την καθιστά εξαιρετικά περίπλοκη. Ένα από αυτά τα φαινόμενα είναι η ολίσθηση κατά την έλαση, αλλά και οι απώλειες ενέργειας λόγω ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης. Διακρίνεται σε δύο κατηγορίες, κατά την πρώτη μεταδίδονται εφαιπτομενικές δυνάμεις, όπως για παράδειγμα στα δισκόφρενα και τις ρόδες του αυτοκινήτου και κατά τη δεύτερη μεταδίδονται μικρές εφαιπτομενικές δυνάμεις. Στο **Σχήμα 1.13**, απεικονίζεται η καμπύλη του «Stribeck».

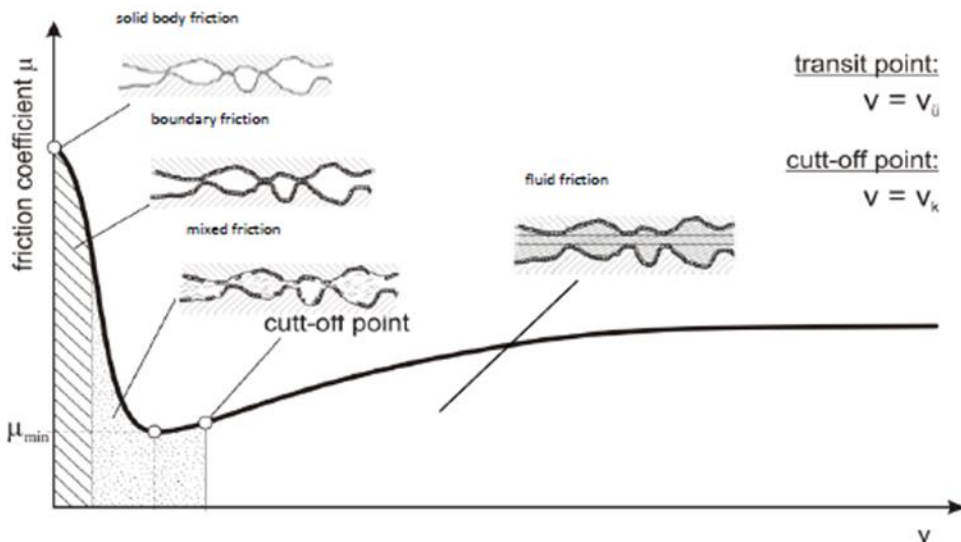
Υπάρχουν τέσσερις τύποι λίπανσης, οι οποίοι βασίζονται στον συντελεστή της τριβής και και το πάχος του στρώματος λιπαντικού μέσου, και είναι οι εξής :

Ξηρά τριβή: Υπάρχει άμεση επαφή της επιφάνειας του υλικού με το εξάρτημα της μηχανής, χωρίς καμία προσθήκη λιπαντικού. Προκαλείται φθορά και αποκόλληση υλικού και των δύο επιφανειών ανάλογα πάντα με τις μηχανικές ιδιότητες τους. Για αυτό το λόγο, αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένες εφαρμογές, που η κατεργασιμότητα του υλικού είναι σαφώς υψηλή ή η τριβή δεν παίζει καθοριστικό ρόλο στην τελική ποιότητα του προϊόντος.

Οριακή τριβή: Ένα λεπτό στρώμα απορροφάται φυσικά από την επιφάνεια του μετάλλου ή προσκολλάται χημικά σε αυτή και προσφέρει ένα «εμπόδιο» ή διαφορετικά μία διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα σε δύο μεταλλικές επιφάνειες, που βρίσκονται σε επαφή, όταν το λιπαντικό μέσο σε μεγάλη ποσότητα δεν έχει αποτέλεσμα. Παρόμοια με τις ξηρές συνθήκες η τριβή είναι υψηλή.

Τριβή μικτού στρώματος: Μικρή ποσότητα λιπαντικού σχηματίζει πολύ λεπτό στρώμα φυσικά ή με τέλεση χημικής αντίδρασης και έτσι αποφεύγεται η άμεση επαφή των δύο επιφανειών και τελικά μειώνονται, η τριβή μεταξύ τους, και η φθορά. Αποτελεί ένα εμπόδιο για τις δύο επιφάνειες και αν υπάρχει αρκετό λιπαντικό, μπορεί να δράσει ως ένα υγρό μέσο το οποίο μπορεί να δεχτεί μεγάλη πίεση και με αυτό τον τρόπο τελικά να μετριάσει την τριβή. Αυτή είναι και η πιο συνήθης κατάσταση λίπανσης στις κατεργασίες διαμόρφωσης.

Τριβή ρευστού: Ολοκληρωτικός διαχωρισμός των μεταλλικών επιφανειών στην επαφή από ένα παχύ στρώμα ρευστού λιπαντικού. Εφόσον οι δύο επιφάνειες δεν βρίσκονται πλέον σε επαφή, λαμβάνουν χώρα υδροδυναμικά φαινόμενα, δηλαδή η τριβή εξαρτάται από την αντίσταση, που προσφέρει το ρευστό. Πέρα όμως από τον ρόλο μείωσης της τριβής, το λιπαντικό μέσο επιδρά καθοριστικά στη μεταφορά θερμότητας.



Σχήμα 1.13. Η καμπύλη του «Stribeck» απεικονίζει διάφορα συστήματα τριβής.

1.3.8. Μοντέλα τριβής

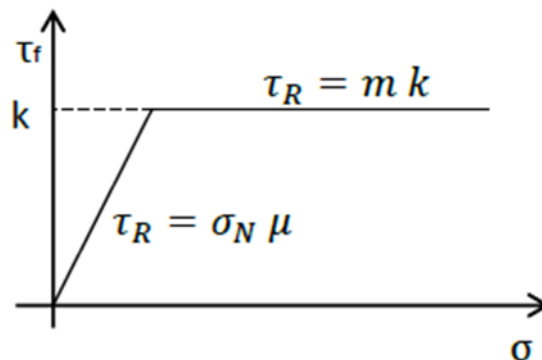
Δύο πρότυπα μοντέλα τριβής χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την τριβολογική κατάσταση στις μεθόδους μορφοποίησης μεταλλικών υλικών : το πρότυπο μοντέλο Coulomb και and το μοντέλο τριβής διάτμησης. Καθώς η τριβή είναι ένα άκρως σύνθετο φαινόμενο και τα δύο πρότυπα μοντέλα συνοψίζονται σε έναν αδιάστατο συντελεστή. Στο μοντέλο «Coulomb» χρησιμοποιείται ο συντελεστής μ , για να ποσοτικοποιήσει την τριβή της διεπιφάνειας. Ο συντελεστής αυτός εκφράζεται ως ο λόγος της διατμητικής τάσης τριβής τ_R , που απαιτείται για να αρχίσει ή να διατηρηθεί η σχετική κίνηση των δύο επιφανειών, προς την κύρια τάση σ_N , που κρατά τα δύο σωματά σε επαφή.

$$\mu = \frac{\tau_R}{\sigma_N} \quad 1.32$$

Σε πολλές μεθόδους μορφοποίησης μεταλλικών υλικών η τάση της διεπιφάνειας, σ_N , μπορεί να φτάσει σε υψηλότερες τιμές από εκείνη της τάσης διαρροής του υλικού. Για αυτό, η γραμμική σχέση μεταξύ των τ_R και σ_N , μπορεί να μην είναι ακριβής ή έγκυρη σε επαφές υψηλής πίεσης γιατί η διατμητική τάση, τ_R , δεν μπορεί να υπερβεί τη διατμητική αντοχή, k , του παραμορφωμένου υλικού. Επομένως, ο συντελεστής τριβής, μ , είναι ανεπαρκής όταν το γινόμενο $\mu \times \sigma_N$ υπερβαίνει το τ_R και για αυτό δημιουργήθηκε το πρότυπο μοντέλο της τριβής διάτμησης (Orowan, 1943):

$$\tau_R = f \bar{\sigma} = m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} = m k \quad 1.33$$

όπου f είναι ο παράγοντας τριβής, m is the shear factor, $0 \leq m \leq 1$; k είναι η διατμητική αντοχή; και $\bar{\sigma}$ είναι η τάση διαρροής του προς παραμόρφωση υλικού. Σε αυτό το μοντέλο, η διατμητική τάση τριβής, τ_R , σε χαμηλές πιέσεις είναι ανάλογη της κανονικής πίεσης, η οποία δίνεται από το μοντέλο «Coulomb». Αντιθέτως όμως με το προηγούμενο μοντέλο, η τάση τ_R είναι ίση με την διατμητική αντοχή, k , σε υψηλής πίεσης διεπιφάνεια, σ , όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1.14**.



Σχήμα 1.14. Πρότυπο μοντέλο τριβής διάτμησης.

Όταν δύο σώματα βρίσκονται σε επαφή, δεν αλληλεπιδρούν όλες οι εμφανείς επιφάνειες. Υπάρχουν διακεκριμένες περιοχές της επιφάνειας, εξαιτίας της τραχύτητας, που έχουν, και είναι αυτές που έρχονται σε επαφή. Το πρότυπο μοντέλο διατμητικής τριβής δεν λαμβάνει υπόψη αυτές τις περιοχές, αν και αυτές είναι που έρχονται σε επαφή στην πραγματικότητα. Για να ληφθούν υπόψη λοιπόν, εισήχθη ένα τροποποιημένο πρότυπο μοντέλο [WANH74], όπου ο συντελεστής, α , της πραγματικής επιφάνειας επαφής είναι ο λόγος της πραγματικής επιφάνειας επαφής, A_r , προς την φαινομενική επιφάνεια επαφής, A_a . Το γενικό μοντέλο διατμητικής τριβής προκύπτει ως εξής :

$$\tau_f = f' \alpha k = m_\tau \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \quad 1.34$$

όπου f' είναι ο τροποποιημένος παράγοντας τριβής, m_τ είναι ο τροποποιημένος διατμητικός παράγοντας ως συνάρτηση της αληθινής περιοχής επαφής, $\bar{\sigma}$ είναι η τάση διαρροής, και α είναι ο συντελεστής της πραγματικής επιφάνειας επαφής, A_r / A_a . Σε αυτό το μοντέλο η διατμητική τάση τριβής, τ_f , εκφράζεται συναρτήσει του συντελεστή επιφάνειας επαφής α .

Το αναλυθέν μοντέλο αντιπροσωπεύει επαρκώς τις συνθήκες τριβής της έλασης αν διαλεχθεί η κατάλληλη τιμή, η οποία όμως εξαρτάται από την επίδραση παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, ο τύπος του υλικού και η χρήση, αλλά και το είδος του λιπαντικού μέσου.

2. Μορφοποίηση αλουμινίου

2.1. Ιστορική αναδρομή αλουμινίου

Το 1808 ο Βρετανός «Davy» ανακαλύπτει την ύπαρξη του αλουμινίου, ενώ το 1821 ο «P. Berthier» όπως αναφέρθηκε νωρίτερα ανακαλύπτει το βωξίτη στο «Le Baux», ένα χωριό της Γαλλίας. Ο πρώτος όμως που κατάφερε να απομονώσει στοιχειώδη σωματίδια του μετάλλου, σήμερα γνωστού ως αλουμίνιο, ήταν ο Δανός επιστήμονας «Hans Oersted» το 1825, καθώς όμως πίστευε ότι το μέταλλο ήδη υπήρχε, δεν ασχολήθηκε περαιτέρω και στράφηκε στη μελέτη του ηλεκτρομαγνητισμού. Το 1827 ο «Friedrich Wöhler», καθηγητής χημείας στο Πανεπιστήμιο «Göttingen» της Γερμανίας, ξεκίνησε να αναπαράγει τα πειράματα του «Oersted». Μετά από επιμονή είκοσι χρόνων κατάφερε να παραγάγει τους πρώτους σβώλους αλουμινίου, οι οποίοι στάθηκαν ικανοί για να αναδείξουν τις ιδιαίτερες ιδιότητες του μετάλλου, ειδικά το μικρό ειδικό βάρος του και την αντιδιαβρωτική του ικανότητα. (aluNET, 2015)

2.2. Δομή αλουμινίου και Φυσικές ιδιότητες του

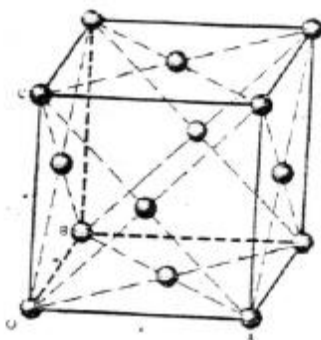
Το αλουμίνιο (αργίλιο) είναι το τρίτο κατά σειρά στοιχείο μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο, που συναντάται στο φλοιό της γης με τη μορφή του βωξίτη. Ανήκει στην τρίτη ομάδα του

Περιοδικού Συστήματος. Ο ατομικός του αριθμός είναι 13, το σύμβολό του Al, το ατομικό του βάρος 26,97 και το σημείο ζέσεως 2057 °C. (Λάγαρης, 2009)

Το αλουμίνιο κρυσταλλώνεται στο εδροκεντρωμένο κυβικό σύστημα και η ατομική του ακτίνα είναι 2,856Å (όπου 1Å ισοδυναμεί με 10^{-8} cm). Η σταθερά του πλέγματος είναι 4,05Å. Στην εδροκεντρωμένη κυβική δομή οι πυκνές διευθύνσεις σε άτομα είναι οι διαγώνιες του κύβου, δηλαδή οι διευθύνσεις <110> (Λάγαρης, 2009). Στο **Σχήμα 2.1** φαίνεται η δομή του αλουμινίου και στον **Πίνακα 2.1** οι βασικές του ιδιότητες.

Πίνακας 2.1.

Ιδιότητες Αλουμινίου	Τιμές
Πυκνότητα / Ειδικό Βάρος (g.cm ⁻³ at 20 °C)	2.70
Σημείο τήξης (°C)	660
Ηλεκτρική αγωγιμότητα στους 20°C (% επί της αγωγιμότητας του χαλκού)	62
Θερμική αγωγιμότητα (cal.sec ⁻¹ cm ⁻¹ K ⁻¹)	0.5
Ανακλαστικότητα (%)	90
Σημείο Βρασμού (°C)	2494



Σχήμα 2.1 : Η εδροκεντρωμένη κυβική δομή του αλουμινίου

Από τις σημαντικότερες ιδιότητες του αλουμινίου, οι οποίες το καθιστούν πολύτιμο, είναι το χαμηλό του ειδικό βάρος, η υψηλή αντοχή του σε μηχανικές καταπονήσεις και η εξαιρετική αντοχή του στη διάβρωση, η οποία οφείλεται στο φαινόμενο της παθητικοποίησης. Το καθαρό αλουμίνιο είναι αρκετά μαλακό και όλκιμο. Με την προσθήκη κραματικών στοιχείων όπως χαλκός, σίδηρος, μαγνήσιο και άλλα βελτιώνονται κατά πολύ οι μηχανικές του ιδιότητες. Οι μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου δεν εξαρτώνται μόνο από την καθαρότητά του, αλλά και από το ποσοστό της ενδοτράχυνσης, που έχει υποστεί κατά τη διάρκεια των μηχανικών του κατεργασιών. Το αλουμίνιο υφίσταται εύκολα κατεργασία με χύτευση. Παρουσιάζει, επίσης, πολύ καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αλουμινίου ισούται με το 65% εκείνης του χαλκού. Παρόλα αυτά το αλουμίνιο λόγω της χαμηλής του πυκνότητας, χαρακτηρίζεται ως καλύτερος αγωγός. (Χριστακόπουλος, 2010)

Το αλουμίνιο κατέχει μία πολύ σημαντική ιδιότητα, που το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές σε διαβρωτικά περιβάλλοντα, το λεγόμενο φαινόμενο της παθητικοποίησης. Όταν έρχεται σε επαφή με το οξυγόνο δημιουργεί ένα στρώμα οξειδίου του αλουμινίου (Al_2O_3), γνωστό και ως αλούμινα. Αυτό το στρώμα οξειδίου δρα ως «ασπίδα» για το μέταλλο στις διάφορες διαβρωτικές ενώσεις που υπάρχουν σε ανάλογα περιβάλλοντα. Επιπλέον, αν για κάποιο λόγο το οξείδιο αυτό αφαιρεθεί από την επιφάνεια του μετάλλου, το μέταλλο δεν θα διαβρωθεί, γιατί μόλις έρθει σε επαφή με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο αυτή η ακάλυπτη επιφάνεια, θα δημιουργηθεί εκ νέου νέο στρώμα αλούμινας. Για αυτό το λόγο και χαρακτηρίζεται ως ένα φυσικά αναγεννώμενο στρώμα.

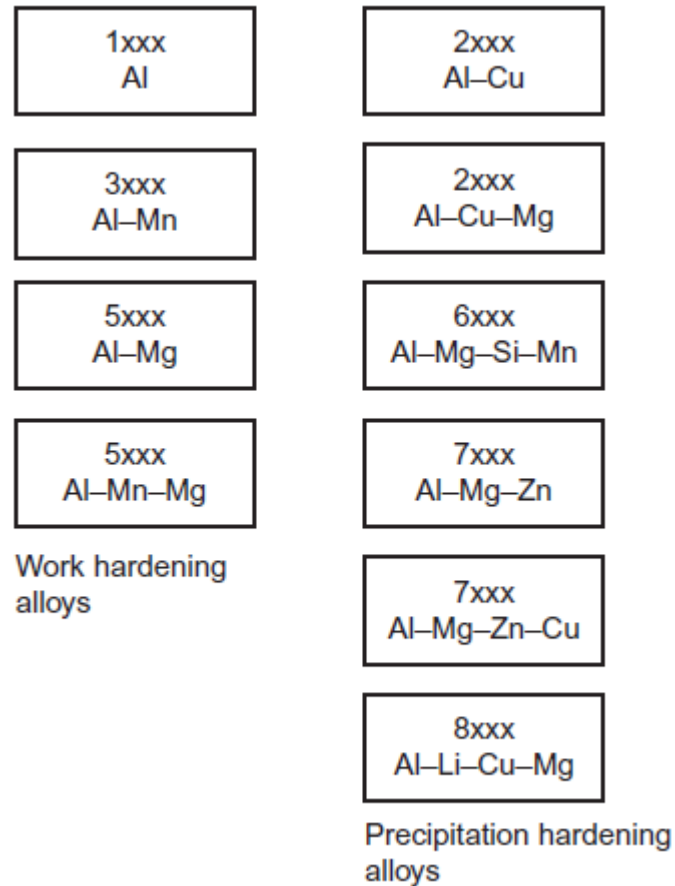
Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του αλουμινίου είναι (Eckermann, 2008):

- Η εύκολη διαμορφωσιμότητά του
- Η καλή αντοχή του στη διάβρωση
- Η καλή ανακλαστικότητα του
- Η καλή θερμική και ηλεκτρική του αγωγιμότητα
- Η καλή σκληρότητά του σε χαμηλές θερμοκρασίες

2.3. Κράματα αλουμινίου

Τα κράματα του αλουμινίου διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στα χυτά και στα κράματα διαμόρφωσης. Ακολουθεί στο **Σχήμα 2.2.** κατηγοριοποίηση των κραμάτων σύμφωνα με τον τρόπο σκλήρωσής τους, στην αριστερή στήλη είναι εκείνα, που σκληραίνουν με το φαινόμενο της ενδοτράχυνσης, ενώ στη δεξιά στήλη εκείνα, που βασίζονται στο φαινόμενο της κατακρήμνισης μίας δευτερεύουσας φάσης.

Προσομοίωση της θερμής και ψυχρής έλασης κράματος αλουμινίου
με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων



Σχήμα 2.2. Κατηγοριοποίηση των κραμάτων αλουμινίου σύμφωνα με τον τρόπο σκλήρωσης τους.

Όσον αφορά τα χυτά κράματα πρέπει να έχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά (Καλογερόπουλος, 2013):

- καλή επιδεκτικότητα χύτευσης
- απουσία ρηγματώσεων
- ομοιογενή κατανομή του πορώδους
- παραγωγή λεπτόκοκκων χυτών αντικειμένων
- καλή αντοχή εν θερμώ
- καλή αντοχή σε διάβρωση

Οι χαμηλές θερμοκρασίες τήξης των κραμάτων του αλουμινίου, επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση των καλουπιών χύτευσης που πραγματοποιείται με τρεις τρόπους:

Χύτευση σε άμμο: Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται για την παραγωγή μικρής ποσότητας όμοιων χυτών αντικειμένων, πολύπλοκων εξαρτημάτων ή αντικειμένων ιδιαίτερης δομής.

Χύτευση σε μεταλλικό τύπο: Το κράμα χυτεύεται με τη βοήθεια της βαρύτητας ή χαμηλής πίεσης. Με τη μέθοδο αυτή τα παραγόμενα χυτά παρουσιάζουν μικρότερο πορώδες σε σύγκριση με την προηγούμενη μέθοδο χύτευσης. Ωστόσο, η μέθοδος δεν συνιστάται στην περίπτωση κατασκευής εξαρτημάτων, εργαλείων ή αντικειμένων πολύπλοκης γεωμετρίας.

Χύτευση υπό πίεση: Με τη μέθοδο αυτή λαμβάνονται λεπτόκοκκα χυτά με λείες επιφάνειες και γεωμετρική ακρίβεια.

2.3.1. Ονοματολογία κραμάτων αλουμινίου

Οι κώδικες ονομασίας των κραμάτων αλουμινίου, σύμφωνα με την «Aluminum Association», αποτελούνται από δύο μέρη, τα οποία χωρίζονται με παύλα. Το πρώτο μέρος αποτελείται από τέσσερεις αριθμούς, των οποίων η σημασία εξαρτάται από το εάν πρόκειται για κράμα διαμόρφωσης ή για χυτό κράμα.

Χυτά κράματα

Τα χυτά κράματα του αλουμινίου ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες (Πίνακας 2.2.)

Πίνακας 2.2.

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΥΡΙΑ ΠΡΟΣΘΗΚΗ
1 XX.X	Αλουμίνιο καθαρότητας 99,00%
2 XX.X	Χαλκός
3 XX.X	Πυρίτιο και Χαλκός ή Μαγνήσιο
4 XX.X	Πυρίτιο
5 XX.X	Μαγνήσιο
6 XX.X	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά
7 XX.X	Ψευδάργυρος
8 XX.X	Κασσίτερος
9 XX.X	Άλλα στοιχεία

Στα χυτά κράματα, ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει, το κύριο στοιχείο προσθήκης. Ο δεύτερος και ο τρίτος αριθμός δείχνουν την ειδική κατηγορία του κράματος της οικείας ομάδας. Ο τέταρτος αριθμός, ο οποίος χωρίζεται με τελεία από τους τρεις πρώτους, αφορά στη μορφολογία του προϊόντος της χύτευσης. Με μηδέν (0) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για χυτό, το οποίο έχει αποκτήσει την τελική του μορφολογία με συνεχή χύτευση, ενώ με ένα (1) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για πλίνθωμα. Μετατροπή της αρχικής χημικής σύστασης υποδηλώνεται με ένα γράμμα μπροστά από τον κωδικό. (Χριστακόπουλος, 2010)

Η ρύθμιση των ιδιοτήτων των κραμάτων αυτών επιτυγχάνεται με τον συνδυασμό διάφορων μηχανισμών : α) Με την δημιουργία στερεού διαλύματος α-φάσης, β) με την διασπορά β-φάσης και γ) την ρύθμιση των συνθηκών στερεοποίησης (επίδραση στο μέγεθος των κόκκων και στο είδος των σχηματιζόμενων ευτηκτικών φάσεων). Βιομηχανικά η εκλέπτυνση των κόκκων, γίνεται με την προσθήκη βοριδίων του τιτανίου (TiB_2), ενώ η μεταβολή των ευτηκτικών με προσθήκη νατρίου, με την μορφή NaF, ή την προσθήκη στροντίου (Sr). (Αεράκη Γ., Σταθάτου Η., 2012)

Κράματα διαμόρφωσης

Τα κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου παράγονται από τα χυτά κράματα ακολουθώντας τις παρακάτω διαδικασίες:

- Επανάτηξη του χυτού υλικού και δεύτερη χύτευση
- Επιφανειακή εκλέπτυνση του υλικού
- Προθέρμανση και ομογενοποίηση του υλικού
- Θερμή έλαση
- Ψυχρή έλαση

Σε αντιστοιχία με τα χυτά κράματα, τα κράματα διαμόρφωσης διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με την κύρια κραματική προσθήκη (**Πίνακας 2.3.**).

Πίνακας 2.3.

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΥΡΙΑ ΠΡΟΣΘΗΚΗ
1 XXX	Αλουμίνιο καθαρότητας >99,00%
2 XXX	Χαλκός
3 XXX	Μαγγάνιο
4 XXX	Πυρίτιο
5 XXX	Μαγνήσιο
6 XXX	Πυρίτιο και Μαγνήσιο
7 XXX	Ψευδάργυρος
8 XXX	Άλλα στοιχεία
9 XXX	Σειρά που δεν χρησιμοποιείται

Στην κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου, ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης. Ο δεύτερος χρησιμοποιείται για να δηλώσει τροποποιήσεις των ορίων περιεκτικότητας των ακαθαρσιών. Τέλος, οι δύο τελευταίοι αριθμοί, στην περίπτωση της σειράς 1XXX, δίνουν τα δεκαδικά ποσοστά, για περιεκτικότητες αλουμινίου υψηλότερες του 99,00%, ενώ στην περίπτωση κραμάτων αλουμινίου άλλων σειρών, οι δύο τελευταίοι αριθμοί χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τον προσδιορισμό της ειδικής κατηγορίας του κράματος της οικείας ομάδας. (Χριστακόπουλος, 2010)

Κατηγοριοποίηση κραμάτων διαμόρφωσης (Ιωαννίδης, 2005)

Σειρά 1XXX: Καθαρό αλουμίνιο με 99% ελάχιστη καθαρότητα. Το καθαρό αλουμίνιο υποδιαιρείται σε κατηγορίες ανάλογα με την περιεκτικότητα σε αλουμίνιο. Χαρακτηρίζεται από την υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και εύκολη μορφοποίηση. Οι μηχανικές αντοχές είναι σχετικά χαμηλές.

Σειρά 2XXX: Κράματα αλουμινίου-χαλκού. Τα κράματα της σειράς αυτής αποκτούν μηχανικές αντοχές υψηλότερες από αυτές του μέσου χάλυβα και χρησιμοποιούνται σε

κατασκευές με υψηλές απαιτήσεις για μηχανική αντοχή, συνήθως όπου δε χρειάζεται συγκόλληση. Έχουν επίσης μειωμένη αντίσταση σε διάβρωση.

Σειρά 3XXX: Κράματα αλουμινίου-μαγνάνιου. Τα χαρακτηριστικά των κραμάτων της σειράς αυτής είναι η εύκολη μορφοποίηση, η καλή αντοχή στην ατμοσφαιρική διάβρωση, η ευκολία συγκόλλησης. Χαρακτηριστικά κράματα της σειράς είναι το 3003 και 3004.

Σειρά 4XXX: Κράματα αλουμινίου πυριτίου. Η παρουσία του πυριτίου ελαττώνει το σημείο τήξης των κραμάτων της κατηγορίας αυτής. Το γεγονός αυτό, καθιστά τα κράματα αυτά κατάλληλα για χρήση ως ηλεκτρόδια πλήρωσης σε εργασίες συγκόλλησης κομματιών αλουμινίου.

Σειρά 5XXX: Κράματα αλουμινίου-μαγνησίου. Τα χαρακτηριστικά των κραμάτων αυτών είναι η πολύ καλή επιδεκτικότητα συγκόλλησης, η καλή συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες, η πολύ καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά στο θαλάσσιο περιβάλλον και οι μέσες μηχανικές αντοχές. Επίσης διατηρούν την ολκιμότητά τους μετά τη συγκόλληση χωρίς να χρειαστεί να υποστούν θερμικές κατεργασίες. Χρησιμοποιούνται ευρέως στη ναυπηγική (πλοία εμπορικής εκμετάλλευσης), στη χημική βιομηχανία, στις οικοδομές, στα μεταφορικά μέσα. Χαρακτηριστικά κράματα είναι τα 5005, 5052, 5754, 5083, 5086, 5182.

Σειρά 6XXX: Κράματα αλουμινίου - πυριτίου – μαγνησίου. Αποτελούν τα κράματα που κατά βάση χρησιμοποιούνται στην διέλαση για την παραγωγή των προφίλ αλουμινίου. Χαρακτηριστικά κράματα είναι τα 6005, 6061, 6082, 6060, 6063.

Σειρά 7XXX: Κράματα αλουμινίου-ψευδαργύρου. Ο ψευδάργυρος και το μαγνήσιο είναι τα κύρια κραματοποιά στοιχεία. Τα κράματα αυτά επιτυγχάνουν τις υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες από όλα τα κράματα αλουμινίου και βρίσκουν εφαρμογή στην αεροναυπηγική και αεροδιαστημική βιομηχανία, όπου δε χρειάζεται συγκόλληση και όπου η υψηλή τους αντοχή μπορεί να αντισταθμίσει τη μειωμένη αντίστασή τους σε διάβρωση. Ειδικά για να μπορέσουν να διατηρηθούν τα κράματα αυτά σε θαλάσσιο περιβάλλον για μεγάλα χρονικά διαστήματα, συνήθως χρησιμοποιούνται προστατευτικά μέτρα όπως βαφή και καθοδική προστασία.

2.3.2. Τυποποίηση κατεργασιών αλουμινίου

Για την ευκολότερη αναγνώριση των κραμάτων αλουμινίου, το τετραψήφιο χαρακτηριστικό κάθε κράματος, που αναφέρθηκε παραπάνω, συνοδεύεται από ένα γράμμα και από ένα έως τρία ψηφία, τα οποία υποδηλώνουν την ακολουθία των κατεργασιών που υπέστη το κράμα με σκοπό τη βελτίωση των ιδιοτήτων του (Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής, 2007). (Πίνακας 2.4.)

Πίνακας 2.4. Κωδικοποίηση των κραμάτων αλουμινίου βάσει κατεργασίας.

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ
F	Καμία κατεργασία
O	Ανόπτηση
H	Ενδοτράχυνση
H1	Μόνο ενδοτράχυνση

Προσομοίωση της θερμής και ψυχρής έλασης κράματος αλουμινίου
με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

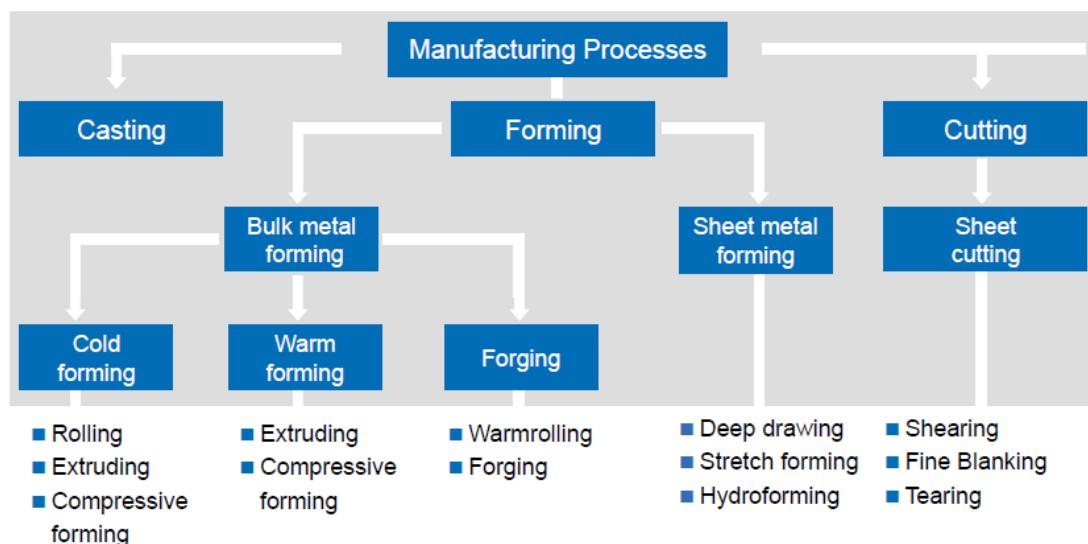
H2	Ενδοτράχυνση και μερική ανόπτηση
H3	Ενδοτράχυνση και σταθεροποίηση
T	Θερμική κατεργασία
T1	Βαφή και φυσική γήρανση
T2	Βαφή, μηχανική κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση
T3	Υπερβαφή, κατεργασία διαμόρφωσης εν ψυχρώ και φυσική γήρανση
T4	Υπερβαφή και φυσική γήρανση
T5	Απόψυξη μετά από διαμόρφωση σε υψηλή θερμοκρασία και τεχνητή γήρανση
T6	Υπερβαφή και τεχνητή γήρανση
T7	Υπερβαφή και σταθεροποίηση για έλεγχο χαρακτηριστικών υλικού
T8	Υπερβαφή, κατεργασία διαμόρφωσης εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση
T9	Υπερβαφή, τεχνητή γήρανση και κατεργασία διαμόρφωσης εν ψυχρώ
T10	Βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση
W	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, μόνο για κράματα, που υφίστανται σκλήρυνση με γήρανση

3. Έλαση

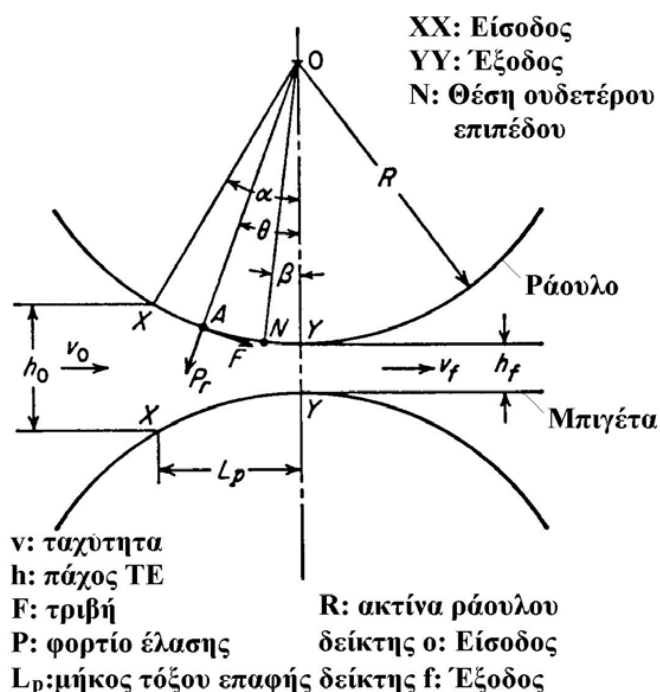
3.1. Γενικά – Ορισμός

Η έλαση ανήκει στις συνηθέστερες κατεργασίες μορφοποίησης των μεταλλικών υλικών. Στο **Σχήμα 3.1.** απεικονίζεται η παραγωγική διαδικασία μέχρι και την έλαση και δίνονται και παραδείγματα άλλων κατεργασιών. Ως έλαση (rolling) ορίζεται ο υποβιβασμός της διατομής και η αύξηση του μήκους ενός τεμαχίου, υπό τη μορφή ράβδου ή πλάκας, το οποίο υφίσταται πλαστική παραμόρφωση, όταν διέρχεται μέσα από το διάκενο που σχηματίζουν δύο τύμπανα, τα οποία καλούνται ράουλα ή ρόλοι διαμόρφωσης. (**Σχήμα 3.2.**) Με κριτήριο τη μεταβολή ή μη του πλάτους του τεμαχίου, η έλαση διακρίνεται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- I. Την έλαση μπιγέτας, κατά την οποία σημειώνεται μεταβολή του πλάτους του παραγόμενου προϊόντος. Αυτή η μεταβολή καλείται κοινώς πλευρική διόγκωση (spreading).
- II. Και την έλαση πλάκας, όπου δεν παρατηρείται μεταβολή του πλάτους του παραγόμενου προϊόντος.



Σχήμα 3.1. Διάγραμμα παραγωγικής διαδικασίας.



Σχήμα 3.2. Εικονική αναπαράσταση της έλασης.

Περαιτέρω, η κατεργασία της έλασης διακρίνεται βάσει της θερμοκρασίας του υλικού κατά την οποία διενεργείται σε θερμή και ψυχρή.

Όμως για να γίνει αυτή η διάκριση επιτυχώς, πρέπει να καθοριστούν τα σημεία αναφοράς για την χαμηλότερη και την υψηλότερη θερμοκρασία. Ως χαμηλότερη θερμοκρασία λαμβάνεται το απόλυτο μηδέν και ως υψηλότερη θερμοκρασία λαμβάνεται η θερμοκρασία τήξης του υλικού (T_m), το οποίο πρόκειται να ελαθεί. Όταν λοιπόν η έλαση λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασία μικρότερη του μισού της θερμοκρασίας τήξης του υλικού ($T < 0.5 * T_m$), τότε είθισται να καλείται ψυχρή έλαση, ενώ όταν γίνεται σε υψηλότερη θερμοκρασία ονομάζεται θερμή έλαση. Υπάρχει όμως ένα εύρος θερμοκρασιών που ξεκινά λίγο χαμηλότερα από το $0.5 * T_m$ και εκτείνεται μέχρι και λίγο πιο πάνω από αυτή τη θερμοκρασία. Η έλαση που τελείται μέσα σε αυτό το θερμοκρασιακό εύρος καλείται, σύμφωνα με την αγγλική ορολογία, «warm rolling», καθώς δεν υπάρχει ακριβής αντίστοιχη ελληνική ορολογία και τα θερμοκρασιακά όρια της είναι ασαφή, όπως άλλωστε φαίνεται και πιο πάνω.

Κάθε μία από τις παραπάνω κατεργασίες έχει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Για παράδειγμα στη θερμή έλαση χρειάζεται μικρότερο φορτίο έλασης για τον υποβιβασμό του τεμαχίου, διότι το υλικό είναι πιο «μαλακό» στις υψηλές θερμοκρασίες, στις οποίες επιτελείται αυτό το είδος έλασης, αλλά σχηματίζεται ταυτόχρονα ένα λεπτό στρώμα οξειδίου, το οποίο δυσχεραίνει τη μετέπειτα κατεργασία. Αν έπειτα από την θερμή έλαση

ακολουθεί ψυχρή έλαση του υλικού, τότε το λεπτό στρώμα οξειδίου αφαιρείται. Στην ψυχρή έλαση βασικό μέλημα είναι ο έλεγχος των διαστάσεων και της ποιότητας της επιφάνειας του υλικού για να τηρεί τις προαπαιτούμενες προδιαγραφές. (Lenard, 2014)

Η κατανόηση των παραμέτρων της έλασης και του αντίκτυπου, που έχουν στο μηχανικό και μεταλλουργικό υπόβαθρο του υλικού, οδηγεί τελικά στη βελτιστοποίηση της θερμομηχανικής αυτής κατεργασίας, ώστε το υλικό, που παράγεται να έχει συγκεκριμένες και προδιαγεγραμμένες ιδιότητες.

3.2. Θερμή έλαση αλουμινίου

Τα προϊόντα της θερμής έλασης είτε ημικατεργασμένα είτε τελικά πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές διαστάσεων σε συνδυασμό με χαρακτηριστική ποιότητα επιφάνειας, παραδείγματος χάρη συγκεκριμένη τραχύτητα. Επιπλέον, αν το υλικό προορίζεται για περαιτέρω κατεργασία ψυχρής έλασης, τότε πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα η μικροδομή του μιας και είναι σήμα κατατεθέν για τη συμπεριφορά, που θα έχει κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

Μετά τη χύτευση και τη στερεοποίηση του αλουμινίου, που λαμβάνει χώρα σε καλούπια, η πλάκα ή η μπιγιέτα πριν κατευθυνθεί στην μηχανή θερμής έλασης ακολουθεί μία συγκεκριμένη προετοιμασία. Κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας αποκόπτονται τα άκρα της πλάκας και αφαιρείται ένα λεπτό στρώμα υλικού από την επιφάνεια με σκοπό να εκμηδενιστεί η ύπαρξη οξειδίων ή άλλων επιφανειακών σφαλμάτων λόγω της στερεοποίησης. Μετέπειτα συνήθως ακολουθεί μία θερμική διεργασία που καλείται ομογενοποίηση. Κάτα την ομογενοποίηση το υλικό παραμένει σε θερμοκρασία συχνά υψηλότερη από εκείνη στην οποία τελείται η θερμή έλαση και μπορεί να διαρκέσει για αρκετές ώρες. Στη διάρκεια αυτών των ωρών η χημική σύσταση του υλικού γίνεται πιο ομοιογενής, το σχήμα και η σύσταση των ενδομεταλλικών ενώσεων και των κατακρημνισμάτων που έχουν σχηματιστεί αλλάζει. Όλα τα παραπάνω εξαρτώνται τόσο από την θερμική προϊστορία του υλικού, όσο και από την αρχική του χημική σύσταση. (Lenard, 2014)

Η ομογενοποιημένη μικροδομή του υλικού κατέχει μεγάλη βαρύτητα ως προς την ανακρυστάλλωση των κόκκων πριν, κατά την έλαση και μετά από αυτήν, την υφή των προϊόντων και τη μετακίνηση των γραμμικών διαταραχών στα όρια κόκκων του υλικού. (Lenard, 2014)

Για τα περισσότερα προϊόντα της έλασης, η ακριβής μέτρηση του πάχους είναι λιγότερο σημαντική από τη διακύμανση του πάχους κατά πλάτος και κατά μήκος του ελασμένου προϊόντος. Αν αυτή η διακύμανσή είναι σχετικά μικρή, τότε μπορεί να διορθωθεί αν το υλικό προορίζεται για ψυχρή έλαση.

Περαιτέρω και ο έλεγχος ποιότητας της επιφάνειας είναι υψίστης σημασίας στην έλαση. Ένα πολύ κοινό σφάλμα της θερμής έλασης είναι όταν φθείρεται το ράουλο και πολλά σωματίδια σε συνδυασμό με λιπαντικά μέσα εισχωρούν στις αυλακώσεις της επιφάνειας του με αποτέλεσμα το οξείδιο του αλουμινίου ή το ίδιο το αλουμίνιο να προσκολλάται στην επιφάνεια του ραούλου. (Lenard, 2014)

3.3. Ψυχρή έλαση αλουμινίου

Κατά την ψυχρή έλαση, το αλουμίνιο μορφοποιείται σε θερμοκρασία αρκετά χαμηλή, ώστε να συμβεί το φαινόμενο της ενδοτράχυνσης. Πολλές φορές όμως και κατά την κατεργασία της θερμής έλασης η θερμοκρασία μειώνεται τόσο, ώστε να αρχίσει το φαινόμενο να επιδρά και εκεί, αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό. (Association, 1990)

Για την ψυχρή έλαση απαιτείται μεγαλύτερο φορτίο, διότι το μέταλλο λόγω της μειωμένης θερμοκρασίας του δεν είναι πλέον τόσο μαλακό. Η ποιότητα της επιφάνειας του υλικού, που διαμορφώνεται είναι πολύ καλή και συγκριτικά με εκείνη της θερμής έλασης σαφώς καλύτερη. Για πολλά προϊόντα είναι το τελικό στάδιο η ψυχρή έλαση, καθώς διαμορφώνονται μέχρι ένα συγκεκριμένο πάχος περίπου στα 2 mm και ύστερα οδηγούνται στην μονάδα της ψυχρής έλασης για περαιτέρω μείωση του πάχους.

Κατά την ψυχρή έλαση λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της ενδοτράχυνσης, δηλαδή της σκλήρωσης του κράματος εξαιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης του. Κατά την πλαστική παραμόρφωση, οι τρισδιάστατες γραμμικές διαταραχές του υλικού, δηλαδή οι «εν σειρά» σημειακές ατέλειες των κρυσταλλογραφικών επιπέδων του, μετακινούνται προς τα όρια κόκκων και συγκεντρώνονται εκεί, εκτός αν το υλικό περιέχει ευμεγέθη κατακρημνίσματα με σκληρότητα παραπλήσια εκείνης της μήτρας, στα οποία και σταματούν γιατί δεν υπάρχει η απαραίτητη ενέργεια υπερπήδησης αυτού του εμποδίου. Η πλαστική παραμόρφωση όμως γεννά διαρκώς νέες διαταραχές, οι οποίες κατευθύνονται προς τα όρια των κόκκων ή στη διεπιφάνεια μητρικού υλικού και κατακρημνισμάτων. Όσο περισσότερο παραμορφώνεται πλαστικά το υλικό τόσο περισσότερες διαταραχές συγκεντρώνονται στα όρια των κόκκων του, όμως κάθε υλικό έχει ένα όριο στο πόσες διαταραχές μπορεί να ανεχθεί στα όρια των κόκκων του, πέρα από το οποίο δημιουργούνται μικρορωγμές, που τελικά οδηγούν στη θραύση του υλικού. Επομένως, η σκλήρωση μέσω ενδοτράχυνσης, που επιβάλλεται στο υλικό γίνεται μέχρι το υλικό να βρίσκεται εντός προδιαγραφών του πελάτη, περαιτέρω σκλήρωση δεν είναι αναγκαία. Μετά την ψυχρή έλαση τα περισσότερα κράματα αλουμινίου οδηγούνται σε φούρνους ανόπτησης, ώστε να αναδιαμορφωθεί το κρυσταλλικό πλέγμα του υλικού και, έτσι, να εκτονωθούν οι περισσότερες διαταραχές, αυξάνοντας ταυτόχρονα την ολκιμότητα του υλικού με μικρή μείωση της αποκτηθείσας σκληρότητας.

3.1.1. Διάκριση προϊόντων έλασης

Η εκτελεστική πορεία της έλασης αποτελείται από διακριτές φάσεις, τις καλούμενες στη βιομηχανία ως πάσα. Αρχικά, το προϊόν της χύτευσης, δηλαδή το πρωτογενές υλικό, έχει τη μορφή πλινθώματος (ingot), σε αντίθεση με τα προϊόντα των επόμενων πάσων, τα οποία διακρίνονται σε επιμήκη όπως ράβδους, μπιγέτες, μορφοδοκούς και σε πλατιά προϊόντα, δηλαδή πλάκες, ελάσματα και ταινίες (**Σχήμα 3.3.**).

Συνοφαινώντας τη φάση της έλασης και τη μορφή του προϊόντος, προκύπτει η εξής τυποποίηση:

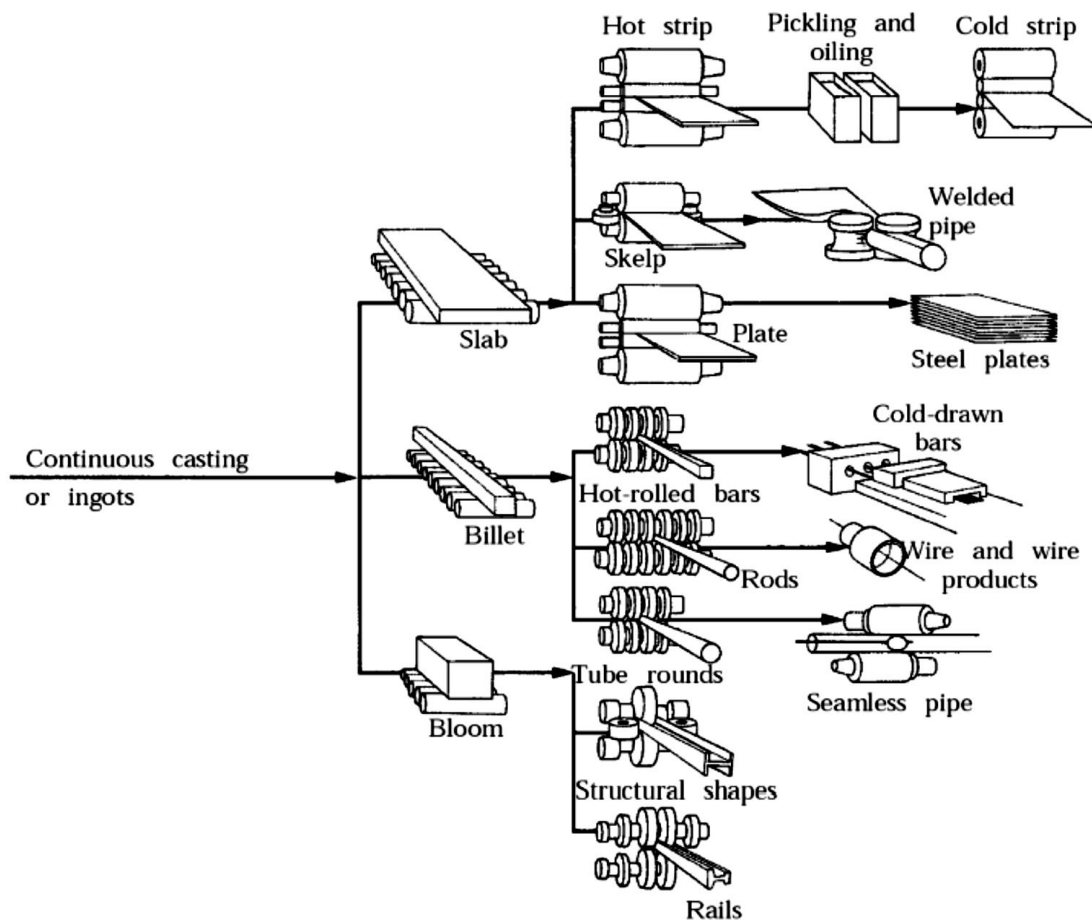
α. Ημικατεργασμένα προϊόντα

- i. Μπιγέτα πρώτης έλασης (bloom) τετραγωνικής διατομής με δεδομένο εμβαδόν ($A \geq 15 \times 15 \text{ cm}^2$)
- ii. Μπιγέτα (billet) τετραγωνικής διατομής με μικρότερο εμβαδόν ($A \geq 4 \times 4 \text{ cm}^2$)
- iii. Πλάκα (slab) ορθογωνικής διατομής με δεδομένο εμβαδόν ($A \geq 100 \text{ cm}^2$) και πλάτος τουλάχιστον διπλάσιο του ονομαστικού πάχους της.

β. Τελικά προϊόντα

Με περαιτέρω διαμόρφωση των ημικατεργασμένων προϊόντων προκύπτουν οι ακόλουθες κατηγορίες :

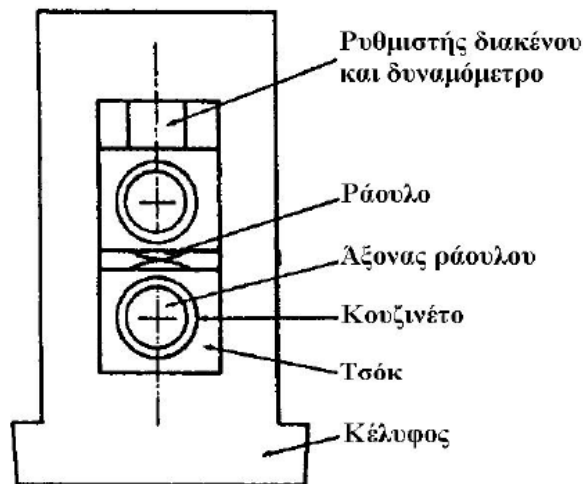
- i. Επιμήκη προϊόντα, τα οποία προκύπτουν από την έλαση μπιγέτων με ειδικές μεθόδους έλασης, όπως οι μορφοδοκοί, ήλοι με σπείρωμα, δακτύλιοι κ.α.
- ii. Πλατιά προϊόντα που προκύπτουν από την έλαση πλακών και διακρίνονται ανάλογα με το πάχος και το πλάτος τους στις εξής υποκατηγορίες:
 - Ελάσματα (plates) με πάχος $\geq 6 \text{ mm}$
 - Λεπτά ελάσματα (sheets) με πάχος $< 6 \text{ mm}$ και πλάτος $\geq 600 \text{ mm}$
 - Λεπτές λωρίδες (strips) με πάχος $< 6 \text{ mm}$ και πλάτος $< 600 \text{ mm}$.



Σχήμα 3.3. Πορεία μορφοποίησης προϊόντων έλασης

3.1.2. Μηχανές έλασης : Ορισμός και Διάκριση

Η μηχανή, υπεύθυνη για την εκτέλεση της έλασης, ονομάζεται έλαστρο. Το έλαστρο αποτελείται από τα ράουλα, τα οποία χωρίζονται σε ράουλα εργασίας και αντιστήριξης, τα κουζινέτα μέσα στα οποία στρέφονται οι άξονες των ραούλων και το ειδικό κέλυφος (housing), μέσα στο οποίο είναι εγκατεστημένα τα παραπάνω εξαρτήματα. (Σχήμα 3.4.)



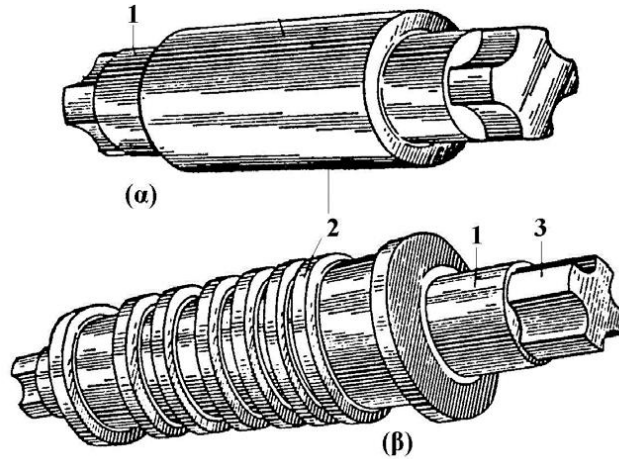
Σχήμα 3.4. Δομικά μέρη ελάστρου

Τα άκρα των αξόνων είναι κατάλληλα διαμορφωμένα, ώστε να συνδέονται μέσω σταυροειδών συνδέσμων με το αξονικό σύστημα της εγκατάστασης, το οποίο με τη σειρά του μεταδίδει την κίνηση στα ράουλα (ανεξάρτητη για κάθε ράουλο), καθώς έχει παραλάβει ήδη ισχύ από σύστημα ηλεκτροκινητήρα/μειωτήρα (Σχήμα 3.5.)

Τα ράουλα είναι χαλύβδινα κυλινδρικά τύμπανα με ομοιόμορφη διατομή (Σχήμα 3.5α) ή έχουν διαμορφωθεί κατάλληλα (ράουλα μορφής), ώστε να αποδίδουν το αντίστοιχο γεωμετρικό σχήμα στο τελικό προϊόν (Σχήμα 3.5β). Τα ράουλα, που επιτελούν την πλαστική παραμόρφωση τοποθετούνται με οριζόντιους άξονες το ένα πάνω στο άλλο, ενώ κατακόρυφα ράουλα χρησιμοποιούνται βοηθητικά για τον έλεγχο του πλάτους του τελικού προϊόντος. (Αναζ. Έλαση Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας / Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2016).

Εκείνα τα ράουλα, που έρχονται σε άμεση επαφή με το υλικό ονομάζονται ράουλα εργασίας, ενώ εκείνα που έρχονται σε επαφή μονάχα με τα ράουλα εργασίας και χρησιμεύουν περισσότερο ως στήριξη αυτών, ονομάζονται ράουλα αντιστήριξης. Χωρίς αυτό να σημαίνει ότι τα ράουλα αντιστήριξης δεν έχουν αντίκτυπο στην ποιότητα του τελικού προϊόντος, καθώς η στήριξη που προσφέρουν είναι ανασταλτικός παράγοντας πολύ

σύνθετων φαινομένων, που συμβαίνουν κατά την έλαση και έχουν την τάση να την αναιρούν.



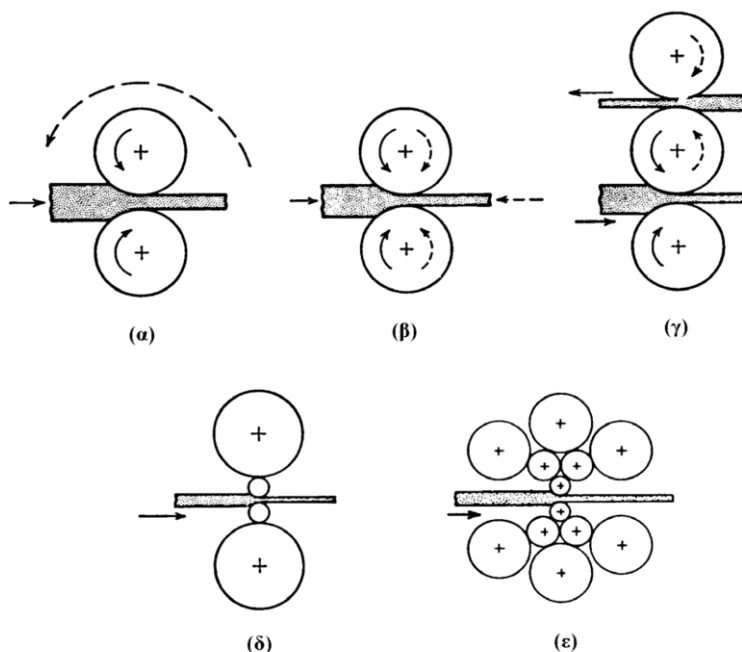
Σχήμα 3.5. Τύποι ραούλων: (α) Κοινό ράουλο, (β) ράουλο μορφής , 1 : Άξονας έδρασης, 2 : Κύριο σώμα ραούλου, 3 : Άκρο σύνδεσης

Βάσει της εργασίας, που επιτελούν και των φορτίων που δέχονται, τα έλαστρα κατασκευάζονται σε ανάλογες διατάξεις. Οι διάφορες μορφές διατάξεων ακολουθούν (Σχήμα 3.6.) (Αναζ. Έλαση Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας / Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2016) :

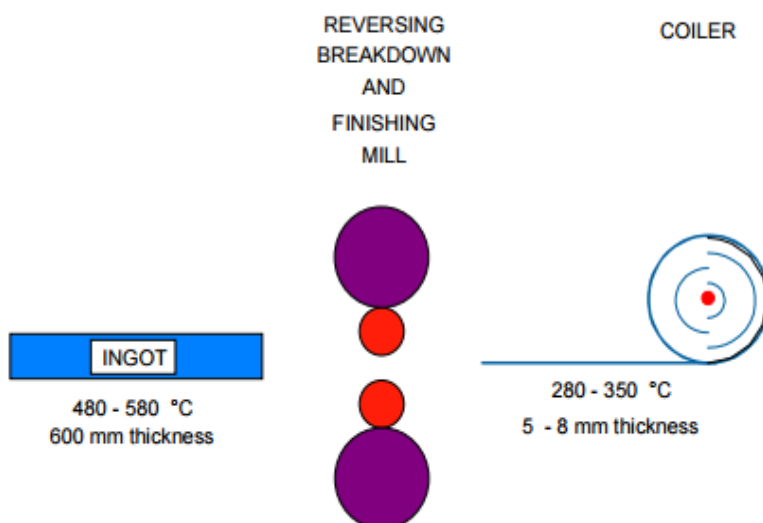
- **Έλαστρο δύο ρόλων (2-high mill):** Πρόκειται για την απλούστερη κατασκευή ελάστρου με δύο ράουλα εργασίας με συγκεκριμένη φορά περιστροφής.
- **Έλαστρο δύο ρόλων με αναστρεφόμενη κίνηση (2-high reversing mill):** Εξασφαλίζει περαιτέρω μείωση του πάχους με αναστροφή της φοράς περιστροφής των ραούλων, αποφεύγοντας με αυτόν τον τρόπο την μεταφορά του τεμαχίου σε άλλη θέση.
- **Έλαστρο τριών ρόλων (3-high mill):** Στρέφονται τα άνω και κάτω ράουλα, ενώ των μεσαίο στρέφεται μέσω της αναπτυσσόμενης τριβής. Πρόκειται για εναλλακτική λύσης της προηγούμενης μορφής.
- **Έλαστρο τεσσάρων ρόλων (4-high mill):** Τα ενεργά ράουλα είναι μικρότερης διαμέτρου και στηρίζονται σε δύο ράουλα αντιστήριξης μεγαλύτερης διαμέτρου για να αποφευχθεί ο κίνδυνος κάμψης τους από τα φορτία έλασης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας και μεγαλύτερη μείωση πάχους ανά πάσο. Τα Σχήματα 3.7. και 3.8. απεικονίζουν έλαστρα τεσσάρων ραούλων για ψυχρή και θερμή έλαση, μαζί με τα εξαρτήματα πάνω στα οποία γίνεται η τύλιξη

του προϊόντος, πρέπει να σημειωθεί ότι το έλαστρο θερμής έλασης είναι με αναστρεφόμενη κίνηση.

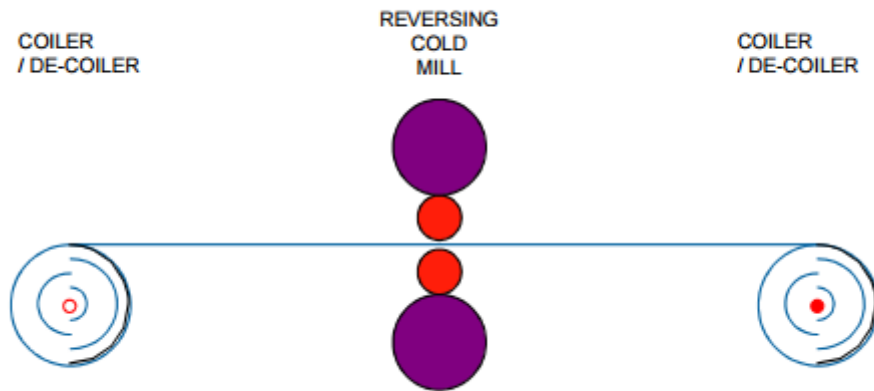
- **Έλαστρο τύπου «Cluster»** (Cluster mill), στο οποίο κάθε ενεργό ράουλο στηρίζεται από δύο ράουλα αντιστήριξης και κάθε ράουλο αντιστήριξης με τη σειρά του από δύο άλλα μεγαλύτερης διαμέτρου. Παραλλαγή του τύπου αυτού είναι το έλαστρο «Sendzimir». Αυτές οι πιο εξειδικευμένες μορφές ελάστρων χρησιμοποιούνται για την κατεργασία πολύ λεπτών ελασμάτων.



Σχήμα 3.6. Τύποι ελάστρων: (α) Δύο ραούλων, (β) Δύο ραούλων με αναστρεφόμενη κίνηση, (γ) Τριών ραούλων, (δ) Τεσσάρων ραούλων, (ε) Τύπου «Cluster» ή «Sendzimir»

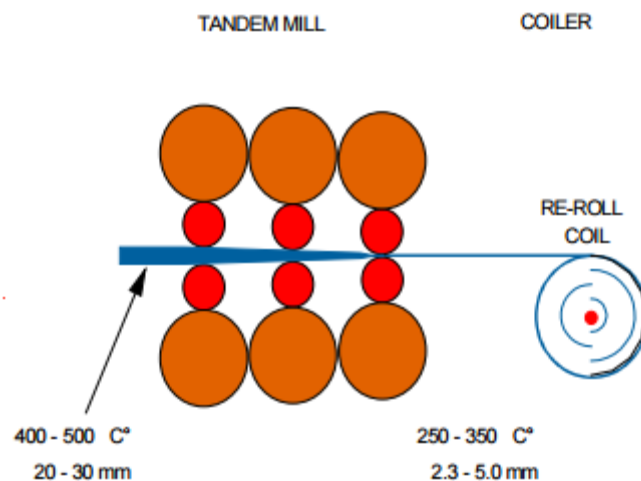


Σχήμα 3.7. Έλαστρο θερμής έλασης τεσσάρων ραούλων με αναστρεφόμενη κίνηση και με το τυλικτικό του.



Σχήμα 3.8. Έλαστρο ψυχρής έλασης τεσσάρων ραούλων με το τυλικτικό του.

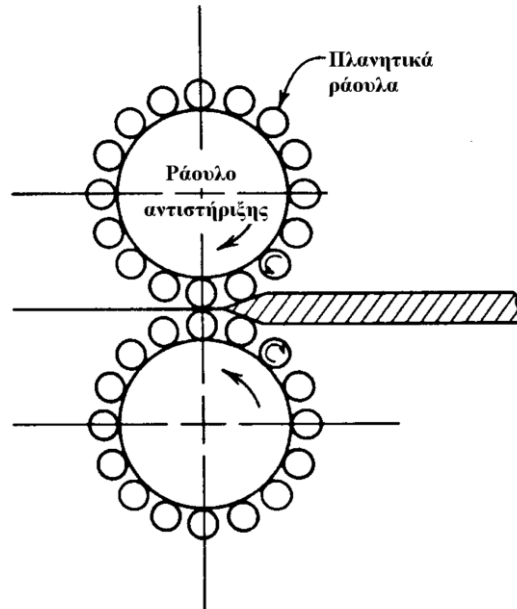
Η έλαση σε σειρά (**Σχήμα 3.9.**) προτιμάται όταν η παραγωγή είναι μεγάλου βεληνεκούς και προϋποθέτει ύπαρξη αρκετά μεγάλου χώρου για το στήσιμο συστοιχίας ελάστρων. Το κατεργαζόμενο τεμάχιο διέρχεται και κατεργάζεται συγχρόνως από όλα τα έλαστρα αποκτώντας έτσι βαθμιαία μείωση του πάχους του. Ο βασικότερος παράγοντας στην παραπάνω διάταξη είναι ο συγχρονισμός των ταχυτήτων περιστροφής των επιμέρους ελάστρων, ώστε το τεμάχιο να εξέρχεται από κάθε θέση με την αντίστοιχη ταχύτητα εισόδου της επόμενης βαθμίδας.



Σχήμα 3.9. Διάταξη συστοιχίας ελάστρων στη σειρά μαζί με το τυλικτικό.

Ειδική διάταξη ελάστρου είναι το έλαστρο με τα πλανητικά ράουλα (**Σχήμα 3.10.**). Αποτελείται από δύο ράουλα αντιστήριξης μεγάλης διαμέτρου που περιβάλλονται από

μεγάλο αριθμό μικρών περιφερειακών ραούλων. Ο κύριος ρόλος των πλανητικών ραούλων είναι η απευθείας μείωση (εν θερμώ) του πάχους ελάσματος σε ένα πάσο. Καθένα απ' αυτά εξασφαλίζει σχεδόν ομοιόμορφη μείωση πάχους και είναι διαταγμένα έτσι ώστε, μόλις παύει την επενέργεια του ένα ζεύγος πλανητικών ραούλων, να αναλαμβάνει δράση το επόμενο ζεύγος. Η συνολική δράση με τη χρήση πλανητικών ραούλων προσιδιάζει περισσότερο με την διαδικασία σφυρηλάτησης. (Αναζ. Έλαση Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας / Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2016)



Σχήμα 3.10. Έλαστρο με πλανητικά ράουλα («Planetary Mill»).

4. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

4.1. Γενικά

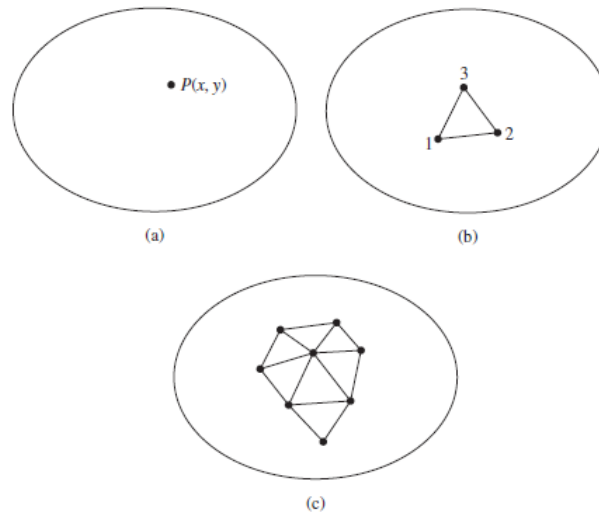
Η μέθοδος αυτή αποτελεί ισχυρό εργαλείο στη μελέτη των υλικών και βρίσκει μεγάλο πεδίο εφαρμογών, όπου χρησιμοποιείται τόσο σε προβλήματα ελαστικού υποβάθρου όσο και σε μη-γραμμικά προβλήματα, όπως λυγισμό, δυναμική συμπεριφορά κτλ. Σύμφωνα με τον Καρύδη (Καρύδης, 2016) η μέθοδος χρησιμοποιείται σε προβλήματα, που επιδέχονται μεταβολική διατύπωση στην μηχανική των συνεχών μέσων.

Η αρχική διατύπωση της μεθόδου έγινε με βάση την ανάλυση μήτρας και στη συνέχεια ολοκληρώθηκε μια πιο θεμελιώδης θεωρητική βάση. Με τη χρήση διδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων η μέθοδος προσομοιάζει συνεχή μέσα. Αρχικά, τα πεπερασμένα στοιχεία εφαρμόστηκαν σε προβλήματα επίπεδης εντατικής κατάστασης, στη συνέχεια όμως όμως διατυπώθηκαν στοιχεία και για τρισδιάστατα στερεά, ελάσματα υπό κάμψη, παχιά κελύφη, και άλλες μορφές κατασκευών. Όπως στοχευμένα αναφέρει ο Καρύδης (Καρύδης, 2016) μετά την καθιέρωσή τους στη γραμμική ελαστική περιοχή εφαρμόστηκαν και σε δυσκολότερα προβλήματα όπως η δυναμική συμπεριφορά, ο λυγισμός και η μη-γραμμική απόκριση και συμπεριφορά του υλικού. Η επίλυση προβλημάτων μη-γραμμικής συμπεριφοράς απαιτεί επαναληπτική διαδικασία.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1960 αναγνωρίστηκε ότι η μέθοδος αποτελεί συγκεκριμένη μορφή της μεθόδου «Ritz», και το 1964 οι «Zienkiewicz» και «Cheung» έδειξαν ότι μπορεί να εφαρμοσθεί σε όλα τα προβλήματα πεδίου που έχουν μεταβολική διατύπωση.

4.2. Βασικές Έννοιες

Βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Μ.Π.Σ.) αποτελεί η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με συστατικά στοιχεία, τα οποία συνδέονται με ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Η μεθοδολογία αυτή δεν είναι ικανή να εκφράσει μία συνεχή κατασκευή, καθώς δεν έχει φυσικούς διαχωρισμούς. Για αυτό το λόγο απαιτείται ο τεχνητός διαχωρισμός της σε στοιχεία που να συνδέονται κατά μήκος των άκρων τους. Τα πεπερασμένα στοιχεία έχουν συνηθέστερα μορφή τετραπλεύρου ή τριγώνου και οι κόμβοι βρίσκονται τις περισσότερες φορές στα άκρα των (Σχήμα 4.1.).



Σχήμα 4.1. (a) Ένας κόμβος σε δισδιάστατο περιβάλλον, (b) Ένα τριγωνικό στοιχείο, το οποίο αποτελείται από τρεις κόμβους. (c) Τριγωνικά στοιχεία μαζί σχηματίζοντας ένα πλέγμα.

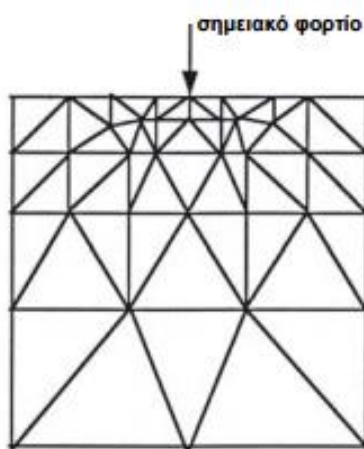
Για να γίνει χρήση μεθόδων μήτρας απαιτείται να προσομοιωθεί η συνεχής κατασκευή με ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και σε ορισμένες περιπτώσεις και οι παράγωγοί τους. Εάν περιλαμβάνονται οι παράγωγοι γίνεται λόγος για βαθμούς ελευθερίας αντί για μετατοπίσεις κόμβων. Οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των κόμβων, ώστε όλες οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων να εκφράζονται συναρτήσει των κομβικών μετατοπίσεων. Συνεπώς, οι μόνοι άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις στους κόμβους, έτσι το πρόβλημα μετατρέπεται από συνεχές σε διακριτό. Παρά το μέγεθος του αριθμού των κομβικών μετατοπίσεων, ο αριθμός τους παραμένει πεπερασμένος. Το πρόβλημα με αυτόν τον τρόπο καταλήγει να εκφράζεται ως ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων για την επίλυση τους χρησιμοποιούνται αριθμητικές μεθόδους.

Με σκοπό την ακριβή λύση ενός συγκεκριμένου προβλήματος στη διακριτοποιημένη μορφή του, είναι απαραίτητο να ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας και γεωμετρικής συμβιβαστότητας στο εσωτερικό των στοιχείων και στα σύνορά τους. Η απαίτηση αυτή μεταφράζεται στην ικανοποίηση τεσσάρων συνθηκών. Παραδείγματος χάρη, σε μία συνεχή κατασκευή όπως ένα έλασμα ισχύει η συνέχεια των μετατοπίσεων στα κοινά όρια των στοιχείων. Αλλά στο αριθμητικό μοντέλο δεν επαρκεί η ικανοποίηση των συνθηκών της συνέχειας μετατοπίσεων στους κόμβους και μόνο. Αν λοιπόν δεν διατυπωθούν περιορισμοί των μετατοπίσεων κατά μήκος των ορίων των στοιχείων, το θεωρητικό μοντέλο της κατασκευής θα είναι περισσότερο εύκαμπτο, γιατί θα δημιουργηθούν κενά. Ένας τρόπος να περιορισθεί το σφάλμα είναι να χρησιμοποιηθούν μικρότερα και περισσότερα στοιχεία διότι έτσι θα δημιουργηθούν περισσότεροι κόμβοι και συνεπώς περισσότερα σημεία στα οποία θα ικανοποιείται η συμβιβαστότητα.

Όμως μια διακριτή προσομοίωση δεν μπορεί να αποδώσει με απόλυτη ακρίβεια την συμπεριφορά ενός συνεχούς μέσου, ανεξαρτήτως του αριθμού των διακριτών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται. Υπάρχει δηλαδή πάντοτε ένα σφάλμα, το οποίο όμως μπορεί να

περιορισθεί και να γίνει αμελητέο και τοπικό. Δεν είναι συνεπώς δυνατόν να ικανοποιηθούν όλες οι προαναφερθείσες συνθήκες με απόλυτη ακρίβεια, έστω και αν γίνει χρήση μεγάλου αριθμού στοιχείων. Είναι όμως δυνατό, με σωστή επιλογή των ιδιοτήτων των στοιχείων και κατάλληλη διακριτοποίηση, να περιορισθεί το αριθμητικό σφάλμα. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των στοιχείων αποτελεί ένα από τα βασικότερα στάδια διατύπωσης μιας λύσης. Θα πρέπει τότε να γίνεται αυτό, έτσι ώστε να ικανοποιούνται επαρκώς οι συνθήκες συμβιβαστότητας χωρίς να χρειασθεί να γίνει χρήση υπερβολικά μικρών στοιχείων. Η συμπεριφορά των στοιχείων καθορίζεται από συναρτήσεις οι οποίες ορίζουν τον τρόπο μεταβολής των τάσεων ή των μετατοπίσεων στο εσωτερικό τους. Με άλλα λόγια, προκαθορίζεται ο τρόπος συμπεριφοράς των διαφόρων μεταβλητών. Το αποτέλεσμα είναι ότι, παρ όλο που οι συνθήκες ισορροπίας και συμβιβαστότητας ικανοποιούνται μόνο στους κόμβους, η προδιαγεγραμμένη συμπεριφορά στο εσωτερικό κάθε στοιχείου εξασφαλίζει ότι η συμβιβαστότητα ικανοποιείται επαρκώς στο εσωτερικό και στα σύνορά τους. (Καρύδης, 2016)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ακρίβεια της μεθόδου αυξάνεται όταν αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων, ή καλύτερα, των κόμβων (**Σχήμα 4.2.**). Με τον αυξανόμενο αριθμό στοιχείων, αυξάνεται ο υπολογιστικός χρόνος. Η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων χρησιμοποιείται για να αποκτηθεί ακριβέστερη εικόνα της τοπικής συμπεριφοράς, απαραίτητο για τις κατεργασίες μετάλλων όπως η έλαση, μιας και η εκλέπτυνση των κόκκων είναι εντονότερη στην επιφάνεια. Έτσι, η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων είναι ένας εφικτός τρόπος ελάττωσης του υπολογιστικού χρόνου, χωρίς όμως να μειωθεί ακρίβεια της λύσης του προβλήματος.



Σχήμα 4.2. Βαθμιαία ελάττωση του μεγέθους των στοιχείων (Καρύδης, 2016)

Εξαιτίας όμως της μεγάλης ποικιλίας φορτίσεων δεν είναι δυνατό να δοθεί γενικός κανόνας σχετικά με τον αριθμό, το μέγεθος των στοιχείων και τον τρόπο διακριτοποίησης, που απαιτούνται για επαρκή ακρίβεια, επομένως πρέπει να αναζητηθεί η κεκτημένη γνώση σε πειράματα με παρόμοιες φορτίσεις, δηλαδή τελικά παρόμοιες κατεργασίες. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η ακρίβεια της λύσης για το συγκεκριμένο πρόβλημα (Σχήμα 3). Στην περίπτωση συγκεντρωμένων φορτίων ο προφανής τρόπος είναι να επιλεγεί κόμβος στο σημείο εφαρμογής του φορτίου. Τα περισσότερα στοιχεία επίπεδης εντατικής κατάστασης δεν έχουν στρεπτικό βαθμό ελευθερίας, έτσι δεν είναι δυνατό να γίνει χρήση αντίστοιχων ροπών στους κόμβους. Αυτό δεν είναι όμως σοβαρό πρόβλημα διότι οι κόμβοι είναι αρκετά

κοντά ο ένας στον άλλο και έτσι οι δυνάμεις στους κόμβους αποτελούν ικανοποιητική προσομοίωση του κατανεμημένου φορτίου. (Καρύδης, 2016)

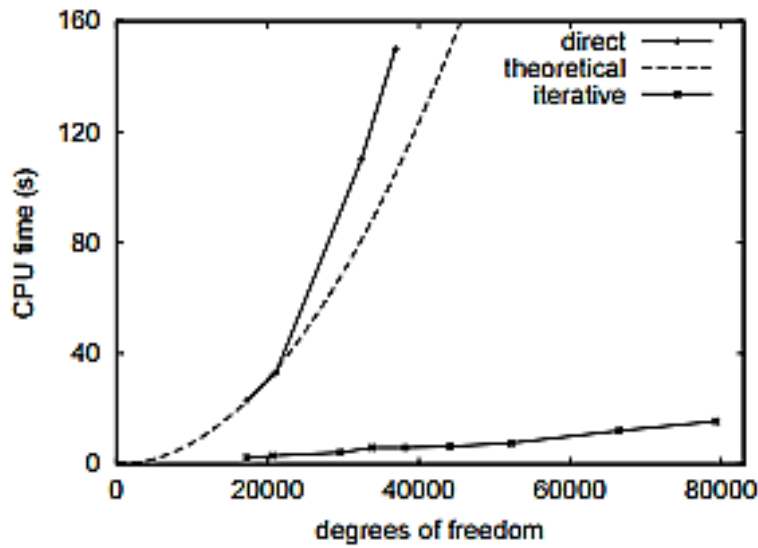
4.3. Στατική-έμμεση μέθοδος και άμεση-δυναμική μέθοδος

Οι δύο βασικές διαδικασίες επίλυσης για την προσομοίωση της έλασης, και κατά γενική ομολογία των περισσότερων κατεργασιών διαμόρφωσης σε φύλλα, είναι η άμεση ή δυναμική και η έμμεση ή στατική μέθοδος. Αρχές των δύο μεθόδων είναι η διατήρηση της μάζας, της ενέργειας, της ορμής και της στροφορμής.

Η δυναμική χρησιμοποιείται συχνότερα, στις κατεργασίες μορφοποίησης όπως η έλαση, απ ότι η στατική διότι ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτεί είναι πολύ μικρότερος (Mattiasson, K., L. Bernsprång, A. Honecker, E. Schedin, T. Hamman and A. Melander, 1991) (Mercer, C. D., J. D. Nagtegaal, N. Rebelo, 1995) (Yang, D.Y., D.W. Jung, I. S. Song, D. J. Yoo, J.H. Lee, 1995) (Boogaard, 2002). Όμως κάθε μέθοδος έχει και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της, συγκεκριμένα η δυναμική μέθοδος είναι μία υπό όρους, σχετικά σταθερή μέθοδος, δηλαδή απαιτεί εξαιρετικά μικρά χρονικά βήματα και προσαρμογές του εκάστοτε μοντέλου. Το ισοζύγιο μετά το πέρας κάθε βήματος δεν ικανοποιείται, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένους υπολογισμούς τάσεων και μη ρεαλιστικά σχήματα (Gelin, J. C., B. Liu, C. Labergere, 2000).

Στον αντίποδα, η στατική έμμεση μέθοδος είναι σταθερή, δηλαδή το ισοζύγιο ικανοποιείται στο τέλος κάθε χρονικού βήματος, επόμενως είναι και πιο αξιόπιστη. Εκεί όμως όπου δεν είναι ικανή να ανταγωνιστεί την άμεση μέθοδο είναι ο υπολογιστικός χρόνος. Και αυτό οφείλεται στην ανάγκη της στατικής μεθόδου να επιλύσει κάθε πρόβλημα με τη χρησιμοποίηση ενός συστήματος γραμμικών εξισώσεων σε κάθε χρονικό βήμα. Ένα ακόμα μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η σύγκλιση είναι δύσκολο να επιτευχθεί σε κάποια προβλήματα.

Οι επιλύτες των μεθόδων είναι είτε άμεσοι είτε επαναληπτικοί (**Σχήμα 4.3**). Στην στατική μέθοδο αν χρησιμοποιηθεί ο επαναληπτικός επιλύτης, τότε επιτυγχάνεται η επίλυση μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων μεγάλης κλίμακας κάτι αδύνατο με τον άμεσο επιλύτη. Η χρήση επαναληπτικών επιλυτών σε ημιστατική ελαστοπλαστική προσομοίωση ανφέρθηκε από τους (Kacou, S. and I. D. Parsons, 1993) (Mahnken, 1995) (Jefferson, A. D. and H. R. Thomas, 1997) (Van den Boogaard, A. H., A. D. Rietman and J. Huétink, 1998) (Ferencz, R. M. and T. J. R. Hughes, 1998) (Demarco, D. and E. N. Dvorkin, 2001) (Mocellin, K., L. Fourment, T. Coupez and J. L. Chenot, 2001) και αφορούσε την πιθανότητα βελτιωμένης σύγκλισης σε κάποιες περιπτώσεις. Για παράδειγμα σε γραμμική δυναμική τρισδιάστατη ανάλυση, ο υπολογιστικός χρόνος που χρειάστηκαν οι επαναληπτικοί επιλύτες σε σχέση με αυτόν που χρειάστηκαν οι άμεσοι είναι κατά πολύ μικρότερος.



Σχήμα 4.3. Ο υπολογιστικός χρόνος για άμεσο και επαναληπτικό επιλύτη.

4.4. Μηχανική της παραμόρφωσης στη Μ.Π.Σ.

Σε ένα απολύτως στερεό σώμα κατά την μετακίνησή του από θέση σε θέση λόγω της επιβολής φορτίων, η απόσταση δύο τυχαίων σημείων του δεν μεταβάλλεται. Σε ένα παραμορφώσιμο σώμα υπό την δράση μαζικών και επιφανειακών δυνάμεων προκαλείται παραμόρφωση. Για να μετρηθεί η παραμόρφωση παρακολουθούμε ένα στοιχειώδες τμήμα του σώματος πριν και μετά την παραμόρφωση. Το αρχικό μήκος του στοιχειώδους τμήματος σε ένα καρτεσιανό σύστημα αναφοράς δηλ. πριν την παραμόρφωση, δίδεται από τη σχέση: (Κουμούσης, 2016)

$$(ds)^2 = dx_i dx_i = (dx_1)^2 + (dx_2)^2 + (dx_3)^2 \quad 4.1.$$

όπου ισχύει ή σύμβαση της άθροισης για επαναλαμβανόμενους δείκτες.

Θεωρώντας την παραμόρφωση ως ένα μετασχηματισμό των συντεταγμένων x_i των σημείων του σώματος στις συντεταγμένες ξ_i τότε μπορούμε να γράψουμε:

$\xi_i = \xi_i(x_1, x_2, x_3)$ ή και αντιστρόφως $x_i = x_i(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ θεωρώντας την απεικόνιση αμφιμονοσήμαντη.

Με βάση τις σχέσεις αυτές τα διαφορικά και το τετράγωνο του μήκους αντίστοιχα εκφράζονται ως εξής:

$$dx_i = \left(\frac{\partial x_i}{\partial \xi_i} \right) d\xi_i, \quad d\xi_i = \left(\frac{\partial \xi_i}{\partial x_i} \right) dx_i \quad 4.2.$$

$$(ds)^2 = dx_i dx_i = \frac{\partial x_i}{\partial \xi_m} \frac{\partial x_i}{\partial \xi_k} d\xi_m d\xi_k \quad 4.3.$$

Στην εξίσωση 4.3. οι επαναλαμβανόμενοι δείκτες αθροίζονται σε όλο το πεδίο τους, δηλ. $i, m, k=1,2,3$.

Αντιστοίχως, το παραμορφωμένο τμήμα θα έχει μήκος υψωμένο στο τετράγωνο το εξής:

$$(ds')^2 = d\xi_i d\xi_i = \frac{\partial \xi_i}{\partial x_m} \frac{\partial \xi_i}{\partial x_k} dx_m dx_k \quad 4.4.$$

Βάσει των παραπάνω ορίζεται ως μέτρο της παραμόρφωσης η διαφορά των τετραγώνων των δύο μηκών πριν και μετά την παραμόρφωση. Είναι δυνατό να εκφραστεί το μέγεθος αυτό είτε ως προς την απαραμόρφωτη είτε ως προς την παραμορφωμένη κατάσταση ως εξής:

$$(ds')^2 - (ds)^2 = \left(\frac{\partial \xi_i}{\partial x_i} \frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} - \delta_{ij} \right) dx_i dx_j \quad 4.5.$$

$$(ds')^2 - (ds)^2 = \left(\delta_{ij} - \frac{\partial x_i}{\partial \xi_i} \frac{\partial x_i}{\partial \xi_j} \right) d\xi_i d\xi_j \quad 4.6.$$

Οπότε προκύπτουν :

$$(ds')^2 - (ds)^2 = 2\varepsilon_{ij} dx_i dx_j \quad 4.7.$$

$$(ds')^2 - (ds)^2 = 2\eta_{ij} d\xi_i d\xi_j \quad 4.8.$$

όπου εισάγονται οι όροι της παραμόρφωσης.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \xi_i}{\partial x_i} \frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} - \delta_{ij} \right) \quad 4.9.$$

$$\eta_{ij} = \frac{1}{2} \left(\delta_{ij} - \frac{\partial x_i}{\partial \xi_i} \frac{\partial x_i}{\partial \xi_j} \right) \quad 4.10.$$

Οι όροι της παραμόρφωσης ε_{ij} συμπεριφέρονται ως στοιχεία τανυστή δευτέρας τάξεως, ο οποίος καλείται τανυστής της παραμόρφωσης κατά «Green» και αναφέρεται στην απαραμόρφωτη κατάσταση ή αλλιώς στη διατύπωση κατά «Lagrange». Οι όροι της παραμόρφωσης η_{ij} συμπεριφέρονται επίσης, ως στοιχεία τανυστή δευτέρας τάξεως, ο οποίος καλείται τανυστής της παραμόρφωσης κατά «Almansi» και αναφέρεται στην παραμορφωμένη κατάσταση ή διαφορετικά σε περιγραφή κατά «Euler» (Κουμούσης, 2016).

Μέρος Δεύτερο

5. Πειραματική Διαδικασία

Στην παρούσα διπλωματική εργασία το πρόγραμμα προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι το «ANSYS R17.0». Τα πειράματα έλαβαν χώρα στην ερευνητική εταιρία ELKEME Α.Ε., της ΒΙΟΧΑΛΚΟ Α.Ε. (Viohalco S.A.).

5.1. Προετοιμασία

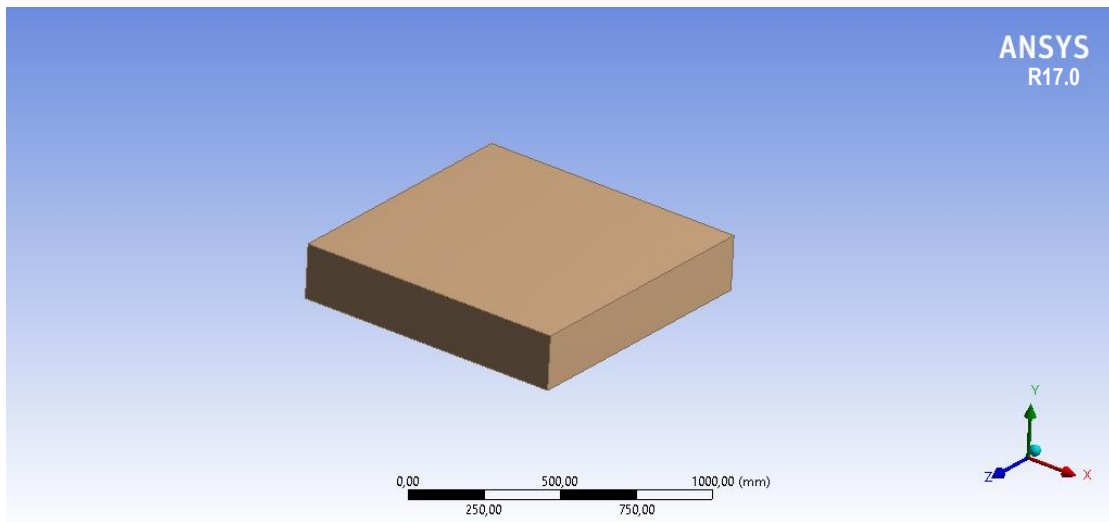
Κατά την προετοιμασία της πειραματικής διαδικασίας ακολουθήθηκαν τα εξής απαραίτητα βήματα (Hutton, 2004):

I. Προσδιορισμός της γεωμετρίας του προς μελέτη προβλήματος.

Εδώ ανήκει ο ακριβής καθορισμός των γεωμετρικών συνιστωσών του υλικού και του μηχανήματος. Για τις μελέτες κατασκευάστηκαν, μία πλάκα αλουμινίου κράματος 5052, μία πλάκα αλουμινίου κράματος 7075-O, μία πλάκα αλουμινίου 7075-T6, τα δύο χαλύβδινα ράουλα εργασίας κράματος H13 και τέσσερα κουζινέτα από χάλυβα H13 πάνω στα οποία εδράζονται τα ράουλα εργασίας. Στη βιομηχανία χρησιμοποιείται κατά κόρον ο χάλυβας H13 στις κατεργασίες εν θερμώ, όπως η έλαση. Τα ράουλα εργασίας έχουν ευθυγραμμιστεί μεταξύ τους, όπως και τα κουζινέτα και το κέντρο της πλάκας ισαπέχει από τα κέντρα των ραούλων.

Πίνακας 5.1.

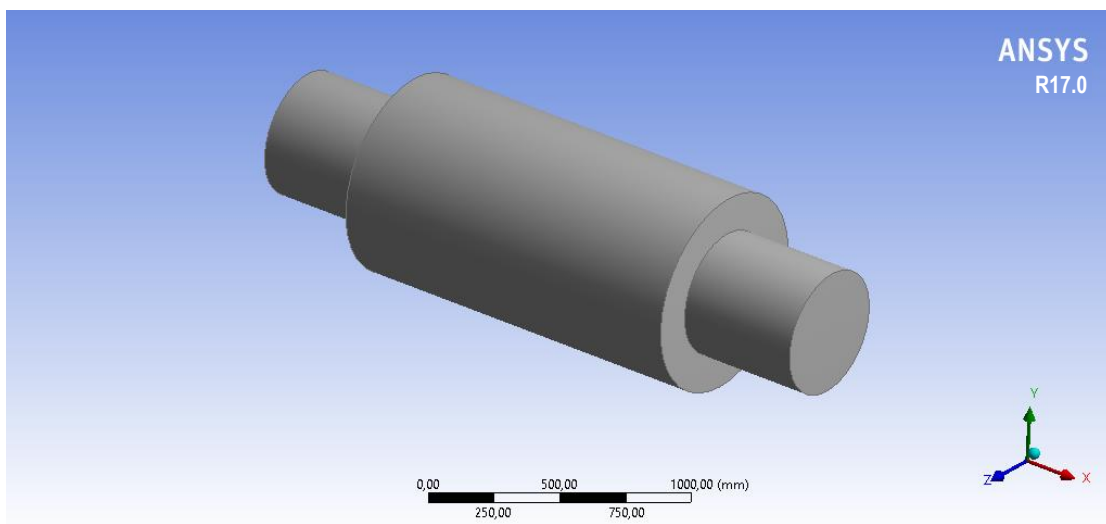
(mm)	Πλάκα Αλουμινίου	
Μήκος	Πλάτος	Πάχος
1000	500	200



Σχήμα 5.2. Η πλάκα αλουμινίου κατασκευασμένη στο «ANSYS».

Πίνακας 5.3.

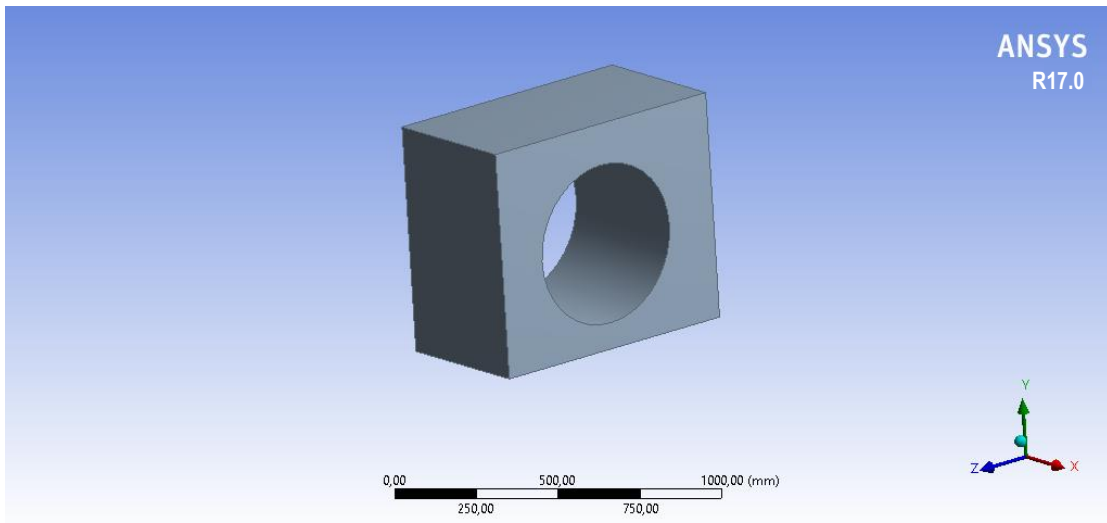
(mm)	Ράουλο Εργασίας	
	Μήκος	Διάμετρος
Κυρίως σώμα	1500	800
Κάθε άκρο	500	500



Σχήμα 5.4. Το ράουλο εργασίας κατασκευασμένο στο «ANSYS».

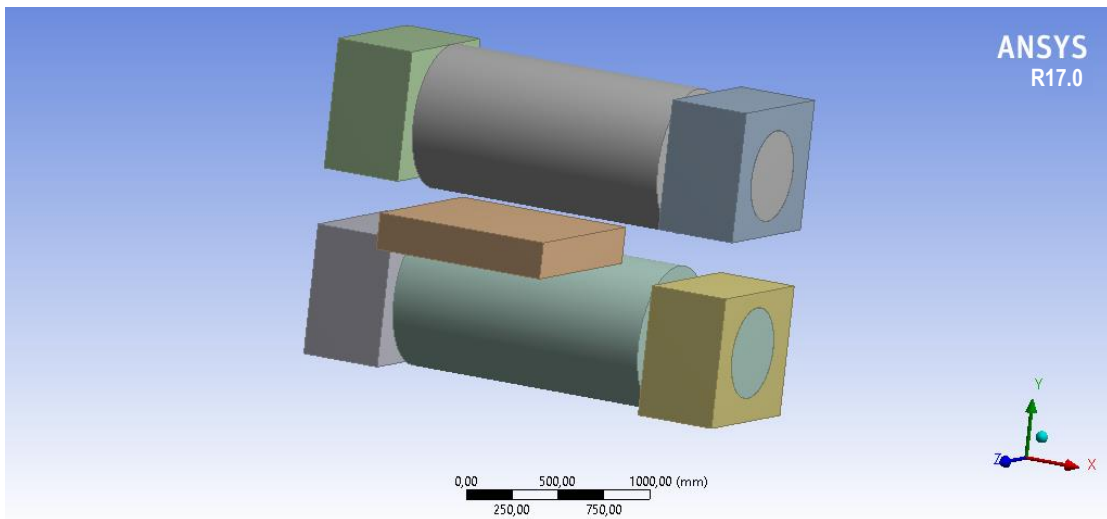
Πίνακας 5.5.

(mm)	Κουζινέτο		
	Μήκος	Πλάτος	Πάχος
832	716	450	504

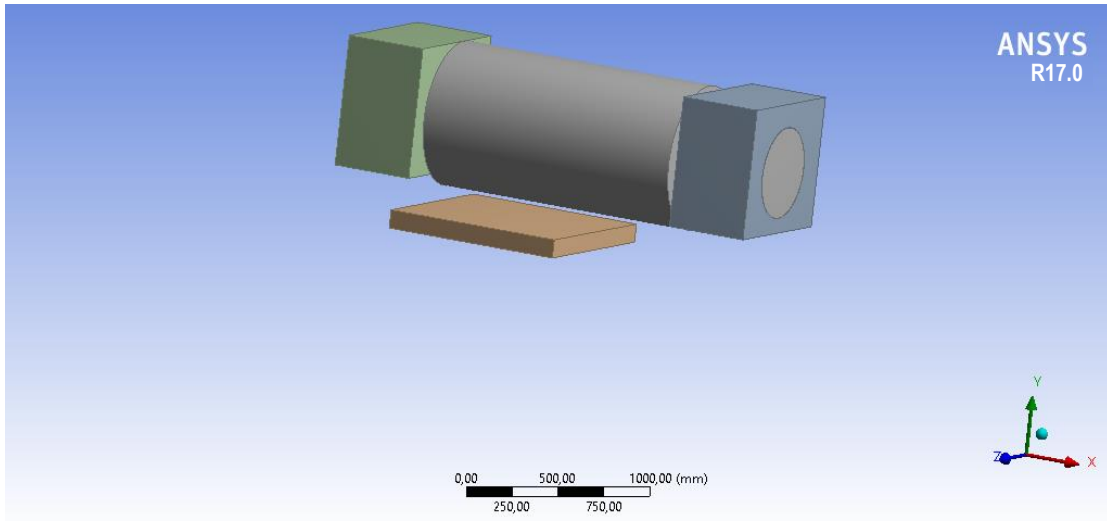


Σχήμα 5.6. Το κουζιμένο έδρασης του ραούλου, κατασκευασμένο στο «ANSYS»

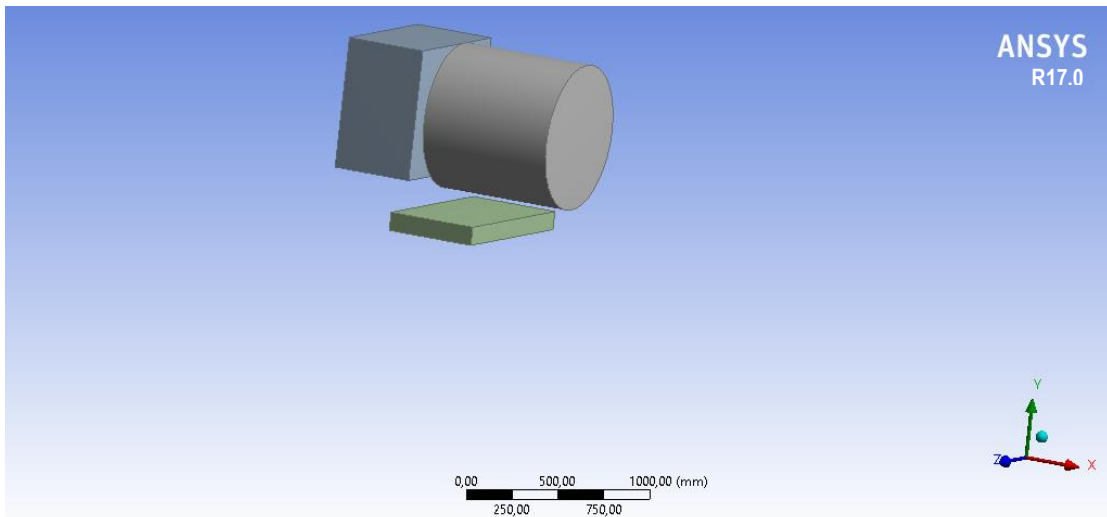
Κατόπιν στην ολοκληρωμένη κατασκευή (**Σχήμα 5.7.**), με σκοπό τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου της προσομοίωσης, εφαρμόζεται ένα επίπεδο συμμετρίας παράλληλο με τις άνω και κάτω επιφάνειες της πλάκας που έρχονται σε επαφή με τα ράουλα, όπως εικονίζεται στο **Σχήμα 5.8.** και έπειτα για περαιτέρω μείωση του υπολογιστικού χρόνου, εφαρμόζεται ένα επιπλέον επίπεδο συμμετρίας κάθετο αυτή τη φορά στις άνω και κάτω επιφάνειες της πλάκας και κατά μήκος του μέσου τους (**Σχήμα 5.9.**).



Σχήμα 5.7. Η ολοκληρωμένη κατασκευή πριν την επιβολή επιπέδων συμμετρίας.



Σχήμα 5.8. Η ολοκληρωμένη κατασκευή μετά την εφαρμογή του πρώτου επιπέδου συμμετρίας.



Σχήμα 5.9. Η ολοκληρωμένη κατασκευή μετά την εφαρμογή του δεύτερου επιπέδου συμμετρίας.

II. Επιλογή των κατάλληλων στοιχείων για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα τριγωνικά και τετραγωνικά στοιχεία, εφόσον σε μελέτες που πραγματοποιούνται την θερμή και ψυχρή έλαση είναι τα συνηθέστερα. (A. Soulamí, CA Lavender, DM Paxton, DE Burkes, April 2014)

III. Καθορισμός των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των στοιχείων και κατ'επέκταση του υλικού.

Οι φυσικομηχανικές ιδιότητες της πλάκας αλουμινίου κράματος 5052 που χρησιμοποιήθηκαν για την περαίωση των μελετών, δίνονται από τους παρακάτω πίνακες :

Πίνακας 5.10.

Πυκνότητα	2680 kg/m ³
Μέτρο Ελαστικότητας	70,3 GPa
Δείκτης «Poisson»	0,33
Μέτρο Ελαστικότητας Όγκου	69 GPa
Μέτρο Διάτμησης	26,5 GPa

Το μέτρο ελαστικότητας όγκου (bulk modulus) και το μέτρο διάτμησης (shear modulus) προκύπτουν υπολογιστικά από το πρόγραμμα προσομοίωσης «ANSYS» με βάση το μέτρο ελαστικότητας που έχει δοθεί.

Πίνακας 5.11.

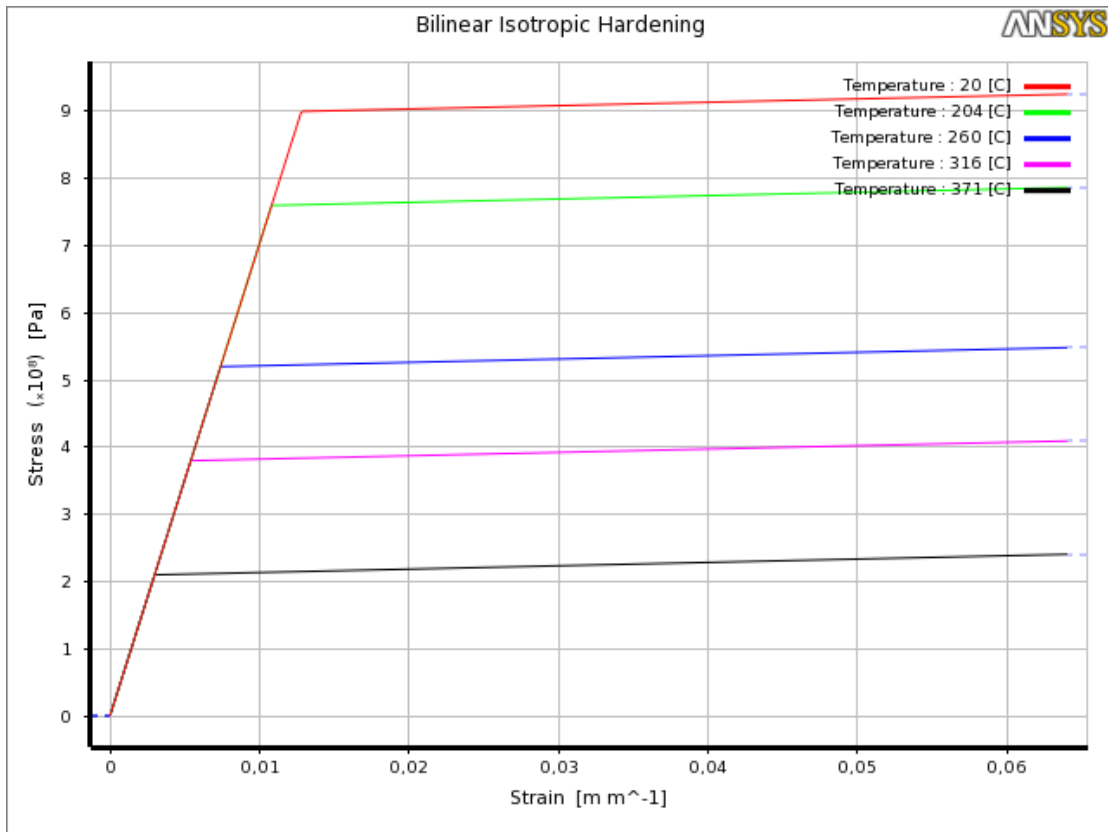
Θερμοκρασία (°C)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/m*°C)
100	140
200	150
300	160
400	170
500	180
600	190

Πίνακας 5.12.

Θερμοκρασία (°C)	Τάση Διαρροής (MPa)	Μέτρο Παραμόρφωσης (MPa)
20	90	500
204	76	500
260	52	500
316	38	500
371	21	500

Ακολούθως στο **Σχήμα 5.13**, δίνονται οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για διαφορετικές θερμοκρασίες και όπως φαίνεται η τελευταία αναγραφόμενη θερμοκρασία είναι 371 °C και όχι 550 °C, που αρχίζει η θερμή έλαση. Αυτό συμβαίνει γιατί, αφού εισήχθησαν τα δεδομένα μέχρι και τους 371 °C στο πρόγραμμα, για ανώτερες θερμοκρασίες συμπληρώθηκαν αυτόματα οι αντίστοιχες τάσεις διαρροής. Η συμπλήρωση έγινε με τη χρήση της μεθόδου «extrapolation» σύμφωνα με την αγγλική ορολογία, δηλαδή την εκτίμηση νέων τιμών, πέρα από την περιοχή στην οποία υπάρχουν οι πραγματικές μετρήσεις. Και επιτεύχθηκε με χρήση συναρτήσεων που προκύπτουν από το λόγο πολυωνυμικών συναρτήσεων.

Το μοντέλο περιγραφής που χρησιμοποιήθηκε για το παραπάνω κράμα είναι ελαστοπλαστικό, δηλαδή περιέχει τόσο την ελαστική, όσο και την πλαστική περιοχή του υλικού. (Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid)



Σχήμα 5.13. : Καμπύλες Τάσης-Παραμόρφωσης του κράματος 5052 του αλουμινίου για διαφορετικές θερμοκρασίες που κατασκευάστηκε στο «ANSYS R17.0».

Αναφορικά με το κράμα αλουμινίου 7075-O, οι φυσικομηχανικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθες :

Πίνακας 5.14.

Πυκνότητα	2810 kg/m ³
Μέτρο Ελαστικότητας	71,7 GPa
Δείκτης «Poisson»	0,33
Μέτρος Ελαστικότητας Όγκου	70,2 GPa
Μέτρο Διάτμησης	26,9 GPa
Τάση Διαρροής	103 MPa

Οι φυσικομηχανικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν για το κράμα αλουμινίου 7075-T6 είναι οι ακόλουθες:

Πίνακας 5.15.

Πυκνότητα	2810 kg/m ³
Μέτρο Ελαστικότητας	71,7 GPa
Δείκτης «Poisson»	0,33
Μέτρος Ελαστικότητας Όγκου	70,2 GPa
Μέτρο Διάτμησης	26,9 GPa
Τάση Διαρροής	503 MPa

Στο κράμα 7075-O και 7075-T6 η τάση διαρροής δεν εκφράζεται συναρτήσει της θερμοκρασίας, διότι στην προσομοίωση υπέστησαν ψυχρή έλαση στους 100°C.

Το μοντέλο περιγραφής του χάλυβα H13 στην προσομοίωση είναι μόνο ελαστικό (Seropre KalraKjian, Steven R. Schmid), καθώς στην έλαση δεν παραμορφώνονται πλαστικά οι ρόλλοι εργασίας σε ένα πάσο. Όσον αφορά τις φυσικομηχανικές ιδιότητες του χάλυβα H13, που εισήχθησαν στο πρόγραμμα, ισχύουν τα εξής :

Πίνακας 5.16.

Πυκνότητα	7810 kg/m ³
Μέτρο Ελαστικότητας	215 GPa
Δείκτης «Poisson»	0,3
Μέτρος Ελαστικότητας Όγκου	179,17 GPa
Μέτρο Διάτμησης	82,7 GPa
Τάση Διαρροής	1650 MPa

Πίνακας 5.17.

Θερμοκρασία (°C)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/m*°C)
20	25
400	29
704	32

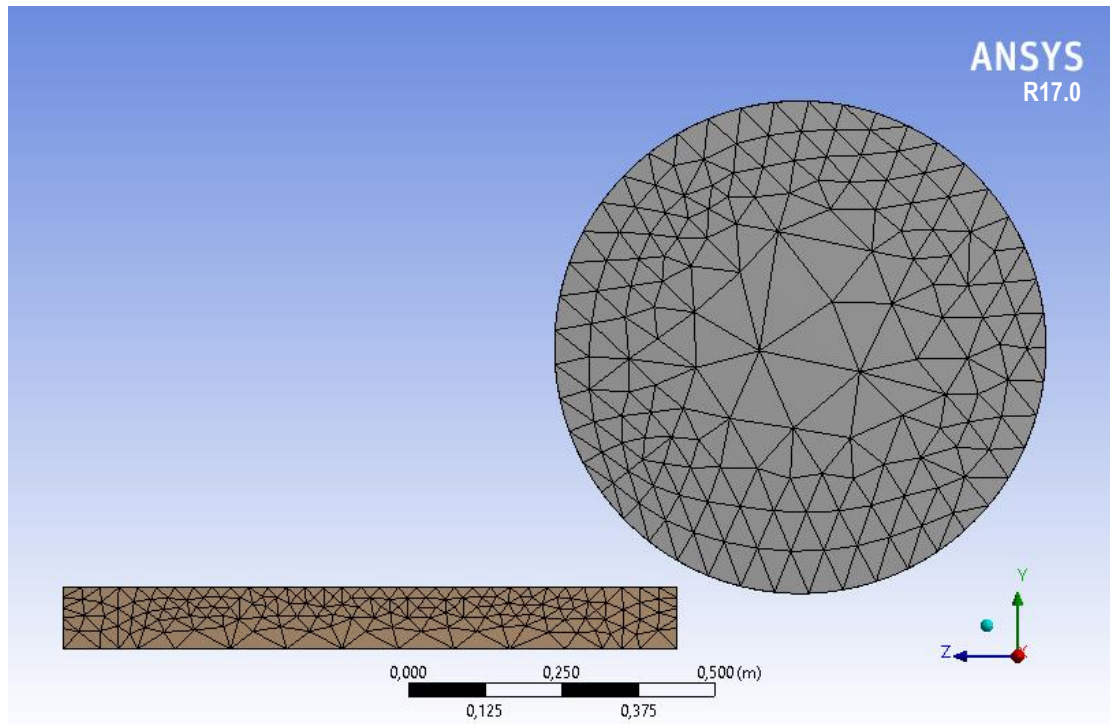
IV. Καθορισμός των γεωμετρικών παραμέτρων των στοιχείων.

Στο κουζινέτο, το πλέγμα του αποτελείται από τρισδιάστατα τριγωνικά και τετραγωνικά στοιχεία. Τα τετραγωνικά στοιχεία με ακμή 120 mm, ενώ τα τριγωνικά με κάθε πλευρά ίση με 120 mm. Το πλέγμα του ρόλου αποτελείται μόνο από τριγωνικά στοιχεία. Σε εκείνα, που βρίσκονται κατά μήκος του νοητού άξονα που περνά από το κέντρο του ρόλου, η κάθε πλευρά τους έχει μέγεθος 170 mm. Στην επιφάνεια του βασικού σώματος του ρόλου εφαρμόστηκε η εντολή πλέγματος «Refinement», η οποία αλλάζει το μέγεθος των στοιχείων που έχει οριστεί, σύμφωνα με έναν παράγοντα που παίρνει τις τιμές 1, 2, και 3. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ο παράγοντας 2 και παρήχθησε το αντίστοιχο αποτέλεσμα, όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.18. και 5.19. Στην πλάκα αλουμινίου επίσης τα στοιχεία είναι τριγωνικά με μέγεθος 95 mm, η κάθε πλευρά τους, στο κέντρο της πλάκας, ενώ για την επιφάνεια της χρησιμοποιήθηκε η εντολή «Refinement» με παράγοντα 2, όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.18, 5.19.

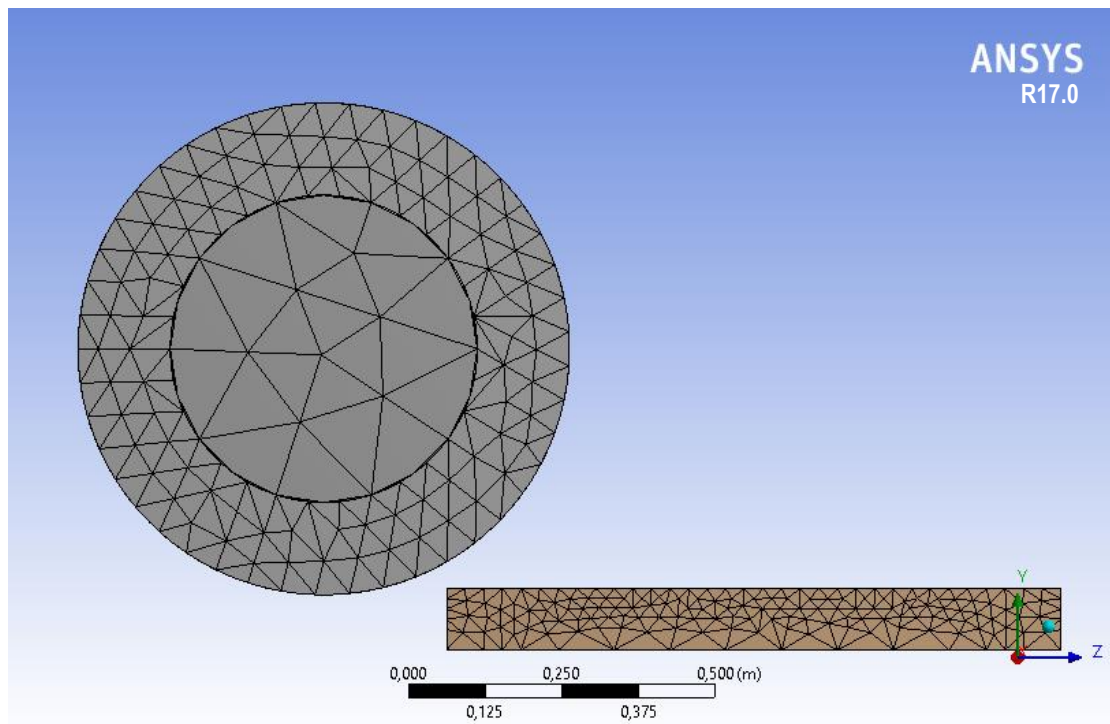
V. Δημιουργία και διαμόρφωση του πλέγματος των στοιχείων.

Το πλέγμα των στοιχείων στο ράουλο και στην πλάκα είναι πιο πύκνο στην επιφάνεια και αυξάνεται των μέγεθος των στοιχείων προς το κέντρο του καθενός (κέντρο αναφορικά με το σώμα πριν την επιβολή των συμμετρικών επιπέδων), διότι επιζητείται αυξημένη ακρίβεια μέτρησης στο σημείο επαφής της πλάκας και του ρόλου. Τα επιφανειακά στοιχεία θα παραμορφωθούν ως επί το πλείστον και σαφώς πολύ περισσότερο από τα κεντρικά, επομένως εκεί είναι απαραίτητη και αναγκαία η μέγιστη ακρίβεια της μέτρησης (Σχήμα 5.18., 5.19.). Από την άλλη, το πλέγμα του κουζινέτου, το οποίο δεν υπόκειται σε πλαστική

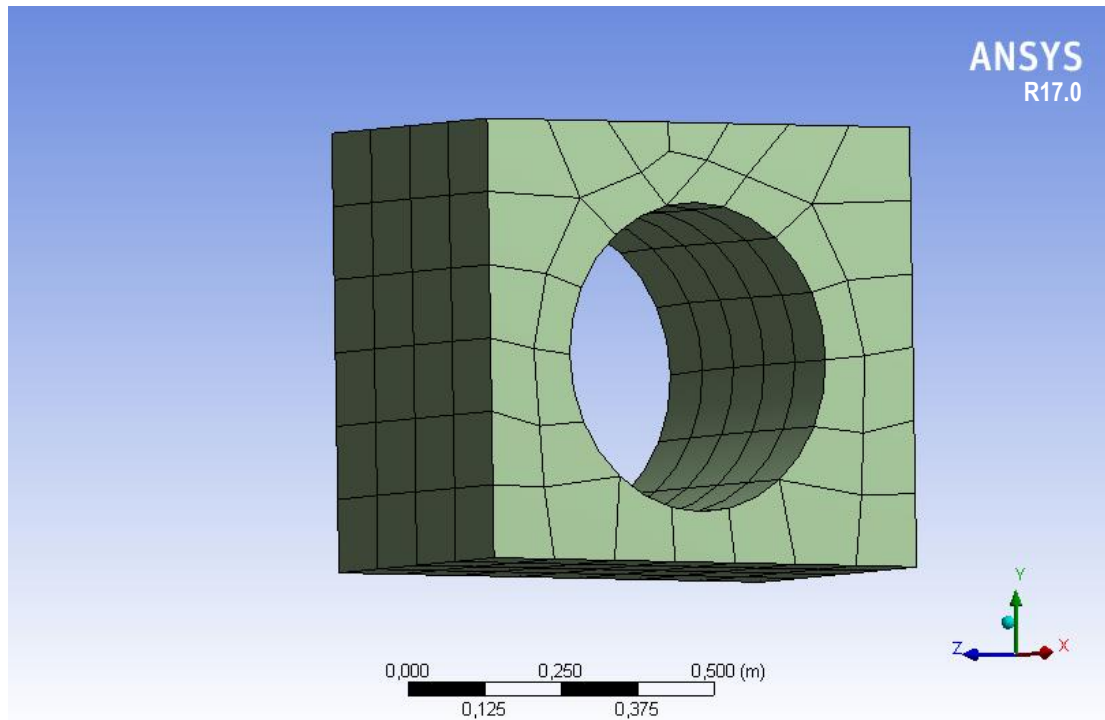
παραμόρφωση κατασκευάστηκε με αρκετά μεγαλύτερα στοιχεία, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.20**.



Σχήμα 5.18. Το πλέγμα στοιχείων πλάκας και ραούλου από την πλευρά της συμμετρίας.



Σχήμα 5.19. Το πλέγμα στοιχείων πλάκας και ραούλου από την πλευρά των φυσικών άκρων τους.



Σχήμα 5.20. Το πλέγμα στοιχείων του κουζινέτου.

VI. Προσδιορισμός των φυσικών περιορισμών ή αλλιώς των οριακών συνθηκών.

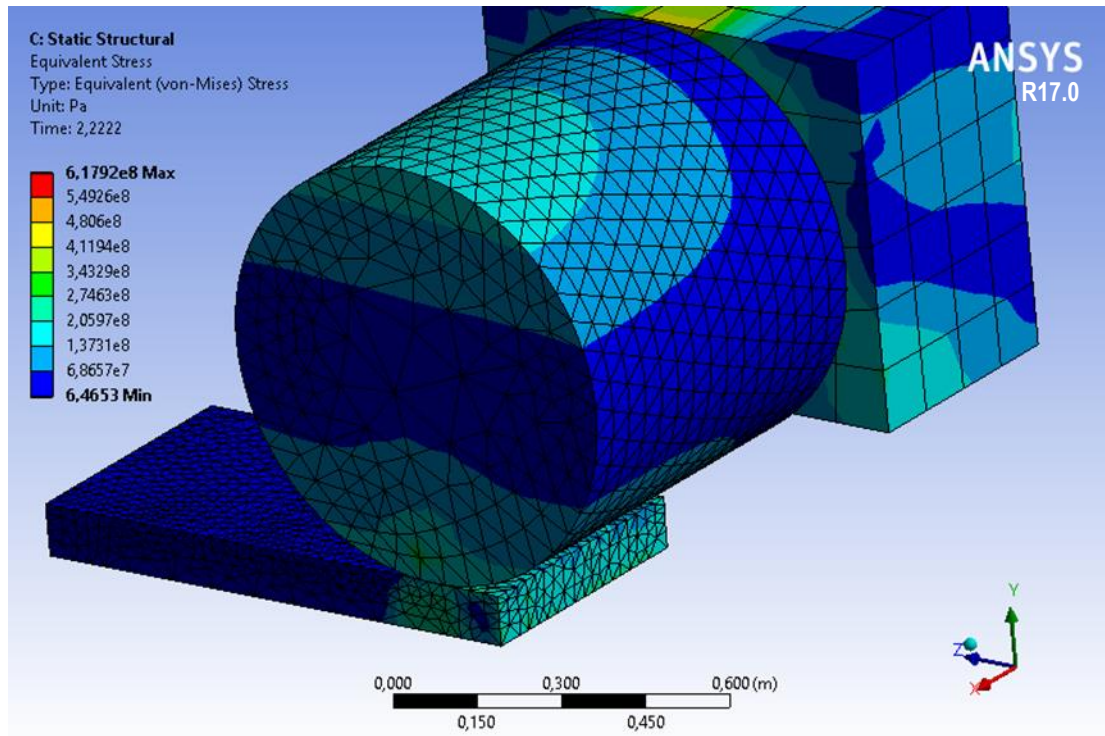
Σε αυτό το βήμα επισημάνθηκαν οι συνθήκες επαφής ανάμεσα στα σώματα. Στην επαφή ανάμεσα στο ράουλο και το κουζινέτο η τριβή είναι μηδενική. Η βάση του κουζινέτου επισημάνθηκε ως πακτωμένη. Η επαφή του ραούλου και της πλάκας τέθηκε με συντελεστή τριβής ίσο με 0,15. Επιπλέον, η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του ρόλου τέθηκε ίση με 3,65 rad/s ή 35 RPM και η μετατόπιση της πλάκας στο τέλος του χρονικού διαστήματος κάθε πειράματος ήταν 1,5 m γραμμικά με το χρόνο. Στα πειράματα της θερμής έλασης, η αρχική θερμοκρασία της πλάκας είναι 550 °C, ενώ του ρόλου και του κουζινέτου 150 °C. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος προσομοίωσης είναι 25 °C.

VII. Τέλος, προσδιορισμός των φορτίων που πρόκειται να επιβληθούν.

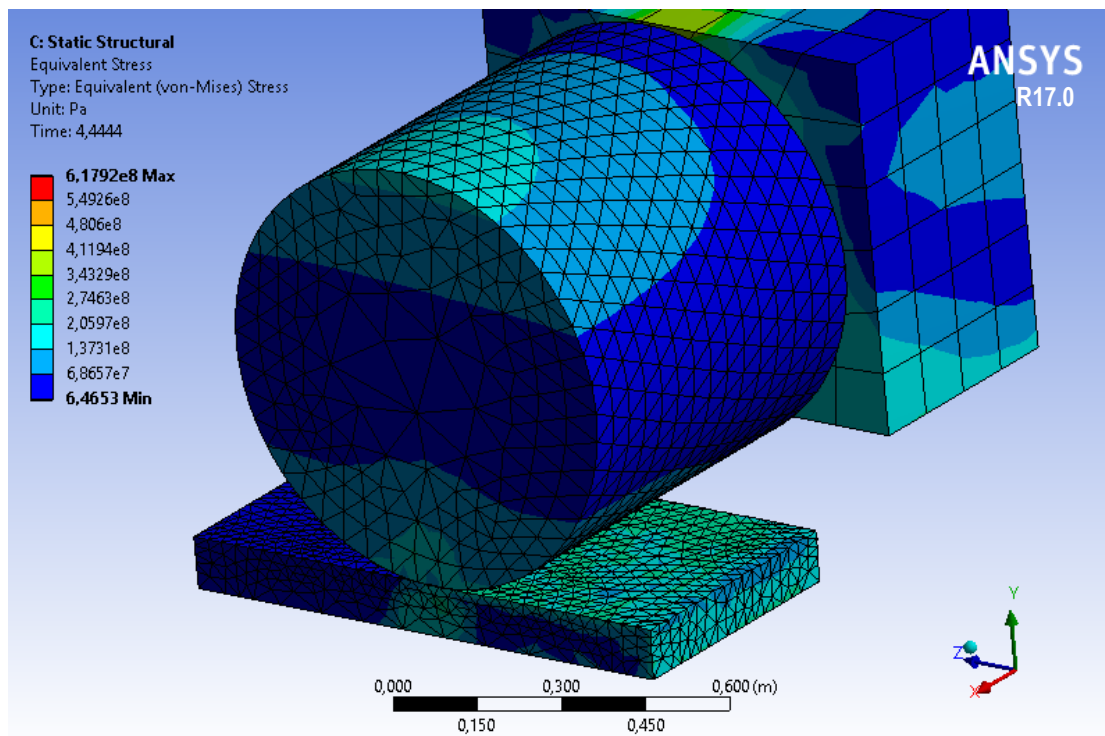
Τέλος, δεν επιβλήθηκε πριν την έναρξη κάθε πειράματος κανένα φορτίο.

Τα πειράματα μελέτης της μηχανικής συμπεριφοράς των κραμάτων αλουμινίου προσομοίωσαν ένα πάσο θερμής ή ψυχρής έλασης (αναλόγως τη μελέτη κάθε φορά) με διάρκεια 10sec. Ο πραγματικός υπολογιστικός χρόνος επίλυσης που χρειάστηκαν ήταν 24-28 ώρες. Τα πειράματα της θερμοκρασιακής μελέτης προσομοιάζουν 10min της διεργασίας, και κατέλαβαν πραγματικό υπολογιστικό χρόνο επίλυσης ίσο με 1h.

Χαρακτηριστικές εικόνες για την προσομοίωση ενός πάσου έλασης που επετεύχθη δίδονται στα παρακάτω **Σχήματα 5.21.-5.26.** :

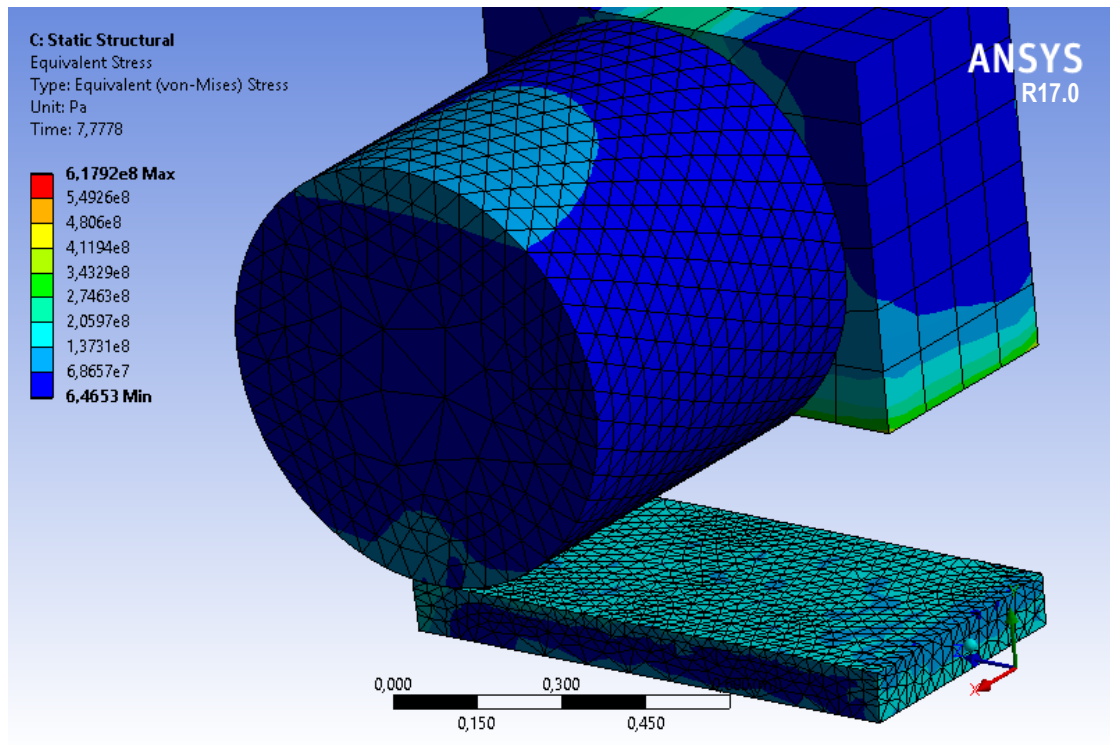


Σχήμα 5.21. Η διάταξη στην πρώτη επαφή πλάκας-ρόλλου εργασίας.

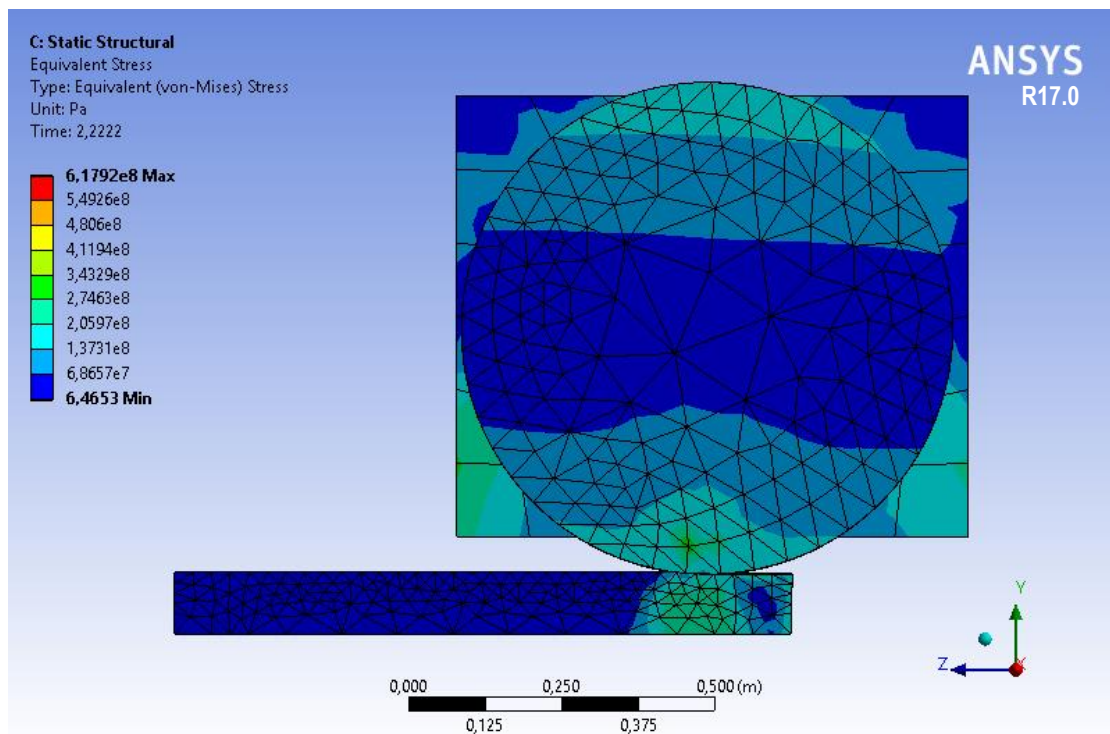


Σχήμα 5.22. Η διάταξη στο χρονικό μέσο περίπου του πάσου έλασης.

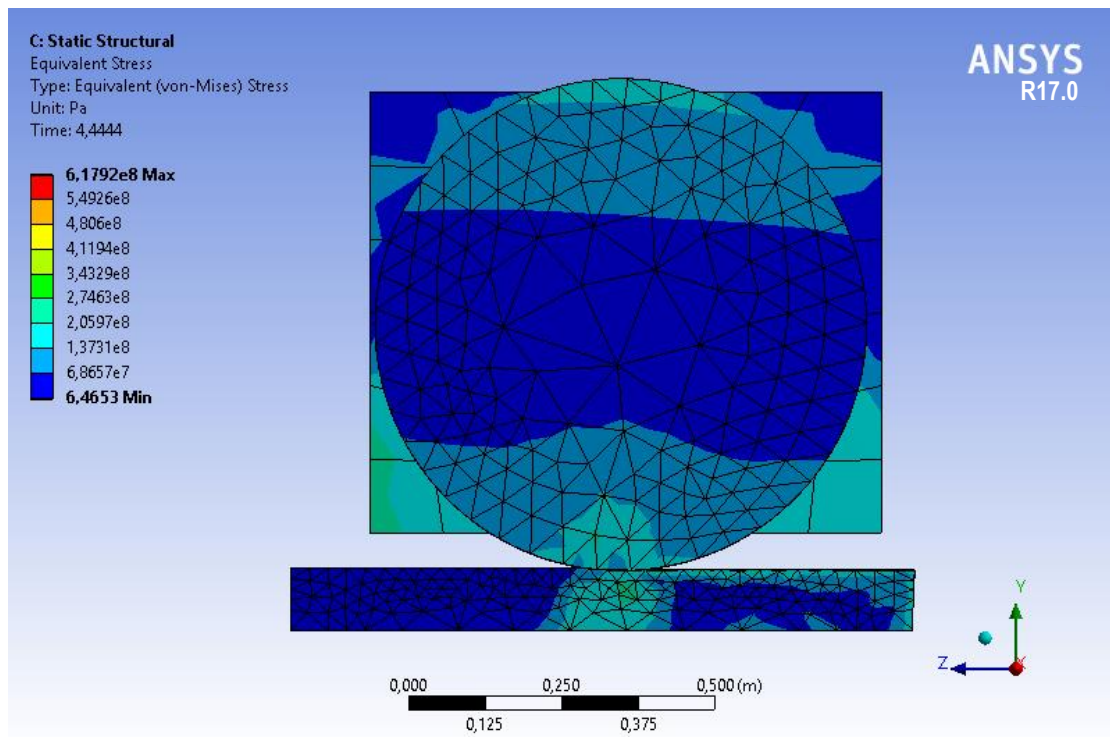
Προσομοίωση της θερμής και ψυχρής έλασης κράματος αλουμινίου
με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων



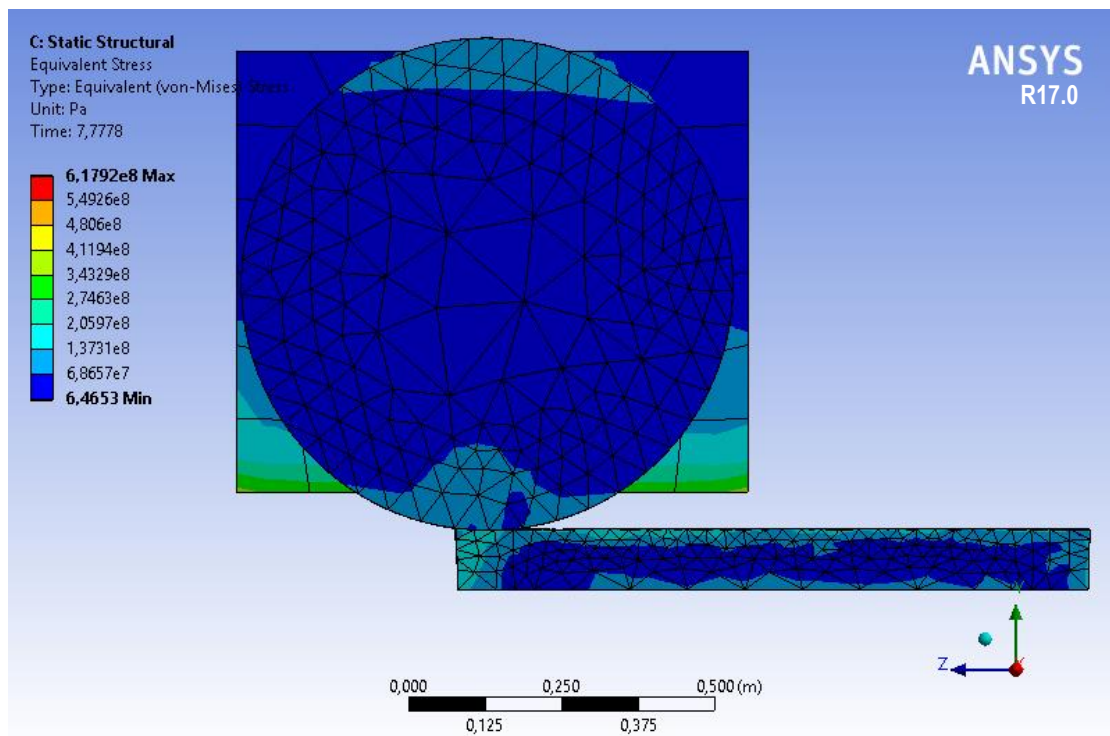
Σχήμα 5.23. Η διάταξη στο τέλος του πάσου.



Σχήμα 5.24. Αρχή του πάσου υποβιβασμού της πλάκας.



Σχήμα 5.25. Ο υποβιβασμός της πλάκας στο μέσο του χρονικού διαστήματος.



Σχήμα 5.26. Τέλος του πρώτου πάσου υποβιβασμού της πλάκας.

5.2. Θερμοκρασιακή Μελέτη

Προτού μελετηθεί εκτενώς η μηχανική συμπεριφορά του υλικού κατά την έλαση πρέπει να περιγραφεί η θερμοκρασιακή κατάσταση, στην οποία βρίσκεται και θα βρίσκεται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, αλλά και η κατανομή των διαφόρων θερμοκρασιών κατά μήκος και κατά πάχος του υλικού, δηλαδή το θερμοκρασιακό προφίλ του.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο θεωρητικό μέρος, η πλάκα αλουμινίου φτάνει στο έλαστρο σε θερμοκρασία περίπου 550 °C, αυτή η θερμοκρασία είναι λοιπόν η εναρκτήρια θερμοκρασία έλασης. Μετά το πέρας της έλασης και την έξοδο του υλικού από το έλαστρο, η θερμοκρασία του έχει μειωθεί σημαντικά και είναι ίση με περίπου 330 °C. Έχει τελεστεί σαφώς απόψυξη του υλικού, η οποία οφείλεται σε μεγάλο μέρος στην απαγωγή θερμότητας από το υλικό προς το περιβάλλον και προς τα ράουλα εργασίας. Αυτή η απαγωγή όμως είναι ανισομερής για όλο τον όγκο της πλάκας. Το άκρο της είναι εκείνο που έρχεται πρώτο σε επαφή με τα ράουλα και καθόλη τη διάρκεια της υπόλοιπης κατεργασίας μόνο η επιφάνεια της πλάκας του υλικού είναι σε άμεση επαφή με τα ράουλα. Επιπλέον, χρειάζεται να σημειωθεί ότι κατά την έναρξη λειτουργίας του μηχανήματος, τα ράουλα και τα κουζινέτα έδρασης των ρόλων, βρίσκονται σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία απ' ό,τι όταν έχουν προηγηθεί αρκετά πάσα έλασης.

Η παρούσα μελέτη λοιπόν πραγματεύεται την απόψυξη της πλάκας κατά την έλαση σε χρονική διάρκεια δέκα λεπτών, ξεκινώντας από τη θερμοκρασία 550 °C. Η μεταβολή της θερμοκρασίας μετρήθηκε σε δύο διαφορετικά σημεία της πλάκας, στο κέντρο κατά πάχος και στα άκρα της. Η χρονική διάρκεια είναι δέκα λεπτά, διότι είναι αρκετή για να παρατηρηθεί το θερμοκρασιακό προφίλ. Η προσομοίωση απόψυξης μέχρι τους 330 °C θα είχε ακριβώς το ίδιο αποτέλεσμα, δηλαδή να παρατηρηθεί η πτώση της θερμοκρασίας, με τη διαφορά ότι θα καταλάμβανε πολύ περισσότερο υπολογιστικό χρόνο. Το πλέγμα των στοιχείων των σωμάτων σε αυτή τη μελέτη είναι διαφορετικό απ' ό,τι στις υπόλοιπες. Επιλέχθηκε ένα πλέγμα με τετραγωνικά και τριγωνικά τρισδιάστατα στοιχεία, χωρίς να έχει βασική σημασία στην απόρροια της συγκεκριμένης μελέτης. Περαιτέρω, ενδιαφέρον κρύβει η απόψυξη του ρόλου και η διαμόρφωση του θερμοκρασιακού προφίλ του, γιατί κατά την περιστροφή του στη θερμή έλαση το ράουλο ψύχεται διαρκώς από ειδικούς ψεκαστήρες νερού που υπάρχουν εντός του ελάστρου.

5.3. Μελέτη της επίδρασης διαφορετικού υποβιβασμού της πλάκας

Κατά τη μελέτη αυτή διερευνήθηκε η δύναμη, που ασκείται στο έλαστρο και ειδικότερα στα δομικά μέρη του, δηλαδή τα ράουλα εργασίας και τα κουζινέτα, όταν η πλάκα αλουμινίου υπόκειται σε μείωση του πάχους της, καθώς περνάει από το διάκενο των δύο ρόλων εργασίας.

Η συγκεκριμένη μελέτη απαρτίζεται από πέντε πειράματα προσομοίωσης, στα οποία εφαρμόστηκαν διαφορετικές μειώσεις πάχους της πλάκας ξεκινώντας από τα 5 mm και

συνεχίζοντας με βήμα 5 mm σε κάθε επόμενο πείραμα. Οι δυνάμεις μετρήθηκαν στη βάση του κουζινέτου, η οποία θεωρήθηκε πακτωμένη. Κάθε πείραμα προσομοιάζει 10 sec θερμής έλασης. Η πλάκα έχει αρχική θερμοκρασία 550 °C και υπόκειται σε θερμή έλαση, κατά την οποία η θερμοκρασία αυτή μειώνεται. Τα ράουλα και τα κουζινέτα έχουν αρχική θερμοκρασία 150 °C Κατά τον υποβιβασμό της πλάκας, η δύναμη της έλασης, εξαρτάται από ποίκιλους παράγοντες, όπως η τριβή μεταξύ της επιφάνειας της πλάκας και των ραούλων, η ταχύτητα προχώρησης της πλάκας, το πάχος της πλάκας, η θερμοκρασία του μηχανήματος και της πλάκας και κατ'επέκταση οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των σωμάτων, καθώς όπως αναφέρθηκε πρωτύτερα η έλαση είναι ένα πολυδιάστατο και σύνθετο φαινόμενο.

5.4. Μελέτη επίδρασης της θερμοκρασίας της πλάκας στη δύναμη έλασης

Η παράμετρος της θερμοκρασίας στην έλαση, όπως και σε κάθε κατεργασία, είναι από τις κυριότερες, καθώς είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας που με τη σειρά τους αποτελούν το έναυσμα για φαινόμενα μεταλλουργικού τύπου, όπως η διάχυση. Κρίθηκε λοιπόν απαραίτητο να μελετηθεί η επιρροή της διαφορετικής εναρκτήριας θερμοκρασίας κατά την έλαση ενός πάσου, πλάκας αλουμινίου κράματος 5052.

Τελέστηκαν έξι πειράματα, κατά τα οποία η μείωση του πάχους της πλάκας παρέμεινε σταθερή στα 15 mm και η μοναδική παράμετρος που άλλαζε σε κάθε πείραμα ήταν η εναρκτήρια θερμοκρασία της πλάκας. Έτσι ξεκινώντας από τους 50 °C και με βήμα 100 °C κάθε φορά περαιώθηκαν τα έξι πειράματα μέχρι τους 550 °C. Ο όρος εναρκτήρια θερμοκρασία χρησιμοποιείται γιατί μετά το πέρας ακόμη και ενός πάσου έλασης η θερμοκρασία της πλάκας έχει μειωθεί, γεγονός που οφείλεται στη μεταφορά της θερμότητας από την πλάκα προς τα ράουλα εργασίας, από την ακτινοβολία θερμότητας της πλάκας προς το περιβάλλον.

Ο στόχος αυτής της μελέτης είναι να αποδείξει πειραματικά την άρρηκτη σχέση και αλληλεπίδραση μεταξύ της θερμοκρασίας και της δύναμης της έλασης.

5.5. Συγκριτική μελέτη έλασης του κράματος 7075 σε δύο διαφορετικές καταστάσεις του

Αρχικά, η παρούσα μελέτη αφορούσε τη σύγκριση της δύναμης που ασκείται στο έλαστρο από τις πλάκες δύο διαφορετικών κραμάτων, των 5052 και 7075. Στο πρώτο η σκλήρωση επέρχεται με το φαινόμενο της ενδοτράχυνσης, ενώ στο δεύτερο η σκλήρωση είναι αποτέλεσμα της κατακρήμνισης μίας δεύτερης φάσης.

Η έλαση ως είναι γνωστό ξεκινά περίπου στους 550 °C για τα κράματα του αλουμινίου. Στο κράμα 7075, με τυπική χημική σύσταση Al-6%Zn-2%Mg-2%Cu, η αρχή της κατακρήμνισης

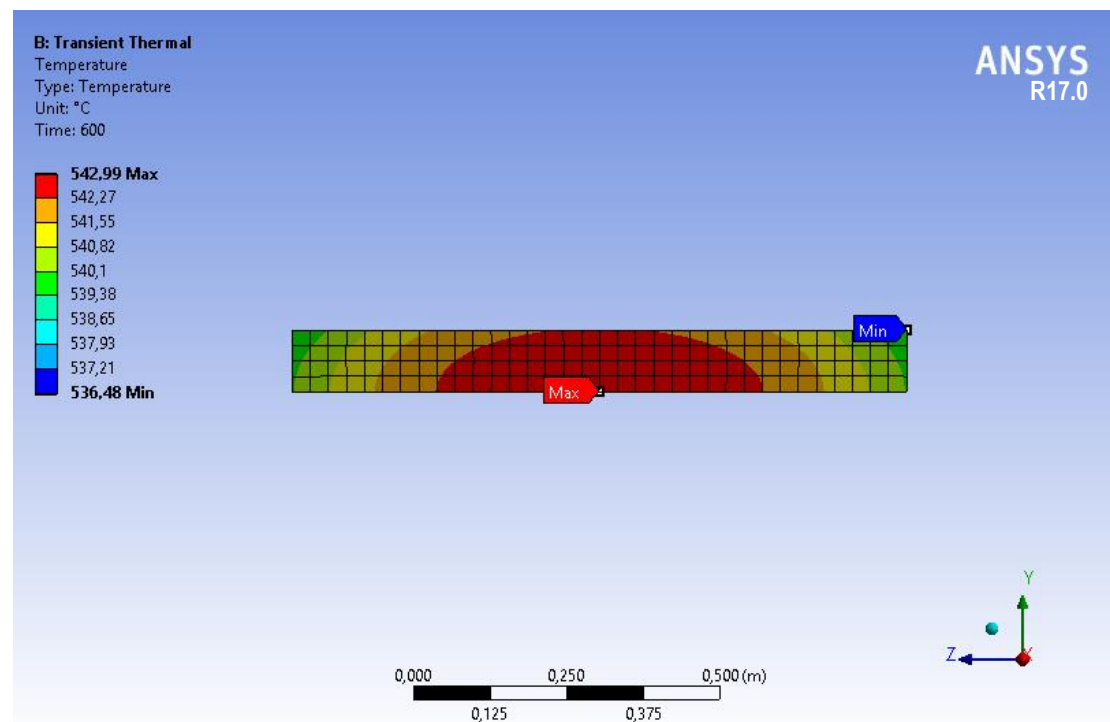
της δευτερεύουσας φάσης, συνήθως πλούσιας σε Zn-Mg, λαμβάνει χώρα περίπου στους 380°C (<http://www.csun.edu/~bavarian>). Επόμενως, υπήρχε η ανάγκη γνώσης των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού πριν τη θερμοκρασία κατακρήμνισης, αλλά και κατά τη διάρκεια της. Σκοπός της μελέτης ήταν η άμεση συσχέτιση της μικροδομής του υλικού με τη δύναμη της έλασης. Όμως λόγω έλλειψης στοιχείων στην βιβλιογραφία για τις μηχανικές ιδιότητες πριν και μετά την κατακρήμνιση, η μελέτη αυτή δεν μπόρεσε να συνεχιστεί.

Αντ' αυτού, μελέτηθηκε η ψυχρή έλαση του κράματος 7075 σε δύο διαφορετικές καταστάσεις του. Η πρώτη κατάσταση είναι εκείνη της απλής ανόπτησης (7075-O), ενώ η δεύτερη χαρακτηρίζεται από υπερβαφή και τεχνητή γήρανση (7075-T6). Η δύναμη έλασης μετρήθηκε όπως και στις προηγούμενες μελέτες στην πακτωμένη βάση του κουζινέτου και αναλύθηκε.

5.6. Αποτελέσματα - Σχολιασμός

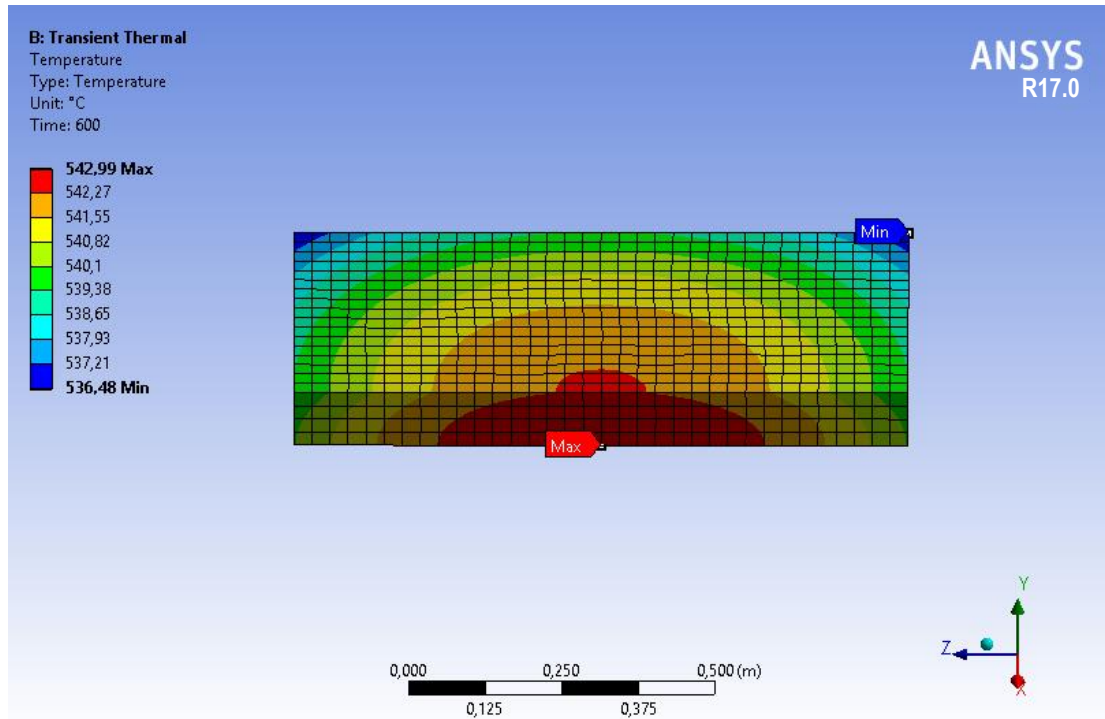
5.6.1. Θερμοκρασιακή Μελέτη

Αρχικά, παρατηρήθηκε το θερμοκρασιακό προφίλ της πλάκας κατά μήκος του δεύτερου επιπέδου συμμετρίας, όπως απεικονίζεται στο **Σχήμα 5.27**. Η μέγιστη θερμοκρασία μετά το πέρας της κατεργασίας εντοπίστηκε στο κέντρο της πλάκας για αυτό και έχει το χαρακτηριστικό κόκκινο χρώμα, ενώ η χαμηλότερη στα άκρα της πλάκας (μπλε χρώμα) όπου η απαγωγή θερμότητας γίνεται απευθείας προς το περιβάλλον.



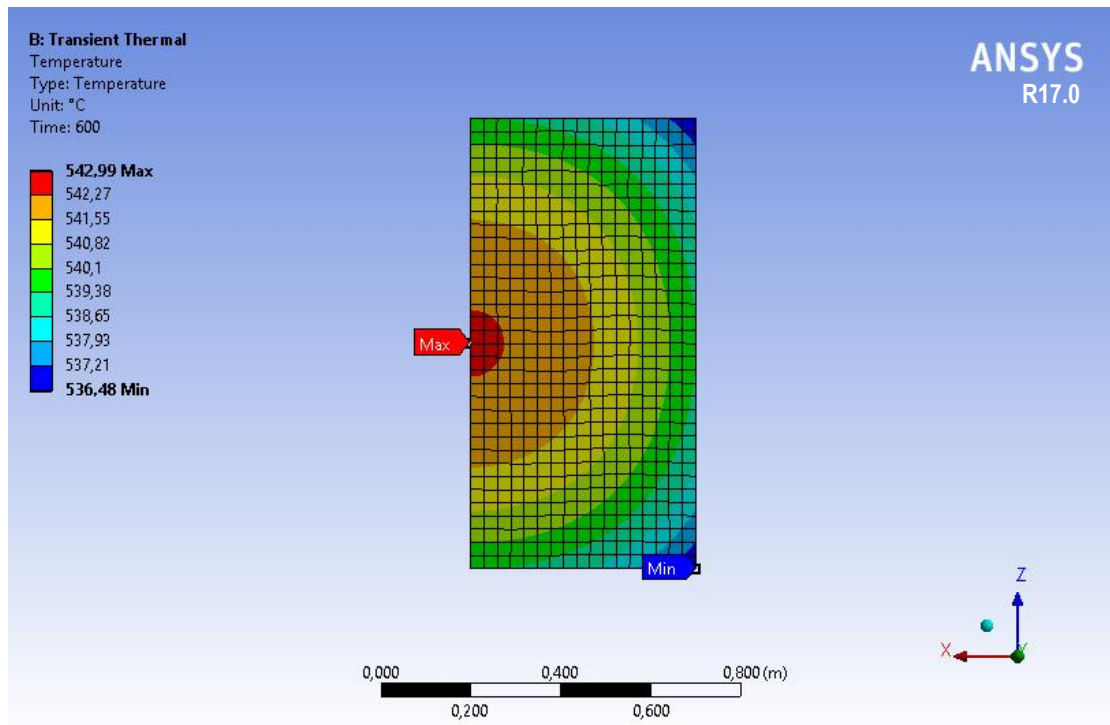
Σχήμα 5.27. Θερμοκρασιακό προφίλ της πλάκας κατά μήκος του δεύτερου επιπέδου συμμετρίας.

Η διαστρωμάτωση των θερμοκρασιών είναι ξεκάθαρη (Σχήματα 5.28. , 5.29.). Η απόψυξη της πλάκας ξεκίνησε σε ομοιογενή θερμοκρασία 550 °C για όλο τον όγκο της πλάκας. Μετά από το χρονικό διάστημα των 10 min, η θερμοκρασία στα άκρα της είχε μειωθεί κατά 13,5 °C, ενώ στο κέντρο η μείωση ήταν σαφώς μικρότερη, ίση με 7,01 °C, και τελική θερμοκρασία 543 °C. Παρατηρείται ότι η μείωση της θερμοκρασίας του κέντρου σε σχέση με τα άκρα είναι περίπου η μισή. Οι καμπύλες πτώσης της θερμοκρασίας δίνονται αναλυτικά στο Σχήμα 5.30.

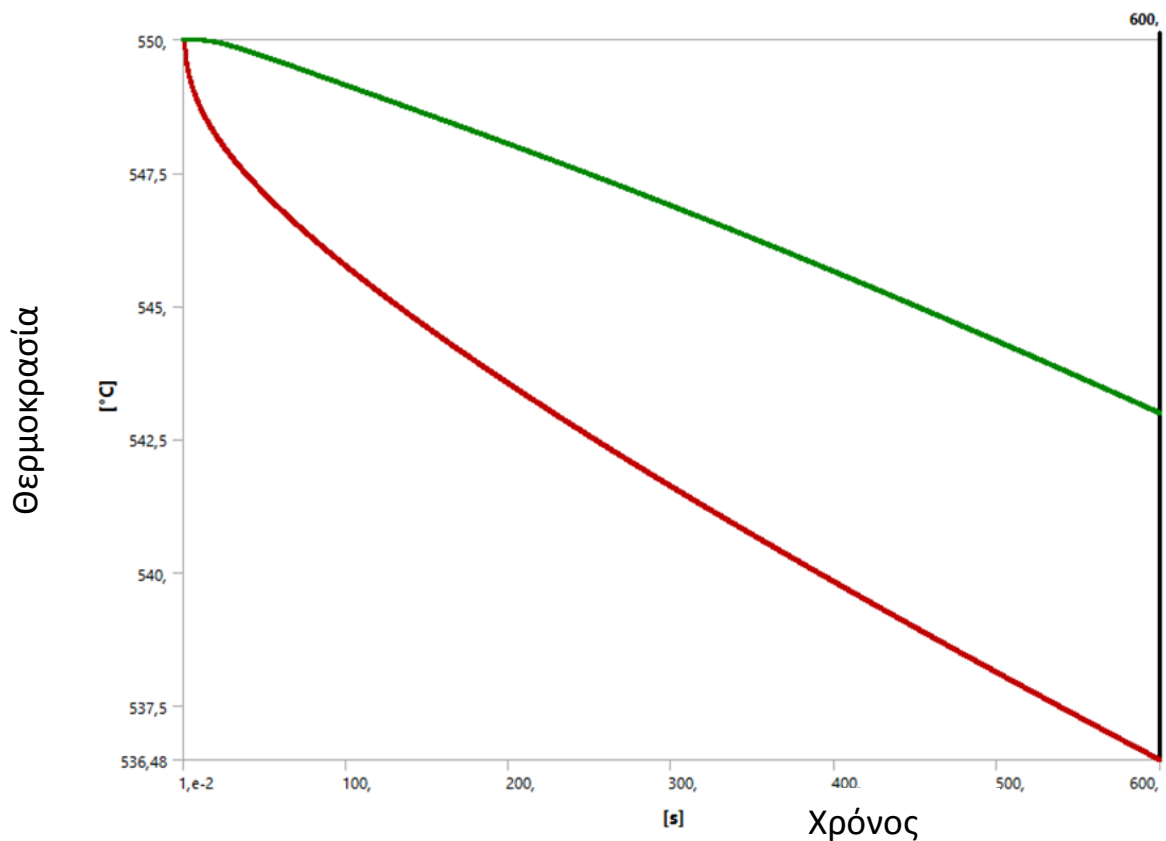


Σχήμα 5.28. Θερμοκρασιακό προφίλ της πλάκας υπό γωνία, απεικονίζονται η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία.

Προσομοίωση της θερμής και ψυχρής έλασης κράματος αλουμινίου
με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

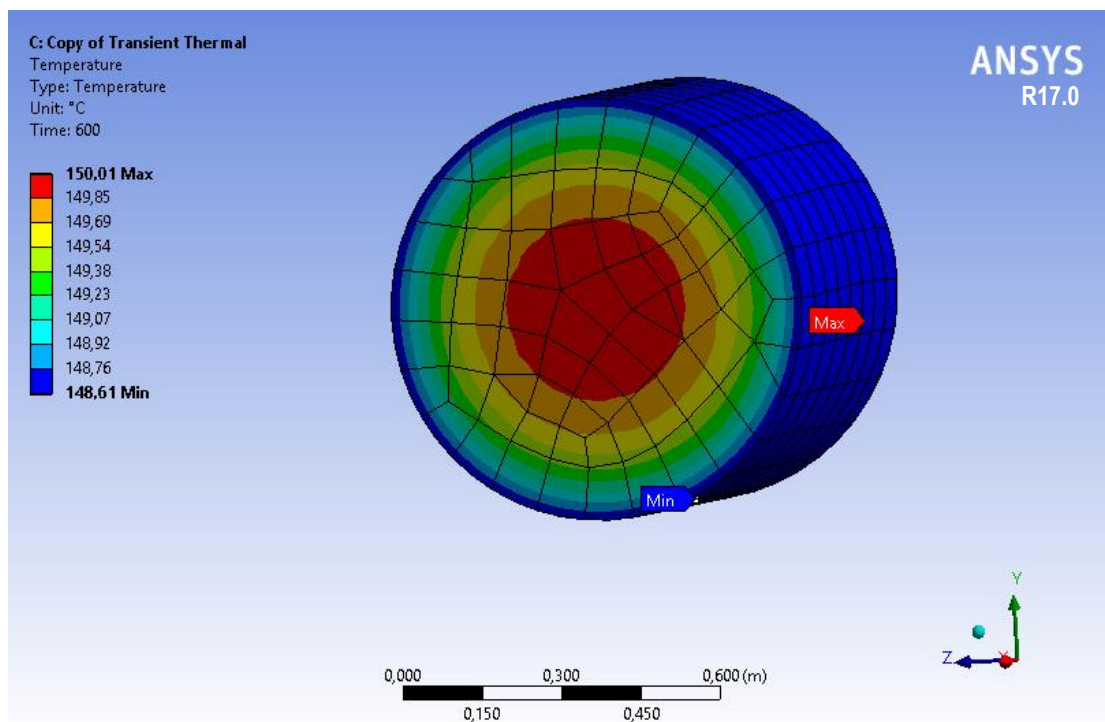


Σχήμα 5.29. Κάτοψη πλάκας, όπου φαίνονται οι διαφορετικές θερμοκρασιακές ζώνες.

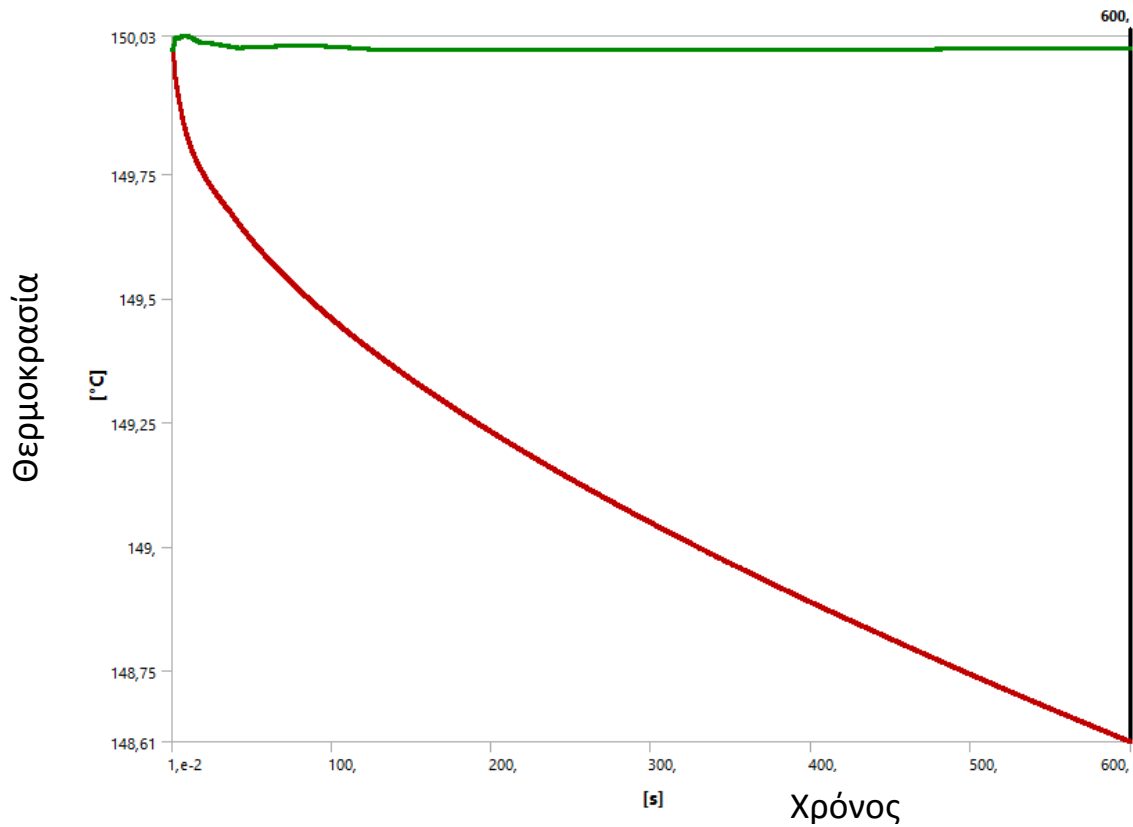


Σχήμα 5.30. Καμπύλες πτώσης της θερμοκρασίας στο άκρο την πλάκας (κόκκινο χρώμα) και στο κέντρο της πλάκας (πράσινο χρώμα).

Κατόπιν, το θερμοκρασιακό προφίλ του ρόλου κατά την απόψυξη του από τους 150 °C απεικονίζεται εκτενώς στο **Σχήμα 5.31**. Η μέγιστη θερμοκρασία μετά την απόψυξη δέκα λεπτών είναι εκείνη, που έχει στο κέντρο του και είναι ίση με 149,94 °C , ενώ η επιφάνεια του έχει θερμοκρασία αρκετά μειωμένη και ίση με 148,61 °C. Στη συνέχεια, η πτωτική πορεία της θερμοκρασίας τόσο για το κέντρο, όσο και για την επιφάνεια του ρόλου εικονίζεται στο **Σχήμα 5.32**.



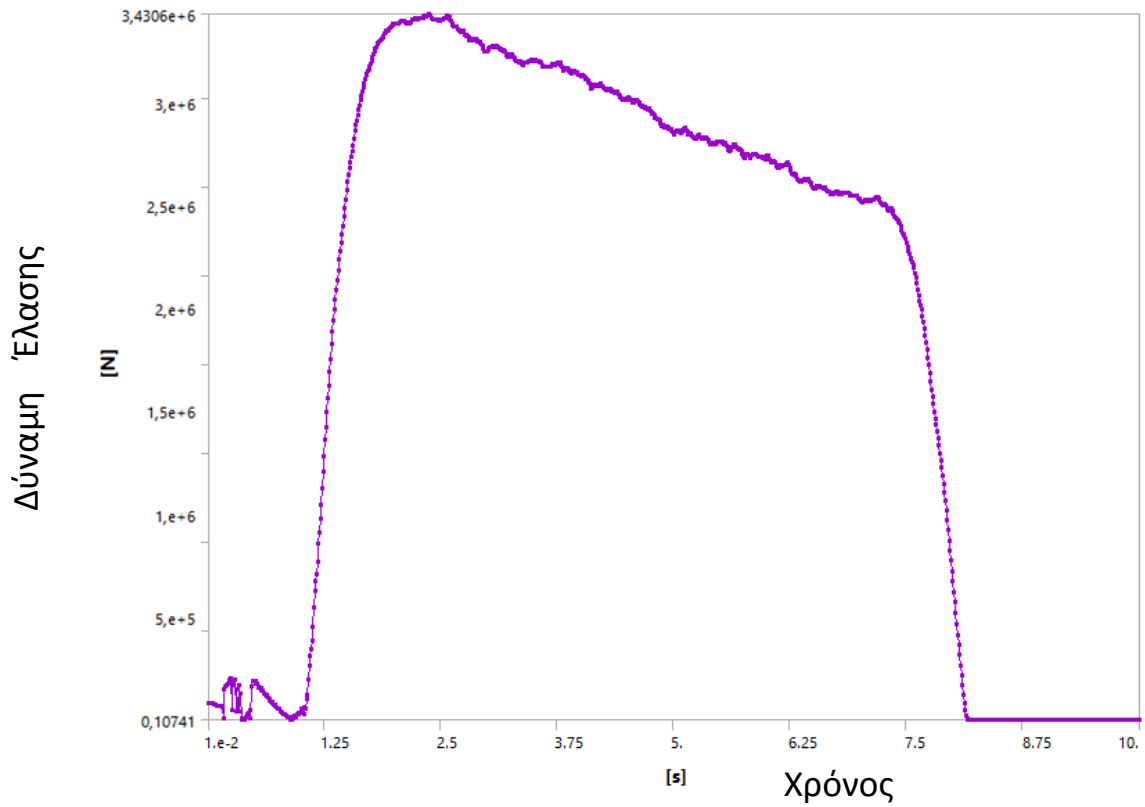
Σχήμα 5.31. Θερμοκρασιακό προφίλ ρόλου εργασίας.



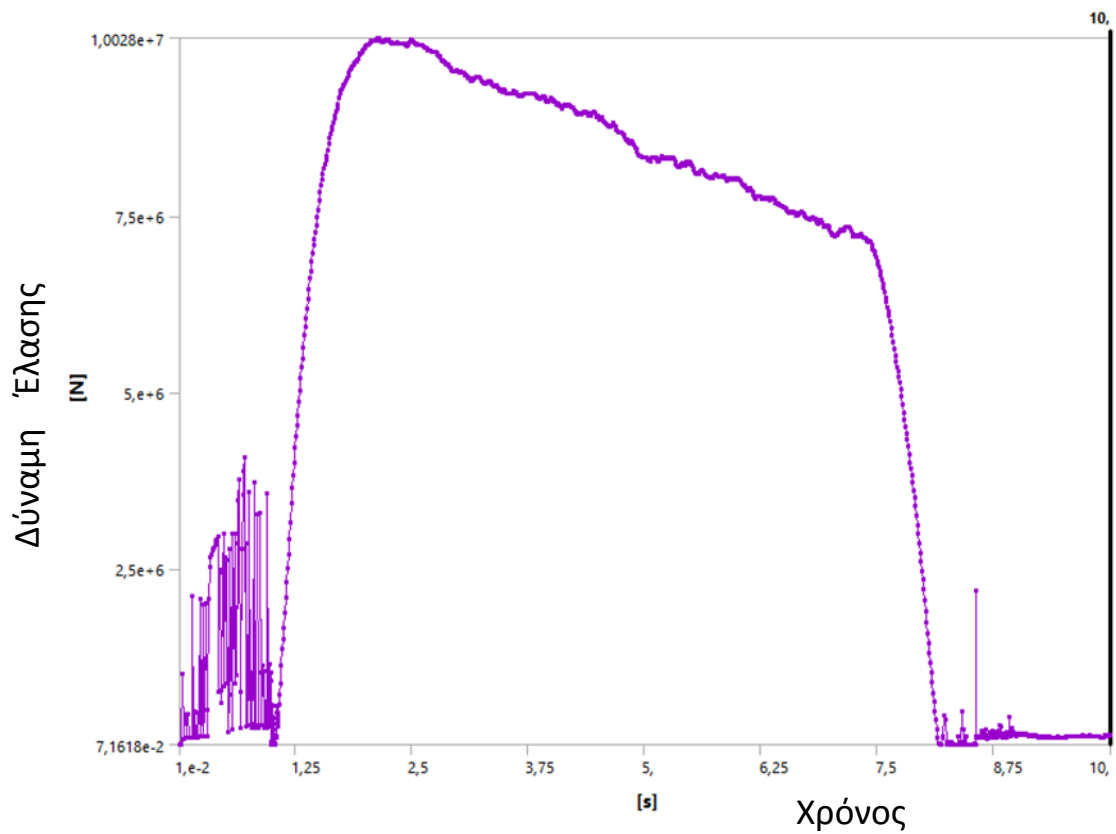
Σχήμα 5.32. Τρόπος μείωσης της Θερμοκρασίας κατά την απόψυξη.

5.6.2. Μελέτη της επίδρασης διαφορετικού υποβιβασμού της πλάκας κατά τη θερμή έλαση

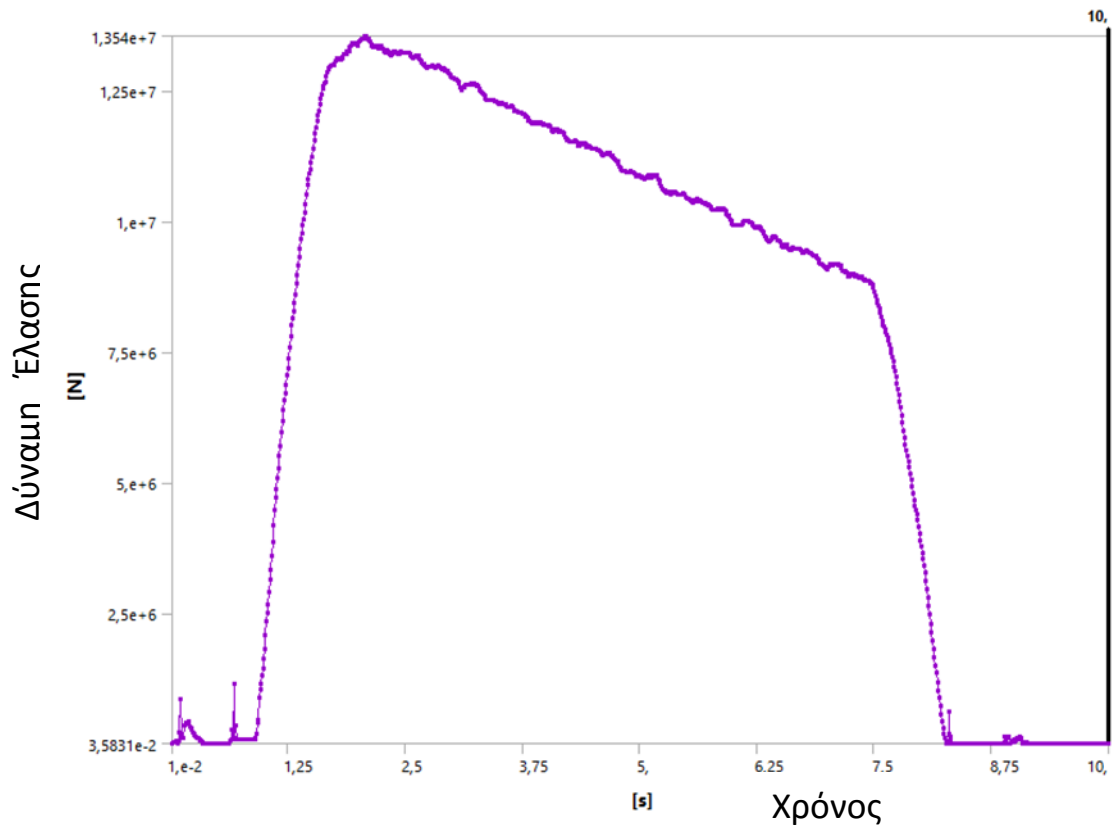
Ακολούθως, παρατίθενται τα διαγράμματα δύναμης της έλασης συναρτήσει χρόνου, που υπολογίστηκαν από τα πειράματα των πέντε διαφορετικών υποβιβασμών θερμής έλασης (Σχήματα 5.33.-5.37).



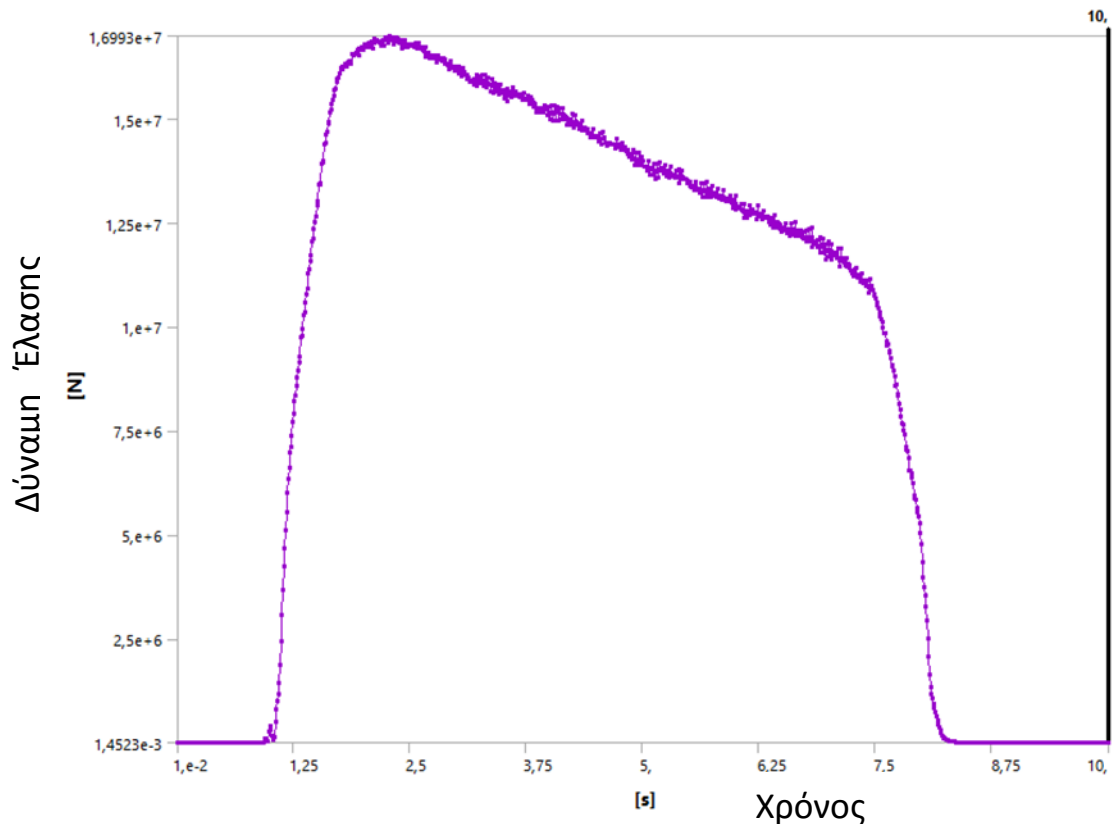
Σχήμα 5.33. Καμπύλη δύναμη έλασης – χρόνος στο πείραμα προσομοίωσης υποβιβασμού 5 mm.



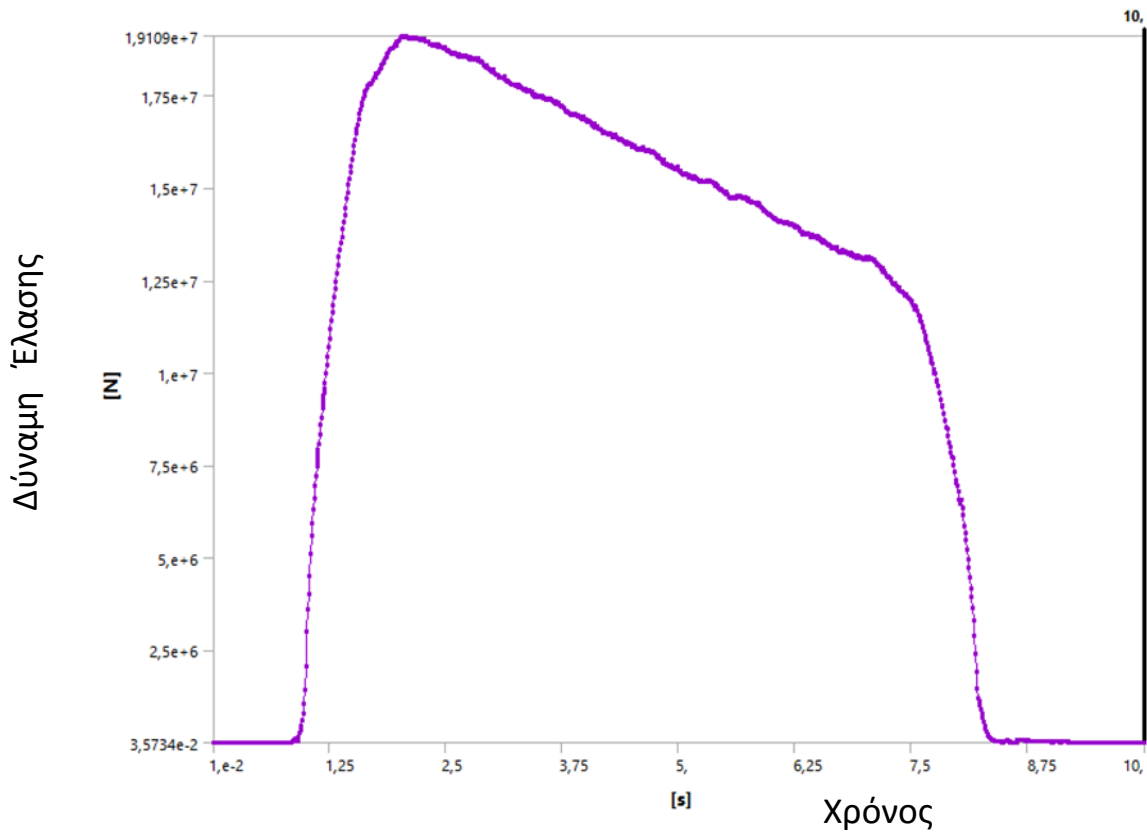
Σχήμα 5.34. Καμπύλη δύναμη έλασης – χρόνος στο πείραμα προσομοίωσης υποβιβασμού 10 mm.



Σχήμα 5.35. Καμπύλη δύναμη έλασης – χρόνος στο πείραμα προσομοίωσης υποβιβασμού 15 mm.



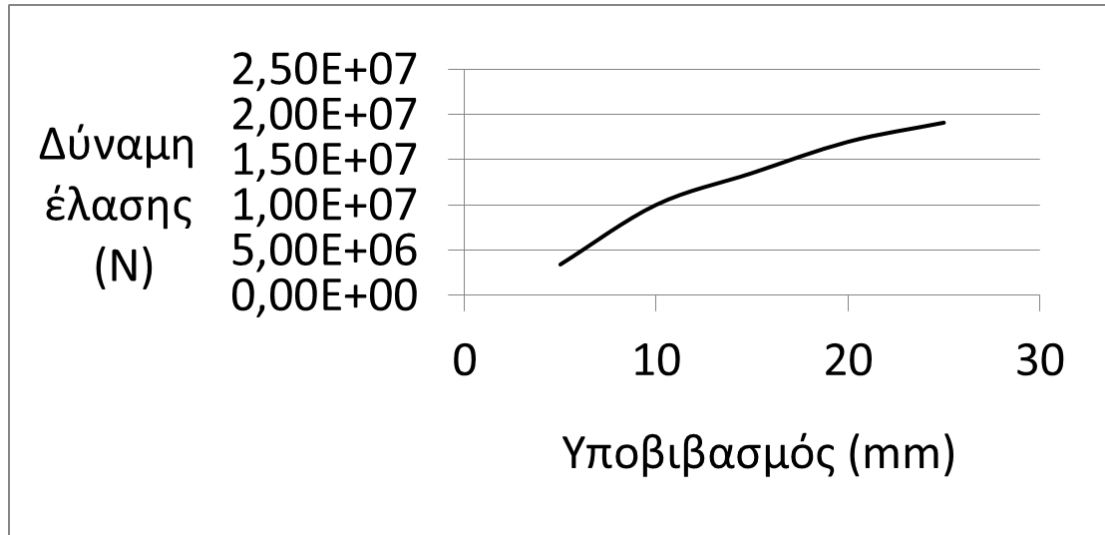
Σχήμα 5.36. Καμπύλη δύναμη έλασης – χρόνος στο πείραμα προσομοίωσης υποβιβασμού 20 mm.



Σχήμα 5.37. Καμπύλη δύναμη έλασης – χρόνος στο πείραμα προσομοίωσης υποβιβασμού 25 mm.

Με χρήση της μέγιστης δύναμης, που μετρήθηκε σε κάθε πείραμα, κατασκευάστηκε ένα διάγραμμα συσχετισμού της δύναμης της έλασης με τον αντίστοιχο υποβιβασμό (**Σχήμα 5.38**). Παρατηρώντας το διάγραμμα φαίνεται ότι όσο αυξάνεται ο υποβιβασμός της πλάκας κατά τη θερμή έλαση, αυξάνεται σχεδόν γραμμικά και η δύναμη της έλασης. Αυτή η σχεδόν γραμμική σχέση δείχνει την κατάφωρη επίδραση της μείωσης του πάχους στη δύναμη της έλασης και κατ' επέκταση στην κατεργασία. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά το πείραμα προσομοίωσης του υποβιβασμού των 25 mm, η δύναμη έλασης μετρήθηκε 19,1 MN, δείχνοντας απόλυτη αντιστοιχία με ένα ρεαλιστικό πάσο θερμής έλασης. Η αυξημένη ή ακόμα καλύτερα η απόλυτη αντιστοιχία με την πραγματικότητα είναι διαρκές ζητούμενο της προσομοίωσης κάθε προβλήματος.

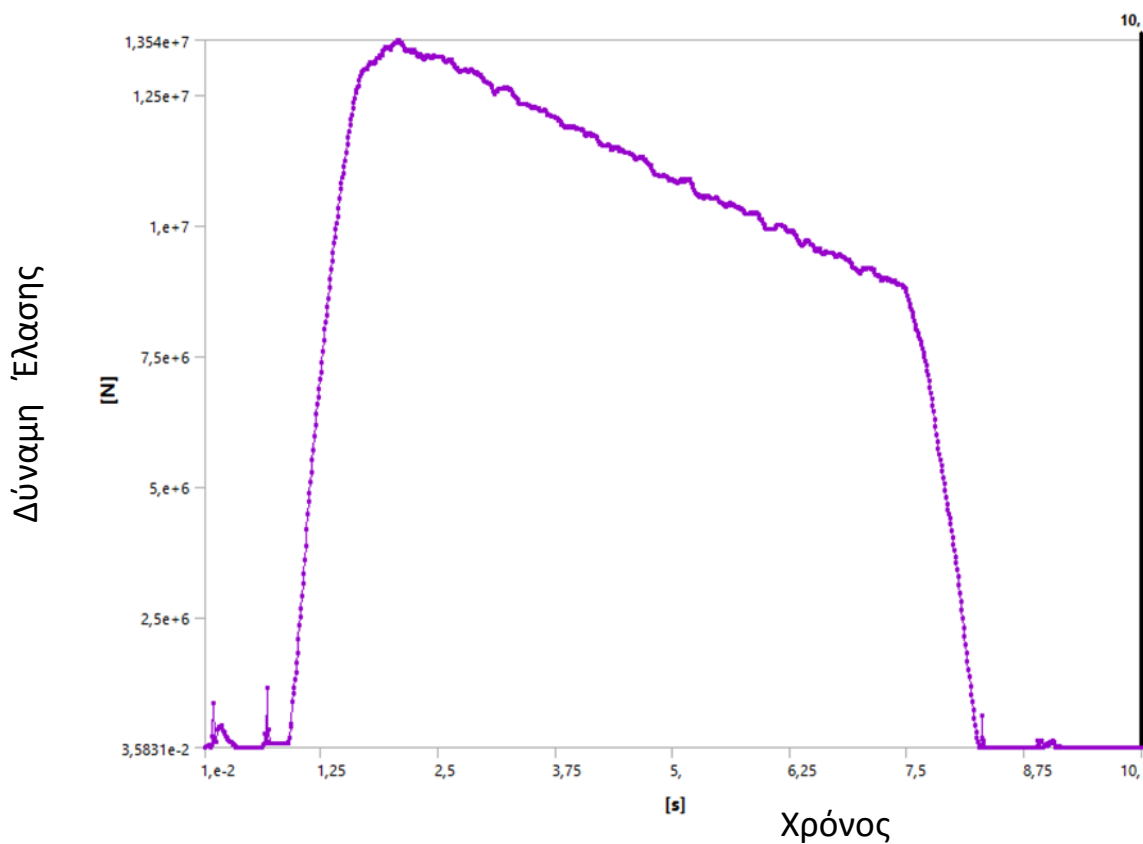
Επιπλέον, στα άνω διαγράμματα των **Σχημάτων 5.33.-5.37.** παρουσιάζεται μείωση της δύναμης έλασης με το πέρας του χρόνου των 10sec, ξεκινώντας από μία μέγιστη τιμή σε κάθε διάγραμμα και ακολουθώντας μία πτωτική πορεία. Αυτό το φαινόμενο παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον και θα πρέπει να διερευνηθεί εκτενώς σε μελλοντικές μελέτες.



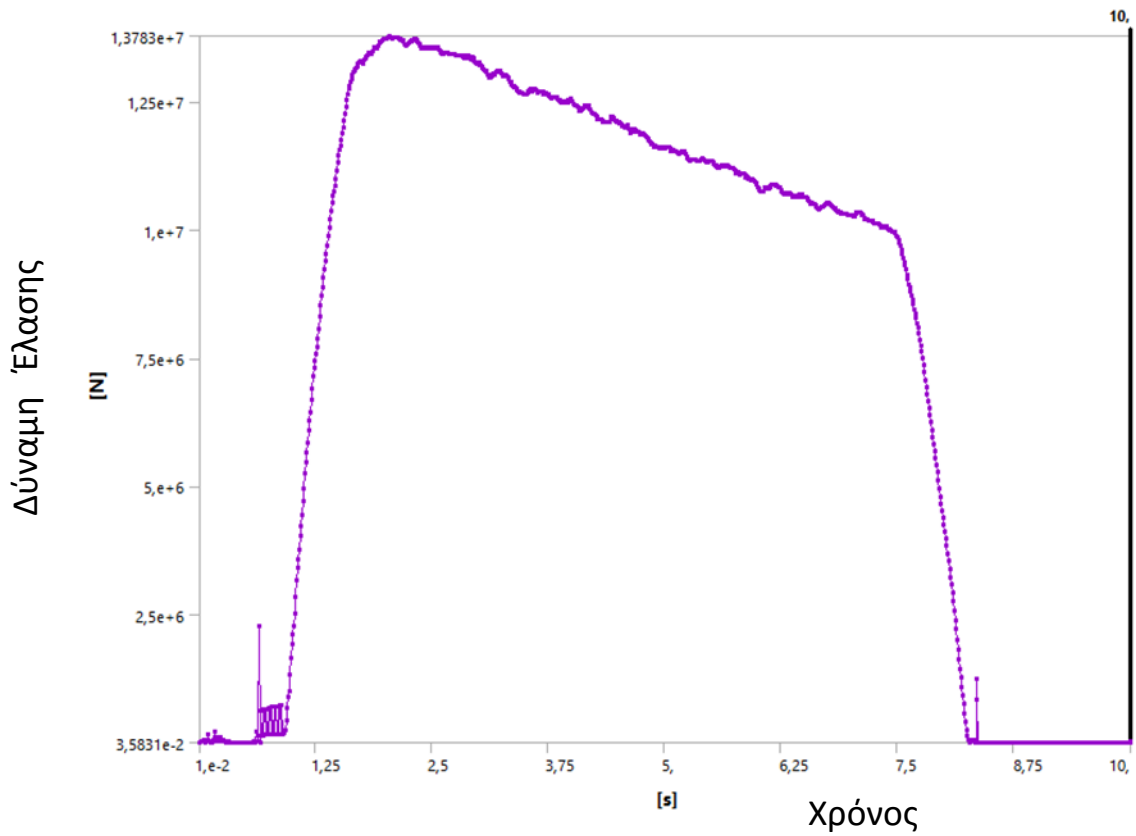
Σχήμα 5.38. Καμπύλη συσχετισμού δύναμης της έλασης και υποβιβασμού της πλάκας.

5.6.3. Μελέτη επίδρασης της θερμοκρασίας στη δύναμη έλασης

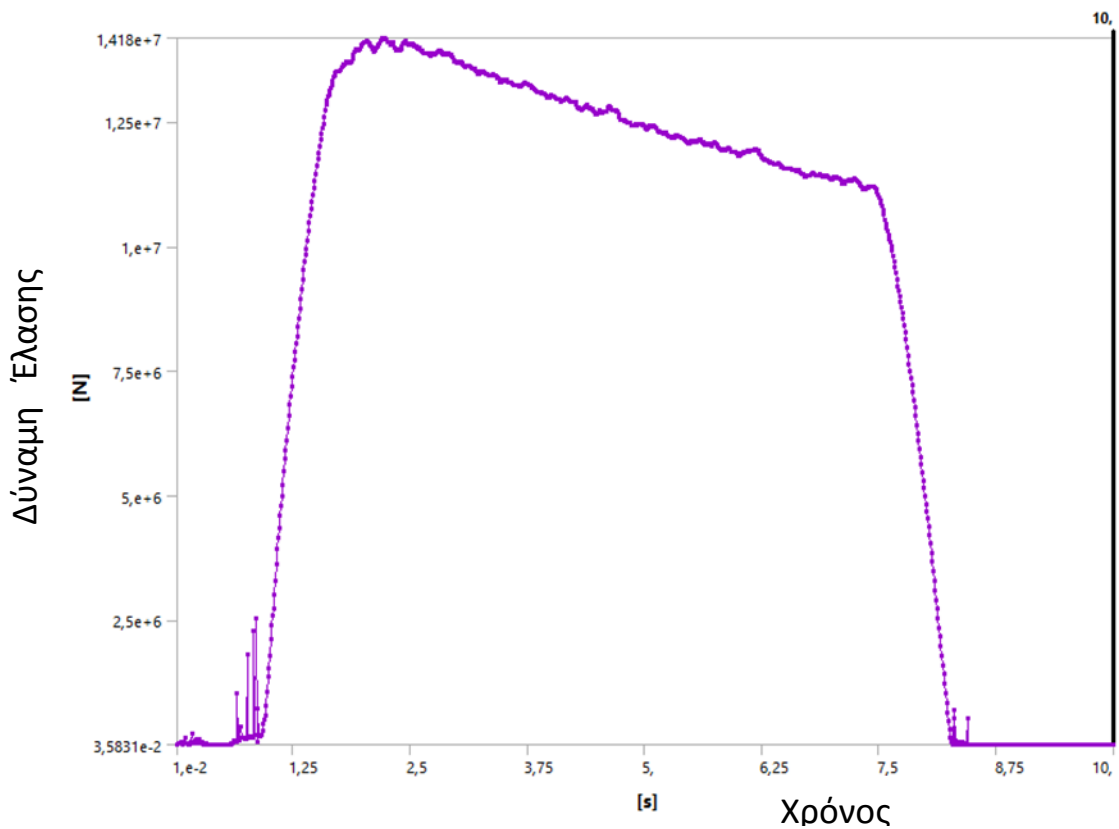
Με την περαίωση των έξι πειραμάτων διαφορετικών θερμοκρασιών, μετρήθηκαν οι αντίστοιχες δυνάμεις έλασης, οι οποίες απεικονίζονται στα ακόλουθα Σχήματα 5.39.-5.44.



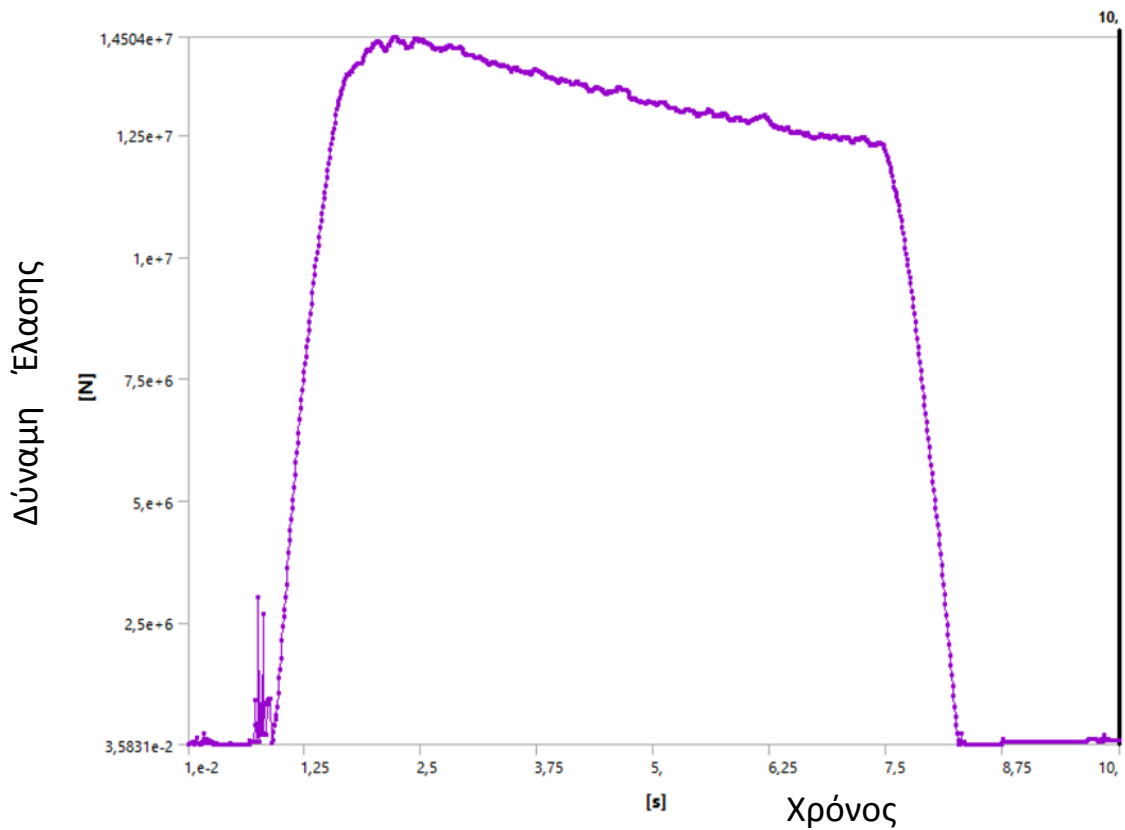
Σχήμα 5.39. Καμπύλη δύναμη έλασης – χρόνος στο πείραμα προσομοίωσης ενός πάσου θερμής έλασης για αρχική θερμοκρασία πλάκας 550 °C.



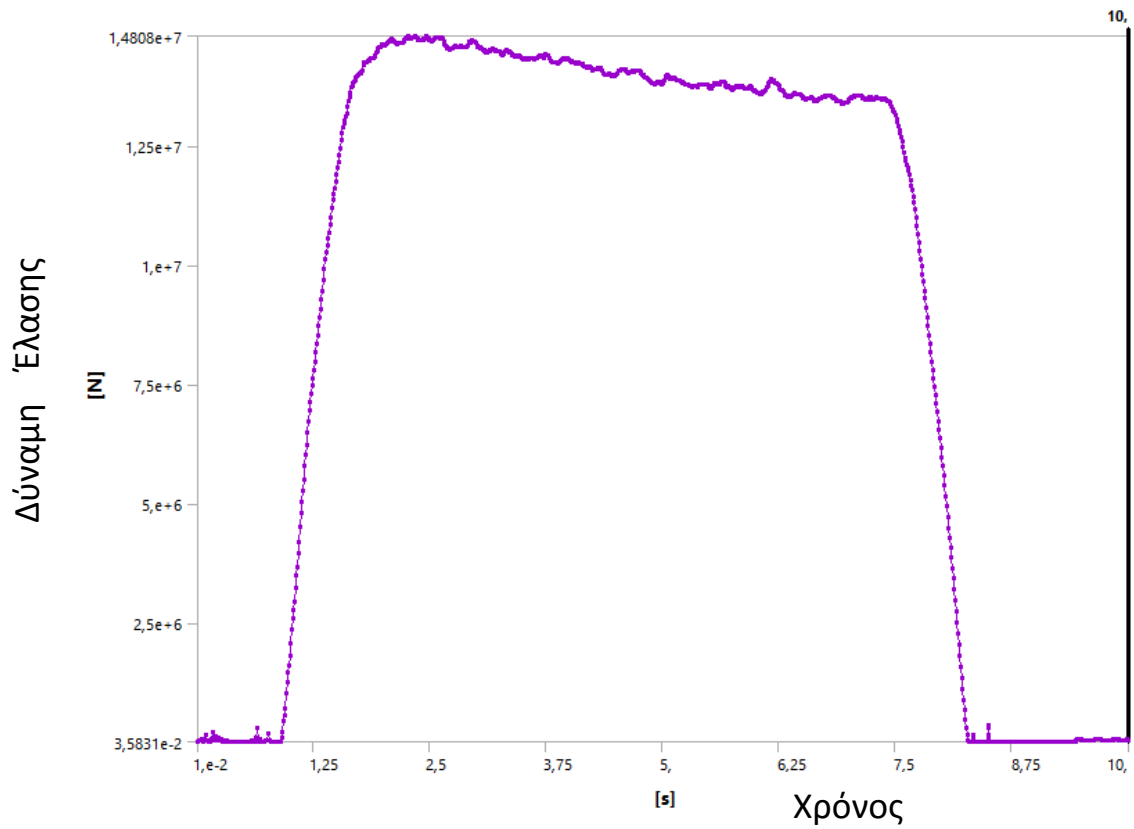
Σχήμα 5.40. Καμπύλη δύναμη έλασης – χρόνος στο πείραμα προσομοίωσης ενός πάσου θερμής έλασης για αρχική θερμοκρασία πλάκας 450 °C.



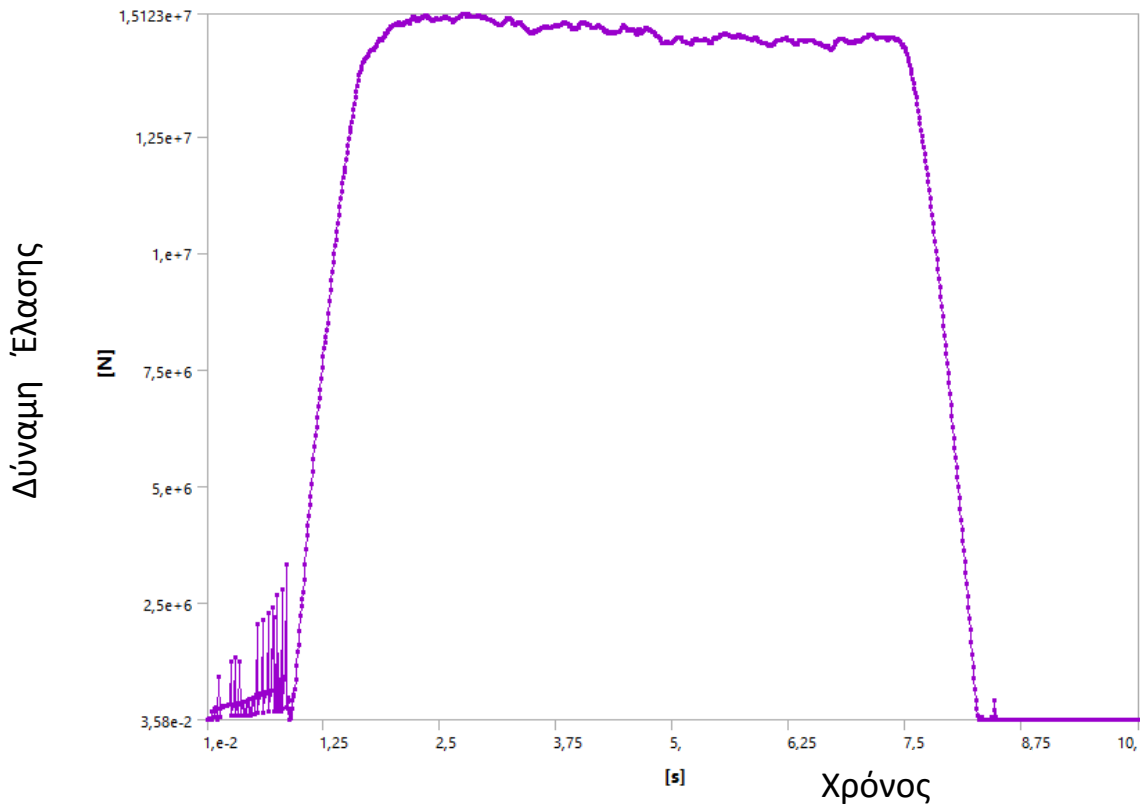
Σχήμα 5.41. Καμπύλη δύναμη έλασης – χρόνος στο πείραμα προσομοίωσης ενός πάσου θερμής έλασης για αρχική θερμοκρασία πλάκας 350 °C.



Σχήμα 5.42. Καμπύλη δύναμη έλασης – χρόνος στο πείραμα προσομοίωσης ενός πάσου θερμής έλασης για αρχική θερμοκρασία πλάκας 250 °C.



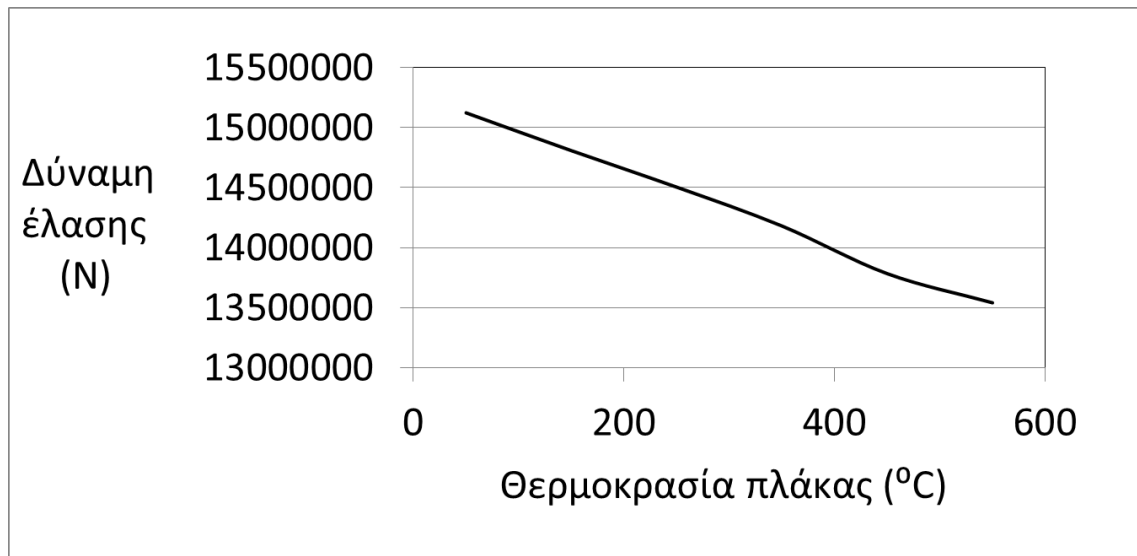
Σχήμα 5.43. Καμπύλη δύναμη έλασης – χρόνος στο πείραμα προσομοίωσης ενός πάσου θερμής έλασης για αρχική θερμοκρασία πλάκας 150 °C.



Σχήμα 5.44. Καμπύλη δύναμη έλασης – χρόνος στο πείραμα προσομοίωσης ενός πάσου θερμής έλασης για αρχική θερμοκρασία πλάκας 50 °C.

Διαλέγοντας από κάθε πείραμα προσομοίωσης τη μέγιστη δύναμη έλασης, που ασκήθηκε στην πλάκα, κατασκευάστηκε το παρακάτω διάγραμμα (**Σχήμα 5.45.**). Παρατηρείται ότι όσο αυξάνει η εναρκτήρια θερμοκρασία της πλάκας, η δύναμη της έλασης μειώνεται. Γεγονός που συνάδει απόλυτα με την πραγματικότητα της κατεργασίας, διότι σε χαμηλότερες θερμοκρασίες η τάση διαρροής του υλικού αυξάνεται λόγω της ενδοτράχυνσης. Το παρόν κράμα είναι το 5052 και η σκλήρωση του βασίζεται στο φαινόμενο της ενδοτράχυνσης, επόμενως αυξάνεται αρκετά και η τάση διαρροής του με τη πτώση της θερμοκρασίας μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Σε ένα κράμα βασισμένο στη σκλήρωση κατακρήμνισης πιθανόν να ήταν δυνατόν να παρατηρηθεί το ίδιο φαινόμενο, αλλά σαφώς σε μικρότερο βαθμό.

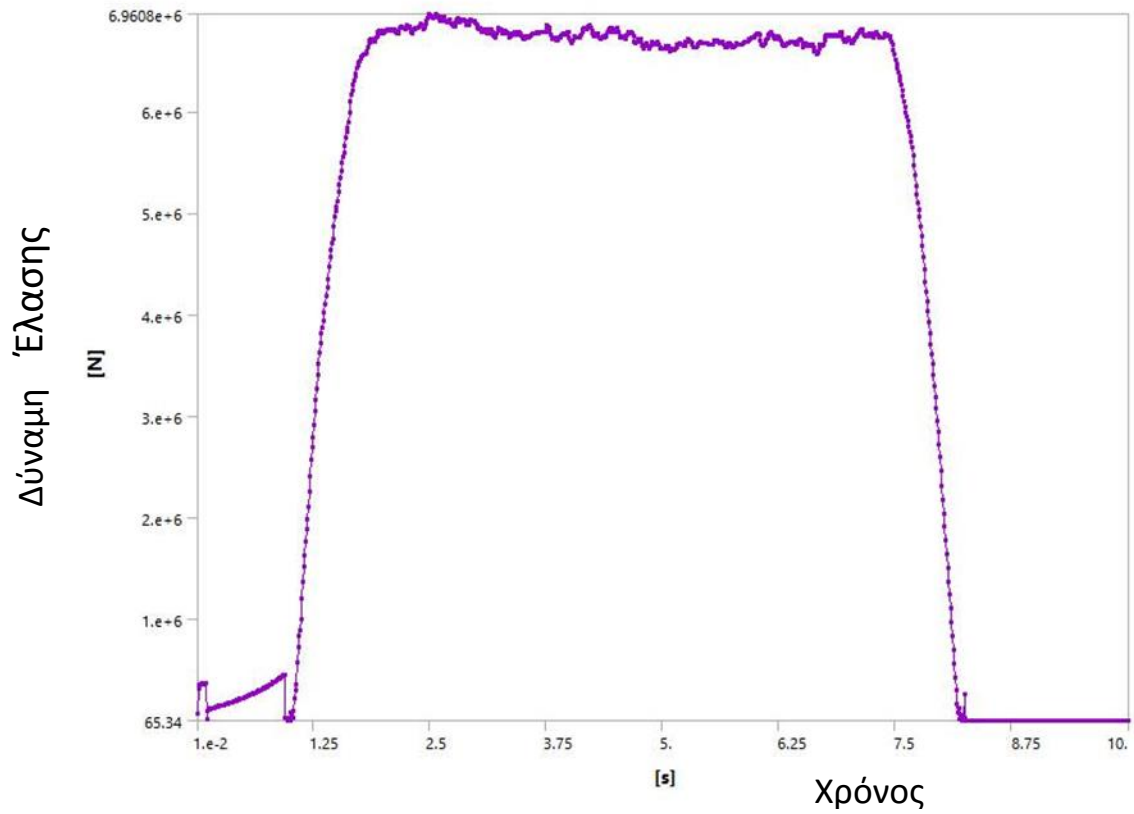
Στα **Σχήματα 5.39.-5.44.** η πτωτική πορεία της δύναμης έλασης όσο περνά ο χρόνος, εξομαλύνεται σε κάθε διάγραμμα που μειώνεται η θερμοκρασία έλασης της πλάκας. Με αποτέλεσμα στο τελευταίο **Σχήμα 5.44.** η δύναμη έλασης να ακολουθεί πορεία παράλληλη με τον αξόνα του χρόνου. Το φαινόμενο μείωσης της κλίσης της ευθείας, με τη μείωση της θερμοκρασίας της πλάκας, εγείρει αρκετά μεγάλο ενδιαφέρον και θα πρέπει να μελετηθεί διεξοδικά στο μέλλον.



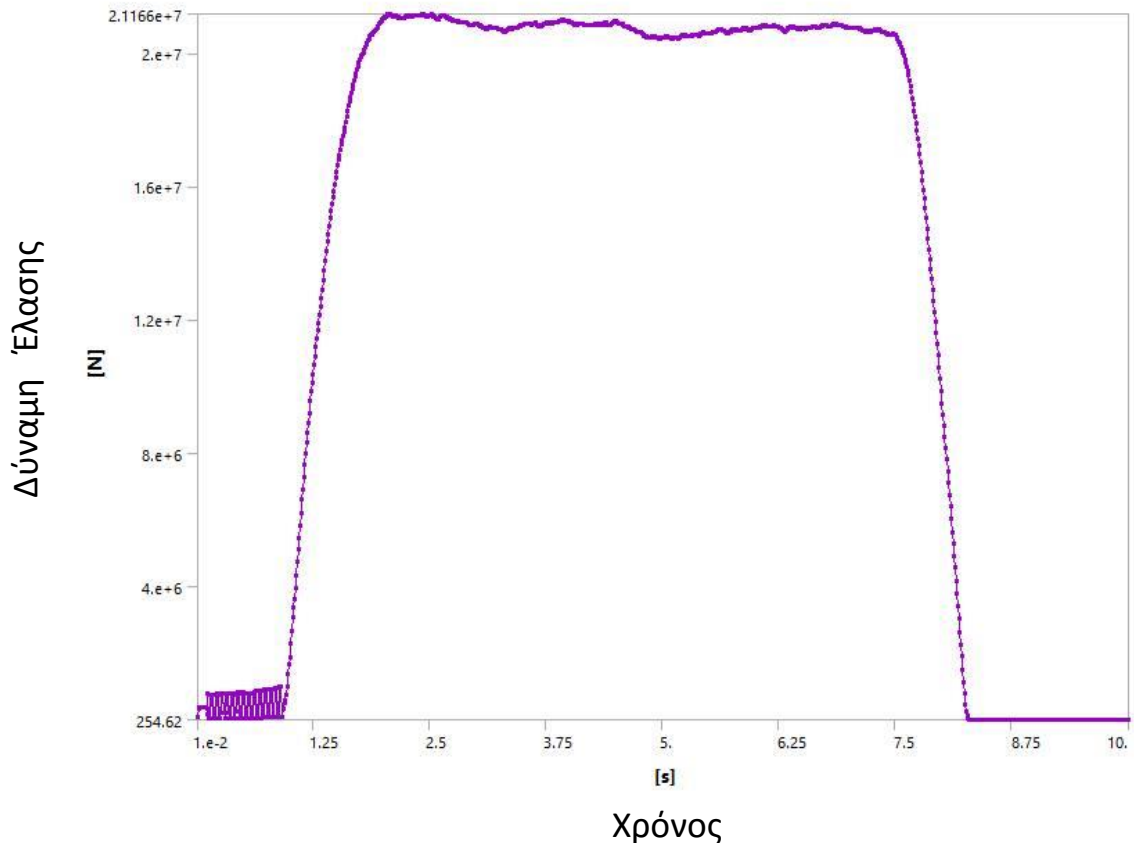
Σχήμα 5.45. Καμπύλη συσχετισμού δύναμης έλασης – θερμοκρασίας πλάκας.

5.6.4. Συγκριτική μελέτη έλασης του κράματος 7075 σε δύο διαφορετικές καταστάσεις του

Κατά την προσομοίωση της ψυχρής έλασης του κράματος 7075, μετά από απλή ανόπτηση και μετά από υπερβαφή και γήρανση, παρήχθησαν τα εξής διαγράμματα από τις μετρηθείσες δυνάμεις έλασης. Στο πρώτο διάγραμμα του Σχήματος 5.46, η μέγιστη δύναμη έλασης είναι 6,96 MN, ενώ στο δεύτερο διάγραμμα του Σχήματος 5.47, η μέγιστη δύναμη έλασης για το ίδιο κράμα που έχει υποστεί γήρανση είναι 21,16 MN. Εκτελώντας μία απλή πράξη $\frac{6,96}{21,16} \times 100\% = 32,9\%$, διαπιστώνεται ότι το αντίκτυπο της γήρανσης στη σκλήρωση του υλικού είναι εκτεταμένο και εκφράζεται επιτυχημένα μέσω της προσομοίωσης της ψυχρής έλασης για τις δύο διαφορετικές καταστάσεις του εν λόγω κράματος.



Σχήμα 5.46. Διάγραμμα δύναμης έλασης συναρτήσει χρόνου για την ψυχρή έλαση του κράματος 7075 σε ανοπτημένη κατάσταση.



Σχήμα 5.47. Διάγραμμα δύναμης έλασης συναρτήσει χρόνου για την ψυχρή έλαση του κράματος 7075 στην κατάσταση μετά από τη γήρανση.

6. Σύνοψη και Ερευνητική εξέλιξη

6.1. Συμπεράσματα

Μελετήθηκε το θερμοκρασιακό προφίλ της πλάκας κράματος 5052 και του ραούλου κράματος χάλυβα H13 κατά την απόψυξη τους από τους 550 °C και τους 150 °C αντίστοιχα. Αναλύθηκε, κατόπιν, η αλληλεπίδραση ανάμεσα στη μείωση του πάχους της πλάκας και στη δύναμη έλασης κατά τη διάρκεια της θερμής αυτής κατεργασίας μορφοποίησης. Περαιτέρω, διερευνήθηκε πως επηρεάζεται η δύναμη της έλασης από την εναρκτήρια θερμοκρασία της πλάκας, που υπόκειται σε θερμή έλαση. Τέλος, έγινε σύγκριση της ψυχρής έλασης δύο καταστάσεων του κράματος 7075 με γνώμονα τη δύναμη έλασης για ακόμη μία φορά. Η πρώτη περίπτωση αφορούσε την ανοπτημένη κατάσταση του κράματος, ενώ η δεύτερη την κατάσταση μετά την υπερβαφή και το πέρας τη γήρανσης.

Εξήχθησαν, λοιπόν, τα ακόλουθα συμπεράσματα :

1. Με την προσομοίωση της απόψυξης της πλάκας και του ραούλου παρουσιάστηκε ότι η ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας ανάμεσα στο κέντρο τους και στα άκρα της πλάκας ή την επιφάνεια του ρόλου διαμόρφωσης είναι μεγάλη και μπορεί να αποτελέσει σοβαρό πρόβλημα για την έλαση αν δεν ληφθεί υπόψη.
2. Κατά την προσομοίωση της θερμής έλασης πλάκας κράματος 5052, όσο αυξάνεται το ζητούμενο μέγεθος υποβιβασμού, τόσο αυξάνεται και η απαραίτητη δύναμη έλασης για την τέλεση της μορφοποίησης.
3. Θέτοντας διαφορετικές αρχικές θερμοκρασίες της πλάκας αλουμινίου κράματος 5052 στα πειράματα προσομοίωσης της θερμής έλασης, αποδείχθηκε ότι η δύναμη έλασης που απαιτείται για την πλαστική παραμόρφωση του υλικού μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του.
4. Στην προσομοίωση ψυχρής έλασης ίδιου κράματος σε δύο διαφορετικές καταστάσεις του. Η δύναμη που χρειάζεται για να υποβιβαστεί το πάχος της πλάκας, που έχει υποστεί γήρανση είναι σαφώς μεγαλύτερη, γεγονός που οφείλεται στην ανώτερη μικροδομή του υλικού μετά τη βαφή και τη γήρανση του και επόμενως στις αυξημένες μηχανικές του ιδιότητες.

6.2. Συζήτηση και Μελλοντική Έρευνα

Όπως αναφέρθηκε στην προετοιμασία της πειραματικής διαδικασίας, η τριβή στις αναφερθείσες μελέτες τέθηκε ίση με μία σταθερή τιμή, κάτι που δεν συνάδει απόλυτα με τις πραγματικές συνθήκες, που επικρατούν κατά την έλαση. Στο τόξο επαφής ραούλου και πλάκας ο παράγοντας της τριβής ποικίλει και επηρεάζεται διαρκώς από τη θερμοκρασία,

την ποιότητα της επιφάνειας ρόλων εργασίας - πλάκας και άλλων παραγόντων. Μια ακόμη πτυχή της έλασης, που δεν εξετάστηκε σε επίπεδο προσομοίωσης είναι η επίδραση της ποιότητας των επιφανειών, της τραχύτητας τους δηλαδή στην έκβαση της. Στην αναζήτηση μεγαλύτερης ακρίβειας για τη λύση της προσομοίωσης είναι απαραίτητο να ληφθεί υπ' όψιν. Κατόπιν, και πάλι για την επίτευξη ρεαλιστικών αποτελεσμάτων προσομοίωσης κρίνεται αναγκαίο να κατασκευαστούν και τα ράουλα αντιστήριξης, διότι υπάρχει πολύ μεγάλη αλληλεπίδραση των ρόλων αντιστήριξης με τα εργασία κατά την έλαση, η οποία δεν πρέπει να αμελείται. Επιπλέον, πρέπει να προσομοιωθεί η έλαση με τον ακριβή τρόπο εναλλαγής των θερμοκρασιών του ρόλου εργασίας, δηλαδή γνωρίζοντας όλες τις λεπτομέρειες ψύξης του ρόλου, όπως η συχνότητα ψεκασμού, το είδος του υγρού μέσου που ψεκάζεται, που συνήθως είναι το μέσο λίπανσης μαζί με νερό, είτε και σκέτο.

Σε ενδεχόμενη μελλοντική έρευνα, θα έπρεπε να διερευνηθεί εκτενώς ο αντίκτυπος του παράγοντα της τριβής στην έλαση και σε πιθανά μοντέλα προσομοίωσης της έλασης να προταθούν διάφορες προσεγγίσεις με γνώμονα τη βελτιστοποίηση της έλασης, δηλαδή με τη χρήση νέων τύπων περιγραφής του τρόπου διενέργειας της τριβής ανάμεσα στο υλικό και τα ράουλα εργασίας. Αυτή η διερεύνηση παρουσιάζει τεράστιο ενδιαφέρον, καθώς μέχρι πρότινος στα περισσότερα μοντέλα έλασης ο παράγοντας τριβής έχει μία σταθερή τιμή και δεν διαφοροποιείται καθ' όλη τη διάρκεια της κατεργασίας.

Στον αντίποδα, ο σκοπός κάθε προσομοίωσης είναι να βρεθεί η χρυσή τομή ανάμεσα στον υπολογιστικό χρόνο που απαιτεί για την ολοκλήρωση της και στην ακρίβεια περιγραφής των παραμέτρων του προβλήματος. Όσο πιο σύνθετο το φαινόμενο προσομοίωσης, τόσο πιο σύνθετη η περιγραφή του και επομένως τόσο μεγαλύτερος και ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτεί για την περαίωση του. Επομένως, στην περίπτωση διερεύνησης της έλασης υπό το πρίσμα της τριβής απαιτείται μέγιστη ακρίβεια στην περιγραφή του σύνθετου φαινομένου της τριβής με χρήση των πληρέστερων τύπων.

Μια ακόμη μελέτη που χρήζει ενδιαφέροντος είναι η κατασκευή ολόκληρου του ελάστρου στο πρόγραμμα προσομοίωσης, ώστε η λύση της προσομοίωσης να προσεγγίζει με εξαιρετική ακρίβεια την πραγματική κατάσταση της κατεργασίας. Βέβαια με την κατασκευή ολόκληρης της μηχανής έλασης ο υπολογιστικός χρόνος της προσομοίωσης, ακόμα και για ένα πάσο της έλασης, αυξάνεται δραματικά..

Άλλη μία παράμετρος της κατεργασίας της έλασης που χρήζει αναφοράς, είναι και οι δονήσεις, από τις οποίες καταπονείται το έλαστρο κατά τη διάρκεια της κατεργασίας και τον τρόπο με τον οποίο αυτές επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Ο τρόπος επίδρασης τους και η συχνότητά τους πρέπει αν διερευνηθούν σε βάθος.

Επιπλέον, πρέπει να αναζητηθεί ο λόγος μείωσης της δύναμης έλασης κατά τη διάρκεια του πάσου έλασης της μελέτης των διαφορετικών υποβιβασμών της πλάκας. Αυτή η μείωση παρατηρήθηκε, ότι σχετίζεται με τη θερμοκρασία της πλάκας στην αντίστοιχη μελέτη, δηλαδή ότι όσο μειώνεται η θερμοκρασία μειώνεται και η κλίση της ευθείας δύναμη έλασης-χρόνος. Γεγονός που χρήζει ενδιαφέροντος για την καλύτερη κατανόηση και συσχέτιση της έλασης με την προσομοίωση της.

Τέλος, είναι σαφές ότι στα πλαίσια της εργασίας αυτής η μελέτη μπορούσε να είναι απλά προκαταρκτική. Το θετικό στοιχείο της αξιοποίησης δεδομένων εισόδου από την πραγματική βιομηχανική πρακτική, καθώς και τα συγκρίσιμα σε τάξη μεγέθους

αποτελέσματα σε σχέση με τις εφαρμοζόμενες στο έλαστρο δυνάμεις κατά τη διενέργεια της θερμής έλασης αποτελούν ισχυρο κίνητρο για την περαιτέρω ανάλυση και εμβάθυνση.

7. Βιβλιογραφία

- (1991). Heat Treating. Στο *ASM Handbook Volume 4* (σσ. 1862-1895). ASM International.
- Αναζ. Έλαση Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας / Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών. (2016, Μάιος 10). Ανάκτηση από Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας / Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών: http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/06-Rolling.pdf
- 50323-3, N. D. (December 1993). *Tribology; friction; definitions, types, conditions, quantities*.
- A. Soulami, CA Lavender, DM Paxton, DE Burkes. (April 2014). *Rolling Process Modeling Report: Finite-Element Prediction of Roll Separating Force and Rolling Defects*. Washington.
- Altan, T., Gerds, A.F. (1970). *Temperature Effects in Closed-Die Forging*. ASM Technical Report No. C70-30.1.
- Altan, T., Ngaile, G., Shen, G. (2005). *Cold and Hot Forgings: Fundamentals and Applications*. ASM International.
- Altan, T., Oh, S.-I., Gegel, H.L. (1983). *Metal Forming Fundamentals and Applications*. ASM International.
- aluNET. (2015, December 28). www.alunet.gr/2015/12/1057v. Ανάκτηση από www.alunet.gr: <http://www.alunet.gr/2015/12/1057v>
- Association, T. A. (1990, June). Ανάκτηση από www.aluminum.org: http://www.aluminum.org/sites/default/files/Rolling_Aluminum_From_The_Mine_Through_The_Mill.pdf
- Backofen, W. (1972). *Deformation Processing*. Addison-Wesley.
- Bathe, K. J. (1996). *Finite Element Procedures*. New Jersey: Prentice Hall Inc.
- Bauschinger, J. (1886). Mitt. Mech. Tech. Lab. Munchen.
- Blazynski, T. (1976). *Metal Forming: Tool profiles and Flow*. London,: Macmillan.
- Boogaard, A. H. (2002). *Thermally Enhanced Forming of Aluminium Sheet*. Hengelo: A.H. van den Boogaard.
- Chakrabarty, J. (2006). *Theory Of Plasticity*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Cook, P. M. (1957). Proc. Conf. Properties of Materials at High Rates of Strain. Inst. Mech. Eng.

- Demarco, D. and E. N. Dvorkin. (2001). *Modeling of metal forming processes: implementation of an iterative solver in the flow formulation*, *Computers and Structures*, vol 79.
- Eckermann, F. (2008). *Microscopic Structural and Electrochemical Aspects of Al-Mg-Si Corrosion*. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- Farren, W.S., Taylor, G.I. (1925). Ser.A, Vol 107. Στο *The Heat Developed During Plastic Extrusion of Metals* (σσ. 422-451). Proc. R. Soc.
- Ferencz, R. M. and T. J. R. Hughes. (1998). Iterative finite element solutions in nonlinear solid mechanics. Στο P. G. Lions, *Handbook of numerical analysis*, vol 6. North-Holland, Amsterdam.
- Gavalas, E. (2015). *Analysis of the performance of laser treated forging dies*. Aachen.
- Gelin, J. C., B. Liu, C. Labergere. (2000). Stable and accurate algorithms for the simulation of deep drawing and tube hydroforming processes. Στο E. Oñate, *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*. Barcelona: CIMNE Publishing.
- Hosford, W. (2010). *Solid Mechanics*. Cambridge University Press.
- <http://www.csun.edu/~bavarian>. (n.d.). Ανάκτηση June 01, 2016, από [www.csun.edu: http://www.csun.edu/~bavarian/Courses/MSE%20528/Precipitation_Hardening_7075Al.pdf](http://www.csun.edu/~bavarian/Courses/MSE%20528/Precipitation_Hardening_7075Al.pdf)
- Hughes, O. (1996). *Ship Structural Design: A rationally-based, computer-aided*. New York: SNAME.
- Hutton, V. D. (2004). *Fundamentals of Finite Element Analysis 1st Ed*. New York: McGraw-Hill.
- Jefferson, A. D. and H. R. Thomas. (1997). Convergence criteria for iterative solvers applied to nonlinear plasticity problems. Στο *Computational Plasticity, Fundamentals and Applications*, (σσ. 441-446).
- Kacou, S. and I. D. Parsons. (1993). A parallel multigrid method for history-dependent elastoplasticity computations. Στο *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol 108 (σσ. 1-21).
- Lenard, J. G. (2014). *Primer on Flat Rolling*. Waterloo, Ontario, Canada: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Ludwik, P. (1909). *Elem. Technol. Mech*. Berlin: Springer.
- Mahnken, R. (1995). *A Newton-multigrid algorithm for elasto-plastic/viscoplastic problems*, *Computational Mechanics*, vol 15.
- Mahtab, F. U., Johnson, Slater, W. (1965). *R.A.C. Proc. Inst. Mech. Eng.*
- Matsumoto, R., Osumi, Y., Utsunomiya, H. (2014). *Reduction of friction of steel covered with oxide scale in hot forging*. Elsevier B.V.

- Mattiasson, K., L. Bernspång, A. Honecker, E. Schedin, T. Hamman and A. Melander. (1991). On the use of explicit time integration in finite element simulation of industrial sheet metal forming processes. Στο *Numerical simulations of 3D Sheet Forming Processes* (σσ. 479-498). Dusseldorf.: VDI-Berichte, VDI Verlag GmbH.
- Mercer, C. D., J. D. Nagtegaal, N. Rebelo. (1995). Effective application of different solvers to forming simulations. Στο S.-F. S. P.R.Dawson, *Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications* (σσ. 469-474). Rotterdam: Balkema.
- Mocellin, K., L. Fourment, T. Coupez and J. L. Chenot. (2001). *Toward large scale F.E.computation of hot forging process using iterative solvers, parallel computation and multigrid algorithms, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 52.*
- Orowan, E. (1943). Στο *The Calculation of Toll Pressure in Hot and Cold Flat Rolling, Vol 67* (σσ. 140-150). Proceedings of Institutional Engineers Symposium.
- Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid. (n.d.). *Manufacturing Processes for Engineering Materials*. Pearson Prentice Hall.
- Udomphol, T. (2007). <http://eng.sut.ac.th>. Ανάκτηση June 10, 2016, από http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/pdf/03_Rolling%20of%20metals.pdf
- Van den Boogaard, A. H., A. D. Rietman and J. Huétink. (1998). Iterative solvers in forming process simulations. Στο J. H. Baaijens, *Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications* (σσ. 219-224). Rotterdam: Balkema.
- Yang,D.Y.,D.W. Jung, I. S. Song,D. J.Yoo, J.H. Lee. (1995). Comparative investigation into implicit, explicit, and iterative implicit/explicit schemes for the simulation of sheetmetal forming processes. *Journal of Materials Processing Technology, vol. 50,* 39-53.
- Zienkiewicz, O.C.; Taylor R.L. , ; Zhu J.Z. . (2000). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Αεράκη Γ. , Σταθάτου Η. (2012). *ΜΗχανική συμπεριφορά διαβρωμένων κραμάτων αλουμινίου σειράς 5XXX*. Πειραιάς : Τ.Ε.Ι. Πειραιά.
- Αθανασάτος, Ι. (2009). *Μελέτη της διάδοσης ρωγμών σε ενισχυμένα και υβριδικά ελάσματα κραμάτων αλουμινίου μέσω δοκιμών σε συμπαγή δοκίμια εφελκυσμού μικρής κλίμακας (CT)*. Αθήνα: Ε.Μ.Π.
- Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής. (2007). *Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών*. Αθήνα : Παπασωτηρίου.
- Ιωαννίδης, Β. Ε. (2005). *Προοπτικές της ελληνικής μεταλλουργικής βιομηχανίας αλουμινίου, χρυσού και νικελίου την επόμενη δεκαετία*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Καλογερόπουλος, Δ. Ν. (2013). *Μελέτη μεθοδολογίας ελέγχου και μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση κράματος αλουμινίου 5083-H111*. Πάτρα: Πολυτεχνείο Πατρών.
- Καρύδης, Π. Α. (2016, Μαγ 14). *Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Τομέας θαλάσσιων Κατασκευών, Υπολογιστικές Μέθοδοι και Εφαρμογές σε Λεπτότοιχες*

Κατασκευές. Ανάκτηση από users.ntua.gr:
http://users.ntua.gr/caridis/methodoi/chapters_pdf.html

Κουμούσης, Β. Κ. (2016, May 17). *Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών*. Ανάκτηση από users.ntua.gr/vkoum:
http://users.ntua.gr/vkoum/undergraduate/infelem/theory/fem_part_1.pdf

Λάγαρης, Δ. Α. (2009). *Ανάπτυξη και τεχνολογικές ιδιότητες προηγμένου κράματος αλουμινίου 7075*. Αθήνα: Ε.Μ.Π.

Φιλόπουλος, Σ. Π. (2014, March 27). Ανάκτηση από eclass.teiath.gr:
<https://eclass.teiath.gr/modules/document/file.php/ET189/%CE%95%CF%86%CE%B5%CE%BB%CE%BA%CF%85%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82/%CE%A0%CE%91%CE%A1%CE%9F%CE%A5%CE%A3%CE%99%CE%91%CE%A3%CE%97%20%CE%95%CE%A6%CE%95%CE%9B%CE%9A%CE%A5%CE%A3%CE%9C%CE%9F%CE%A5.pdf>

Χριστακόπουλος, Γ. (2010). *Μελέτη ομοειδών και ετεροειδών συγκολλήσεων ναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου με τη μέθοδο της τριβής με ανάδευση*. Αθήνα: Ε.Μ.Π.