



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.):
"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

ΕΛΑΣΗ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ "ΣΑΝΤΟΥΙΤΣ"

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΙΧΑΗΛ Κ. ΛΑΖΑΡΙΔΗ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Δ. Μανωλάκος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.):
"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

Περίληψη

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων τριών δεκαετιών, η παραγωγή πολυστρωματικών (διμεταλλικών και τριμεταλλικών) συνθέτων υλικών μέσω της διεργασίας της έλασης, η οποία είναι πιο αποτελεσματική και οικονομική σε σύγκριση με άλλους τύπους διεργασιών, αποτελεί ένα ολοένα και μεγαλύτερης σημασίας αντικείμενο μελέτης. Επιπλέον τα πολυστρωματικά υλικά ή αλλιώς υλικά σάντουιτς που αποτελούνται από μια αλληλουχία στρωμάτων υλικού διαφορετικής φύσεως, χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες λόγω της ποικιλίας των ιδιοτήτων που κατέχουν, όπως η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, υψηλή αντίσταση στη διάβρωση και υψηλή αντοχή.

Γι' αυτό έγινε έρευνα πάνω στην έλαση τριμεταλλικών δοκιμίων των οποίων οι επιφάνειες όψεως αποτελούνταν από χαλκό, ορείχαλκο και χάλυβα ενώ ο πυρήνας από μεταλλική σκόνη χαλκού, αλουμινίου και μαγνησίου.

Η μορφοποίηση των δοκιμίων μας έγινε από εξειδικευμένο τεχνίτη με τη χρήση εργαλείων και υλικών του εργαστηρίου τεχνολογίας των κατεργασιών και ακολούθησε η έλαση αυτών σε έλαστρο δύο ράουλων.

Η έρευνα επικεντρώθηκε στην κατεργασιμότητα των διαμορφωθέντων υλικών και έχουν ληφθεί πειραματικές μετρήσεις για παραμέτρους έλασης όπως η μέγιστη δύναμη έλασης, η ροπή έλασης και η μείωση του πάχους.

Summary

During the last three decades, the production of multilayer (bimetallic and trimetallic) composite materials through the process of rolling, which is more efficient and economical than other types of processes is an increasingly important subject of study. Moreover, multilayer or sandwich materials otherwise consisting of a sequence of layers of material of a different nature, are widely used in various industries due to the variety of properties they possess, such as high electrical conductivity, high corrosion resistance and high strength.

For this became research on the rolling of trimetallic specimens whose outer surfaces consisted of copper, brass and steel while the core consisted of metallic copper powder, aluminum powder and magnesium powder.

The formation of our specimens was done by skilled craftsman who used tools and materials from the laboratory of technology treatments, followed by the rolling in a two high rolling mill.

The investigation focused on the "machinability" of the shaped materials and obtained experimental measurements of the rolling parameters such as mill maximum force, rolling torque and the reduce of thickness.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ.....	3
Κεφάλαιο 1 : Κατεργασία Έλασης.....	6
1.1 Έλαση.....	6
1.2 Έλαστρο.....	8
1.3 Προϊόντα έλασης.....	10
1.4 Μηχανική Έλασης.....	12
1.5 Θεωρία πολυστρωματικών υλικών.....	16
1.6 Ελαττώματα έλασης.....	18
1.7 Η έλαση ως διεργασία δημιουργίας υλικών σάντουιτς.....	21
Κεφάλαιο 2 : Σύνθετα πολυστρωματικά υλικά.....	24
2.1 Σύνθετα υλικά.....	24
2.2 Υλικά σάντουιτς.....	28
2.3 Εφαρμογές υλικών σάντουιτς.....	31
Κεφάλαιο 3 : Πειραματική διαδικασία.....	41
3.1 Υλικά δοκιμίων.....	41
3.2 Κατασκευή δοκιμίων.....	43
3.3 Διαδικασία της Έλασης.....	44
Κεφάλαιο 4 : Αξιολόγηση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα.....	60
4.1 Επεξεργασία δοκιμίων.....	60
4.2 Οπτική παρατήρηση.....	61
4.3 Αξιολόγηση δοκιμίων.....	62
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	78

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία γίνεται μία προσπάθεια προσέγγισης της ψυχρής έλασης πολυστρωματικού ελάσματος με μεταλλικές εξωτερικές επιφάνειες και πυρήνα υπό μορφή μεταλλικής σκόνης. Περιγράφονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας που πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις του τομέα τεχνολογίας κατεργασιών καθώς επίσης οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτές.

Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται γενικά στην κατεργασία της έλασης όπου περιγράφεται το μοντέλο υπολογισμού που χρησιμοποιείται για πολυστρωματικά υλικά και γίνεται μία ιστορική αναδρομή σε θεωρητικά μοντέλα έλασης και κατηγορίες ελαττωμάτων που αποκτούν τα υλικά από αυτή τη κατεργασία.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται γενικά στα σύνθετα υλικά και ειδικότερα στα πολυστρωματικά υλικά (υλικά "σάντουιτς") κάνοντας μία εκτενή περιγραφή των εφαρμογών και των πλεονεκτημάτων που κατέχουν. Επιπλέον αναφέρονται περιληπτικά ορισμένα χαρακτηριστικά των πολυστρωματικών υλικών και των τρόπων που αυτά κατασκευάζονται.

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται περιγραφή της πειραματικής διάταξης και των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση του πειράματος καθώς επίσης και τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν όπως η μεταβολή του πάχους, οι δυνάμεις και οι ροπές.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται η διαδικασία που ακολουθήσαμε για να εξάγουμε πειραματικές μετρήσεις και ειδικότερα οπτικές παρατηρήσεις στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα το Διευθυντή του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών Καθηγητή Δ. Ε. Μανωλάκο για τη δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω τη διπλωματική μου εργασία, καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια αυτής. Τέλος, πολλές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον υποψήφιο διδάκτορα Σ. Γεωργιόπουλο για τη βοήθεια που μου προσέφερε στην όλη οργάνωση της εργασίας.

Συμβολισμοί

- V : ταχύτητα συγκόλλησης
- V_1 : ταχύτητα σημείου κρούσης
- V_0 : ταχύτητα κρούσης επιταχ. πλάκας (επένδυσης)
- β - α : γωνία ώθησης ή επιστροφής
- β : γωνία κρούσης
- β_c : γωνία κρούσης κρίσιμη
- α : αρχική ημιγωνία σφήνας
- V_2 : σχετική ταχύτητα σημείου P ως προς A
- P : πίεση
- ρ : πυκνότητα
- u : ταχύτητα
- m : μάζα ολική
- m_s : μάζα slag / salient jet (σκωρίας / οπίσθιου ροϊκού νέφους)
- m_j : μάζα jet (ροϊκού νέφους)
- m_r : μάζα re – entrant jet (εμπρόσθιου ροϊκού νέφους)
- V_D : ταχύτητα εκτόνωσης εκρηκτικού
- V_W : ταχύτητα διάδοσης της συγκόλλησης δηλ.
του σημείου σύγκρουσης S
- V_P : σχετική ταχύτητα επιταχυνόμενης πλάκας
ως προς παρατηρητή κινούμενο με το σημείο S
- V_F : απόλυτη ταχύτητα επιταχυνόμενης πλάκας
- V_{rj} : απόλυτη ταχύτητα re – entrant jet
(οπισθίου ροϊκού νέφους)
- V_C : τιμή της ταχύτητας του σημείου σύγκρουσης
πάνω από την οποία σχηματίζεται κυματοειδής ραφή
- w : πάχος κάθε υλικού σε διμεταλλικό έλασμα

\bar{Y} : μέσο όριο διαρροής

P : φορτίο έλασης

T : ροπή έλασης

W : πλάτος μπιγέτας

h : ύψος μπιγέτας

L_c : προβολή τόξου επαφής κατά την έλαση

R : ακτίνα καμπυλότητας απαραμόρφωτου ράουλου

R' : ακτίνα καμπυλότητας ελαστ. παραμορφωμένου ράουλου

γ : λόγος τελικού προς αρχικό πάχος μπιγέτας

Δh : μείωση πάχους μπιγέτας

$h_{a,b}$ και t : μέσο πάχος στρώματος

$h_{o,i b,t}$: μείωση πάχους εισόδου/εξόδου
διμεταλλικού/τριμεταλλικού αντίστοιχα

$r_{i,T b,t}$: λόγος μείωσης πάχους ανά πάσσο/ολικός
διμεταλλικού/τριμεταλλικού αντίστοιχα

i : αρ. πάσου

F_{Ri}, T_{Ri} : δύναμη, ροπή έλασης στο i πάσο

\bar{p} : μέση πίεση

R_x : τραχύτητα του χ υλικού

HEL : ελαστικό όριο Hugoniot

C_0 : ταχύτητα ήχου στο υλικό

HV : σκληρότητα

σ_{TS} : μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό

ρ_{FP} : πυκνότητα επιταχυνόμενης πλάκας

λ : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

T_t : θερμοκρασία τήξης μετάλλου

κ : θερμική αγωγιμότητα
 g_1 : πάχος πυροδοτούμενης πλάκας
 C_p : ειδική θερμότητα
 T_{mp} : θερμοκρασία τήξης πλάκας
 T_{Fp} : πάχος επιταχυνόμενης πλάκας
 N : σταθερά
 k_a, k_b : όριο διαρροής σε διάτμηση.

Κεφάλαιο 1

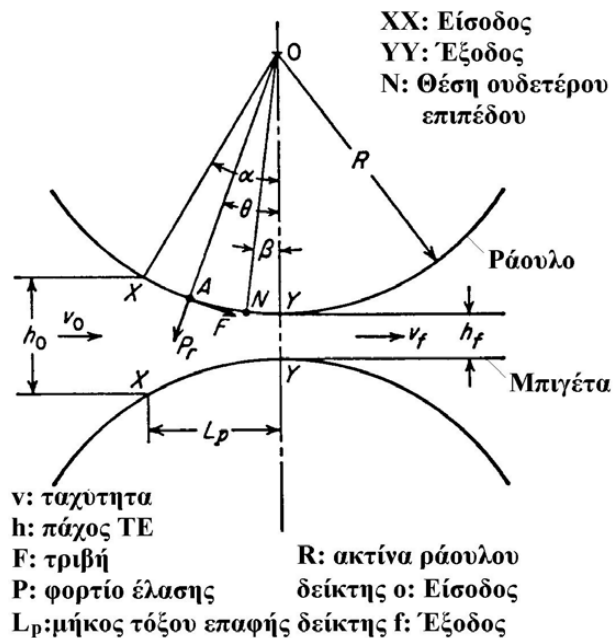
1. Έλαση

Κατά την έλαση (rolling), το τεμάχιο υπό τη μορφή ράβδου ή πλάκας υφίσταται πλαστική παραμόρφωση διερχόμενο μέσα από το άνοιγμα μεταξύ δύο αντίθετα περιστρεφόμενων ραούλων (τυμπάνων). Αποτέλεσμα της έλασης είναι η παραγωγή αντίστοιχου προϊόντος με μικρότερη διατομή και μεγαλύτερο μήκος, βλ. Σχ.1. Σαν κατεργασία η έλαση αναπτύχθηκε περί τα τέλη του 16^{ου} αιώνα. Διακρίνεται σε:

(i) Έλαση μπιγέτας, όπου σημειώνεται μεταβολή και στο πλάτος του παραγόμενου προϊόντος, γνωστό και ως πλευρική διόγκωση (spreading)

(ii) Έλαση πλάκας, κατά την οποία δεν παρατηρείται μεταβολή στο πλάτος του παραγόμενου προϊόντος.

Η έλαση μπορεί να πραγματοποιηθεί και ως ψυχρή και ως θερμή κατεργασία



Σχ.1 Σχηματική παράσταση έλασης

Ειδικότερα, τα έλαστρα είναι μηχανές που χρησιμοποιούν ράουλα για να διαμορφώνουν συμπαγή μεταλλικά τεμάχια με τη μέθοδο της ψυχρής έλασης της κατασκευαστικής δηλαδή διαδικασίας κατά την οποία ένα συμπαγές μεταλλικό τεμάχιο τοποθετούμενο μεταξύ δύο περιστρεφόμενων ραούλων υφίσταται ισόογκη πλαστική παραμόρφωση. Οι ασκούμενες από τα ράουλα δυνάμεις δημιουργούν εντός του τεμαχίου θλιπτικές (κατά τη διεύθυνση της διακέντρου των ραούλων) και εφελκυστικές διατμητικές τάσεις (κατά τη διεύθυνση της εφαπτομένης στα ράουλα), οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα τη μείωση της διατομής του τεμαχίου και την αύξηση του μήκους του. Εφελκυστικές τάσεις μπορούν να αναπτυχθούν δευτερευόντως και μέσω του μηχανισμού κίνησης του τεμαχίου.

Για παράδειγμα στις ευρείας εφαρμογής εργαλειομηχανές για έλαση μορφής, όπου μια μεταλλική ταινία που είναι αρχικά σε μορφή ρολού εκτυλίσσεται και ωθείται σε ευθύγραμμη κίνηση από μια αξονική δύναμη, κατά τη διεύθυνση της εφαπτομένης στα ράουλα, ώστε να περάσει μέσα από αυτά. Τότε στη μικρού πάχους διατομή της ταινίας αναπτύσσονται ορθές Εφελκυστικές τάσεις από τη δύναμη ώθησης, οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα μια παράλληλη έλαση της ταινίας, με ασήμαντες όμως γεωμετρικές και παραγωγικές επιπτώσεις. Για το λόγο αυτό ο κύριος μηχανισμός έλασης θεωρείται η διαμόρφωση μέσα στα ράουλα.

Στη γενική περίπτωση κατεργασίας ενός συμπαγούς αντικειμένου ανάμεσα από δύο ράουλα έχουμε μια ισόογκη παραμόρφωση του τεμαχίου όπου η μείωση για παράδειγμα της διάστασης του τεμαχίου καθ' ύψος, πιθανόν να επιφέρει εκτός από την αύξηση του μήκους του και την αύξηση του πλάτους του. Ως γνωστόν το αλγεβρικό άθροισμα των τριών κύριων πραγματικών παραμορφώσεων θα είναι μηδέν ($\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$).

Κατά συνέπεια προκύπτει ότι το αλγεβρικό άθροισμα των διαφορικών πλαστικών παραμορφώσεων θα είναι μηδέν ($d\epsilon_1 + d\epsilon_2 + d\epsilon_3 = 0$). Έτσι λοιπόν βλέπουμε ότι μια εξαναγκασμένη κατά το ύψος και πλάτος του τεμαχίου διαμόρφωση της διατομής, όπου έστω τα ϵ_1 , ϵ_2 θα είναι συγκεκριμένα, θα έχουμε συγκεκριμένη τιμή και για την κατά μήκος παραμόρφωση ϵ_3 . Αυτή η εξαναγκασμένη διαμόρφωση επιτυγχάνεται μέσω της κατάλληλης μορφής και γεωμετρίας των ραούλων.

Σημειώνεται ότι με την ψυχρή έλαση δεν επιτυγχάνονται μεγάλες – κατά ποσοστό των διαστάσεων – μειώσεις της διατομής του τεμαχίου. Οι μεγάλες μειώσεις επιτυγχάνονται με τη θερμή έλαση που γίνεται σε θερμοκρασίες πάνω από τη

θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης του υλικού (η οποία είναι περίπου το ήμισυ του σημείου τήξης του υλικού). Ωστόσο μια κατεργασία σε τέτοιες συνθήκες θερμοκρασίες δεν διευκολύνει το σχεδιασμό μιας σταθερής παραγωγής με ακριβείς διαστάσεις τελικού προϊόντος. Για το λόγο αυτό οι διαμορφώσεις τελικής φάσης στις κατεργασίες συμπαγών μεταλλικών τεμαχίων γίνονται με ψυχρή έλαση.

1.2 Έλαστρο

Αν ως έλαστρο ορίσουμε κάθε παραγωγικό μηχανισμό κατεργασίας ενός ελάσματος μέσω ραούλων, τότε μπορούμε να εντάξουμε σε αυτήν την κατηγορία μηχανών αρκετά διαφορετικούς μηχανισμούς κατεργασίας. Τέτοιες είναι οι προφίλοποιητικές ραουλομηχανές που έχουν και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον καθώς και τη μεγαλύτερη παραγωγική σημασία, οι ραουλιέρες μορφοσιδήρων (αλλά και έτοιμων προϊόντων όπως σωλήνες) και οι μηχανές κυλίνδρισης με πρόκαμψη.

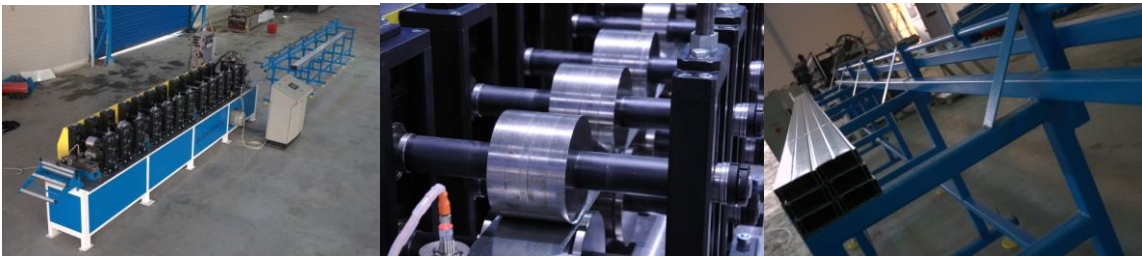
Α) *Προφίλοποιητικές εργαλειομηχανές*. Στις μηχανές αυτές ένα ρολό μεταλλικής ταινίας, το οποίο μπορεί να είναι χαλύβδινο, αλουμινένιο ή και από άλλο υλικό εκτυλίσσεται και ωθείται κατά μήκος μιας διαμήκουσ παραγωγικής γραμμής, η οποία σε τακτές αποστάσεις φέρει σειρές ραούλων διαμόρφωσης, βλέπε εικόνα 1. Στην αρχή της παραγωγικής μηχανής βρίσκεται η ανέμη απλής ή διπλής εκτύλιξης (κατά την περίπτωση της εκάστοτε μηχανής), που μπορεί επίσης να είναι είτε υδραυλική, είτε ελεγχόμενη από ηλεκτροκινητήρα.

Η γεωμετρία των ραούλων καθορίζει και τη μορφή της τελικής διατομής των παραγόμενων τεμαχίων, η οποία για παράδειγμα μπορεί να είναι κάποια πολυγωνική μορφή (τρίγωνο τετράπλευρο, πολύγωνο, κανονικό ή μη), κυκλική ή ελλειψοειδής, να έχει σχήμα πι (π.χ στα προφίλ αλουμινίου) και γενικά μπορεί να πάρει μια τεράστια ποικιλία σχημάτων. Η διαμόρφωση όμως της τελικής διατομής γίνεται σταδιακά μέσα από αλληπάλληλες σειρές ραούλων. Αυτό κατά βάση γίνεται γιατί όπως αναφέρθηκε κάθε φάση ψυχρής έλασης επιτυγχάνει περιορισμένη διαμόρφωση της διατομής. Για το λόγο αυτό απαιτείται να σχεδιάζεται κατάλληλα η γεωμετρία των επάλληλων ραούλων, ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή γεωμετρία του τελικού προϊόντος χωρίς κίνδυνο αστοχίας αυτού ή ελάττωσης της αναγκαίας αντοχής του.

Αναφορικά με τη μηχανική αυτής της κατεργασίας σημειώνουμε ότι ενώ η απλή ώθηση της ταινίας συνιστά μικρής κλίμακας έλαση με ομοιογενή παραμόρφωση του

υλικού, η «εξαναγκασμένη» έλαση μέσα από τα ράουλα συνιστά ανομοιογενή παραμόρφωση γιατί τα ράουλα που προκαλούν την παραμόρφωση προσδίδουν στο μέταλλο περισσότερο πλαστικό έργο από το ιδεατό, αυτό δηλαδή που θα προσδιδόταν σε μια διαδικασία εφελκυσμού ή θλίψης ενός μεταλλικού τεμαχίου που δεν θα είχε άλλον περιορισμό στους βαθμούς ελευθερίας του, πέρα από τον άξονα στον οποίο εφαρμόζεται η εφελκυστική ή θλιπτική δύναμη. Στην περίπτωση των προφίλοποιητικών μηχανών τα ράουλα θέτουν κάποιους επιπλέον περιορισμούς στην κίνηση του εκτυλισσόμενου ρολού.

Πάντως στο σχεδιασμό των προφίλοποιητικών μηχανών εκτός από τη σχεδίαση της γεωμετρίας και της κατασκευής των διαφόρων ζευγών ραούλων παίζουν ρόλο κι άλλοι παράγοντες. Τέτοιοι είναι ο υπολογισμός του αναγκαίου αριθμού των φάσεων και της απόστασης τοποθέτησης των διαφόρων ζευγών ραούλων που επιτελούν τη διαμόρφωση σε κάθε φάση. Αυτός ο υπολογισμός συσχετίζεται παράλληλα με το πάχος και τις μηχανικές ιδιότητες του ελάσματος, αλλά και την επιλεγόμενη ταχύτητα ώθησης του ρολού. Άλλες παράμετροι σχεδιασμού των προφίλοποιητικών μηχανών είναι η λίπανση και η στιβαρότητα της συνολικής διαμήκου παραγωγικής μηχανής σε συνδυασμό με τις αναγκαίες για το τελικό προϊόν κατασκευαστικές ανοχές. Πρέπει να τονιστεί ότι οι προφίλοποιητικές εργαλειομηχανές παράγουν μεγάλο εύρος γνωστών προϊόντων ευρείας κατανάλωσης, όπως ψευδοροφές, μεταλλικές κάσες, ρολά καταστημάτων, ιστούς για μεταλλικά ράφια, προφίλ αλουμινίου κ.λ.π.



Εικόνα 1 : Προφίλοποιητική ραουλιέρα για προφίλ UD, CD, CW, UW

B) *Ραουλιέρες*. Οι ραουλιέρες συνιστούν μηχανές που στην πρόσοψή τους φέρουν τρία ράουλα, των οποίων οι άξονες σχηματίζουν ισοσκελές τρίγωνο, βλέπε εικόνα 2. Στα δύο κάτω ράουλα επιτελείται η πρόκαμψη. Συνήθως έχουν δυνατότητα κάθετης και οριζόντιας εργασίας. Σαν παραγωγικές μηχανές χρησιμοποιούνται για να διαμορφώνουν μορφοσίδηρο σε διάφορα προφίλ, τα οποία συνήθως αντιστοιχούν σε κοίλα τεμάχια μικρότερου ή μεγαλύτερου πάχους, ορθογωνικής ή κυκλικής διατομής. Μπορούν

ωστόσο να κατασκευάσουν πιο σύνθετες μορφές αυτών των τεμαχίων π.χ με εσοχές ή άλλες μορφές στις οποίες το κοίλο τεμάχιο δεν είναι εσωτερικά ομοιόμορφο αλλά έχει κάποια εσωτερική διαμόρφωση.



Εικόνα 2 : Ραουλιέρες διαμορφωτές σε διάφορα μεγέθη

Γ) *Μηχανές κυλίνδρισης*. Έχουν μια ομοιότητα με τις ραουλιέρες με την έννοια ότι στην πρόσοψη των μηχανών είναι προσαρμοσμένοι τρεις ή τέσσερις συμμετρικά τοποθετημένοι κύλινδροι που φέρουν αντίστοιχα ράουλα, βλέπε εικόνα 3. Χρησιμοποιούνται για να διαμορφώνουν διαμήκη ελάσματα ικανού πλάτους σε κυλινδρική μορφή. Μπορούν να κατασκευάσουν ιδιαίτερα μεγάλα κυλινδρικά τεμάχια, αφού η διάμετρος των ραούλων τους μπορεί να φτάσει τα 330 χιλιοστά και το μήκος κυλίνδρισης μπορεί να φτάσει τα 4 μέτρα.



Εικόνα 3 : Μηχανές κυλίνδρισης

1.3 Προϊόντα Έλασης

Η έλαση εκτελείται σε διάφορες φάσεις (πάσα), βλ. Σχ. 2. Το πρωτογενές υλικό είναι πλίνθωμα (ingot), προϊόν χύτευσης, ενώ τα προϊόντα των επόμενων φάσεων διακρίνονται σε επιμήκη (ράβδοι, μπιγέτες, μορφοδοκοί) και σε πλατιά προϊόντα (πλάκες, ελάσματα, ταινίες).

Ανάλογα με τη φάση της έλασης και τη μορφή του προϊόντος, ακολουθείται η εξής τυποποίηση:

(α) Ημι-κατεργασμένα προϊόντα (semi-finished products)

- Μπιγέτα πρώτης έλασης (bloom) – τετραγωνικής διατομής με εμβαδόν $A \geq 15 \times 15 \text{ cm}^2$

Περαιτέρω μείωση του πάχους μπορεί να οδηγήσει σε:

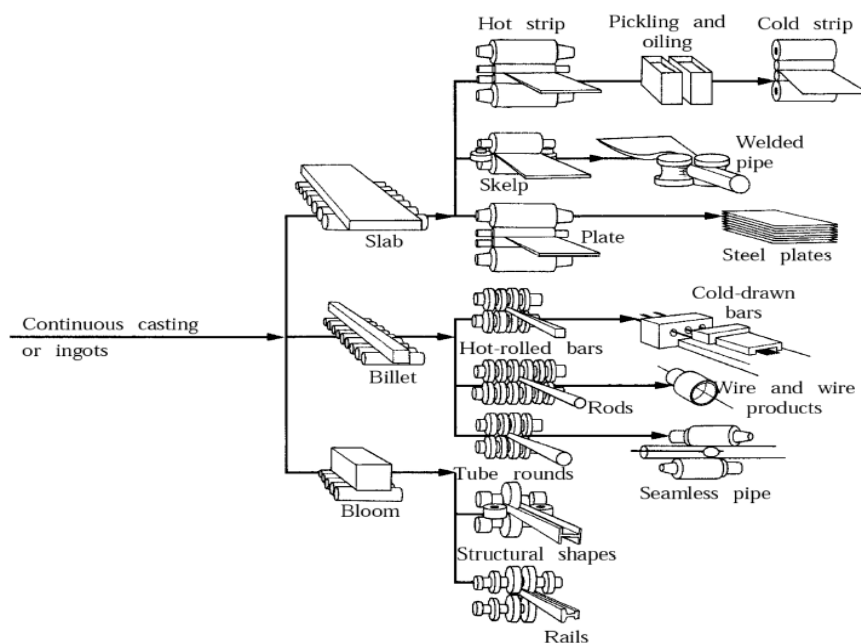
1. Μπιγέτα (billet) τετραγωνικής διατομής με μικρότερο εμβαδόν ($A \geq 4 \times 4 \text{ cm}^2$)
2. Πλάκα (slab) ορθογωνικής διατομής με εμβαδόν $A \geq 100 \text{ cm}^2$ και πλάτος τουλάχιστον δι-πλάσιο του πάχους της.

(β) Τελικά προϊόντα (finished products)

Περαιτέρω διαμόρφωση των ημι-κατεργασμένων προϊόντων οδηγεί σε:

- Επιμήκη προϊόντα μορφής που προέρχονται από την έλαση μπιγετών (μορφοδοκοί, ήλοι με σπειρώμα, δακτύλιοι κλπ.) με ειδικές μεθόδους έλασης.
- Πλατιά προϊόντα που προέρχονται από την έλαση πλακών και διακρίνονται ανάλογα με το πάχος και το πλάτος τους σε:

1. Ελάσματα (plates) με πάχος $\geq 6 \text{ mm}$
2. Λεπτά ελάσματα (sheets) με πάχος $< 6 \text{ mm}$ και πλάτος $\geq 600 \text{ mm}$
3. Λεπτές λωρίδες (strips) με πάχος $< 6 \text{ mm}$ και πλάτος $< 600 \text{ mm}$.



Σχήμα 2: Προϊόντα έλασης

1.4 Μηχανική της έλασης

Ταχύτητες

Αν εφαρμοστεί η εξίσωση συνεχείας στη ροή του υλικού στην είσοδο, έξοδο και σε τυχούσα θέση μέσα στην πλαστική ζώνη (Σχ. 1) προκύπτει η σχέση

$$b \cdot h_o \cdot v_o = b \cdot h \cdot v = b \cdot h_f \cdot v_f$$

όπου b το πλάτος της μιγέτας, h το πάχος της, v η ταχύτητα, ενώ οι δείκτες o και f αναφέρονται στην είσοδο και την έξοδο, αντίστοιχα.

Επειδή ισχύει $h_o > h > h_f$, θα είναι προφανώς

$$v_o < v < v_f \quad (1a)$$

Από την εξ. (1a) συνάγεται ότι αρχικά η γραμμική ταχύτητα στην περιφέρεια του ραούλου θα είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του TE στην είσοδο του ανοίγματος για να μπορεί να εισαχθεί τούτο στην πλαστική ζώνη, στη συνέχεια υπάρχει βαθμιαία αύξηση της ταχύτητας μέσα στην πλαστική ζώνη μέχρις ότου αυτή εξισωθεί με την γραμμική ταχύτητα του ραούλου στη θέση ουδετέρου επιπέδου (σημείο N) και στη συνέχεια μέχρι την έξοδο η ταχύτητα της μιγέτας θα υπερβαίνει την γραμμική ταχύτητα του ραούλου. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μέσα στην πλαστική ζώνη θα υφίσταται ροή του υλικού προς την είσοδο (ροή αριστερά του ουδετέρου επιπέδου) και προς την έξοδο (ροή δεξιά του ουδετέρου επιπέδου), αντίστοιχα.

Δυνάμεις

Οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω στο υλικό σε τυχόν σημείο μέσα στην πλαστική ζώνη είναι το ακτινικό φορτίο έλασης P (rolling load, separating load) και η τριβή F που αντιτίθεται στη ροή του υλικού (Σχ. 1). Προφανώς συνδέονται με τη σχέση

$$F = \mu \cdot P \quad (2)$$

όπου μ ο συντελεστής τριβής στη διεπιφάνεια TE/EP.

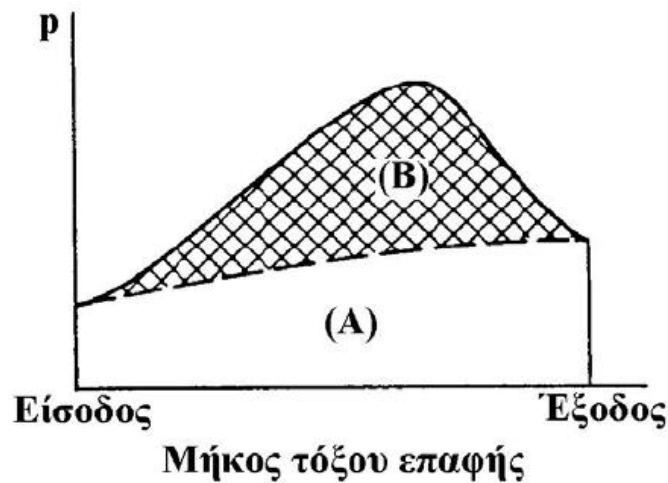
Μήκος τόξου επαφής

Η επιφάνεια επαφής TE/ραούλου εκτείνεται κατά μήκος του τόξου επαφής XY, το οποίο έχει προβεβλημένο μήκος L_p κατά τον άξονα του τεμαχίου (projected length of the arc of contact) ίσο με

$$L_p = \left[R \cdot (h_o - h_f) - \frac{(h_o - h_f)^2}{4} \right]^{1/2} \approx [R \cdot (h_o - h_f)]^{1/2} = (R \cdot \Delta h)^{1/2}$$

Κατανομή πίεσης ραούλων

Η κατανομή της πίεσης p των ραούλων φαίνεται στο Σχ. 14. Αρχικά σημειώνεται αύξηση της πίεσης μέχρι μια μέγιστη τιμή που αντιστοιχεί στη θέση του ουδετέρου επιπέδου και στη συνέχεια μειώνεται εκ νέου. Διακρίνονται σε δύο χαρακτηριστικές περιοχές, η περιοχή A που αντιπροσωπεύει το πλαστικό έργο που απαιτείται για την ομογενή παραμόρφωση του τεμαχίου και η περιοχή B που αντιστοιχεί στο πρόσθετο έργο για την υπερνίκηση των τριβών. Η μορφή της καμπύλης κατανομής της πίεσης ραούλων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, δεδομένου ότι εξασφαλίζει τον προσδιορισμό του σημείου εφαρμογής της συνισταμένης δύναμης έλασης και διευκολύνει έτσι τον προσδιορισμό της απαιτούμενης ροπής στρέψης και της ισχύος κατεργασίας.



Σχ.14: Κατανομή της πίεσης στην πλαστική ζώνη

Συνθήκη έναρξης της έλασης

Το τόξο επαφής αντιστοιχεί σε επίκεντρη γωνία α (angle of contact, angle of bite), μετρούμενη στο ράουλο, βλ. Σχ. 1. Για να επιτευχθεί η είσοδος της κατεργαζόμενης μπιγέτας μέσα στο άνοιγμα μεταξύ ραούλων θα πρέπει η συνολική οριζόντια συνιστώσα στην είσοδο να είναι θετική, δηλαδή

θα ισχύει

$$\mathbf{F} \cdot \cos \alpha - \mathbf{P}_r \cdot \sin \alpha \geq 0 \text{ ή ισοδύναμα } \frac{\mathbf{F}}{\mathbf{P}_r} \geq \tan \alpha$$

και δεδομένου ότι ο πρώτος όρος ισούται με τον μέσο συντελεστή τριβής μ , η οριακή συνθήκη έναρξης της έλασης γράφεται $\mu = \tan \alpha$

Μέγιστη μείωση πάχους ανά πάσο

Από το Σχ.1 προκύπτει εύκολα ότι

$$\tan \alpha = \frac{L_p}{R - \frac{\Delta h}{2}}$$

ή λόγω της εξ.(3)

$$\tan \alpha = \frac{\sqrt{R \cdot \Delta h}}{R - \frac{\Delta h}{2}} \approx \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$$

Οπότε λαμβάνοντας υπόψη και τη συνθήκη έναρξης της έλασης (ως ανισότητα) $\mu \geq \tan \alpha$ και επιλύοντας ως προς Δh , προκύπτει δυνατή μείωση πάχους σε ένα πάσο ίση

$$\text{προς } (\Delta h)_{\max} = \mu^2 \cdot R$$

Πλάτυνση της ακτίνας καμπυλότητας ραούλων

Λόγω των ισχυρών φορτίων έλασης, το ράουλο υφίσταται τοπικά στο τόξο επαφής ελαστική παραμόρφωση, που έχει ως συνέπεια τοπικά την πλάτυνση (μείωση της καμπυλότητας) του. Αποτέλεσμα αυτής της ελαστικής παραμόρφωσης είναι το τόξο επαφής να ανήκει σε κύκλο ακτίνας $R' > R$, η οποία προσδιορίζεται από την ημι-εμπειρική σχέση του Hitchcock

$$\mathbf{R}' = \mathbf{R} \cdot \left(\mathbf{1} + \frac{\mathbf{C} \cdot \mathbf{P}'}{\mathbf{b} \cdot \Delta \mathbf{h}} \right)$$

Όπου η σταθερά $C = 16(1 - \nu^2) / \pi E$ χαρακτηρίζει το υλικό του ραούλου και για χάλυβα λαμβάνει την τιμή $C = 2,16 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$, ν ο λόγος Poisson και E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του ραούλου, b το πλάτος της μπιγέτας, R η ακτίνα του απαραμόρφωτου ραούλου και P' το φορτίο έλασης βασισμένο όμως στην ακτίνα R' του παραμορφωμένου ραούλου.

Υπολογισμός του φορτίου έλασης

(α) Ομοιογενής παραμόρφωση

Το φορτίο P προκύπτει από τη μέση πίεση ραούλου πολλαπλασιασμένη με την προβεβλημένη επιφάνεια επαφής, δηλαδή

$$\mathbf{P} = \mathbf{p} \cdot \mathbf{b} \cdot \mathbf{L}_p = \sigma'_0 \cdot \mathbf{b} \cdot \sqrt{\mathbf{R} \cdot \Delta \mathbf{h}} \quad (7)$$

όπου η τάση διαρροής σ'_0 ισούται με το όριο διαρροής Y σε μονοαξονικό εφελκυσμό στην έλαση στην περίπτωση έλασης πλάκας (επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση μπιγέτας και σ με $2 \cdot Y / 3^{-1/2}$

(β) Ανομοιογενής παραμόρφωση (προσεγγιστική λύση)

Θεωρώντας το πρόβλημα ως σφυρηλάτηση ορθογωνικής μπιγέτας με μέσο πάχος

$h = (h_o + h_f) / 2$, προκύπτει ο προσεγγιστικός τύπος

$$\mathbf{P} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \bar{\sigma}_0 \cdot \left[\frac{1}{Q} (e^Q - 1) \cdot \mathbf{b} \cdot \sqrt{\mathbf{R} \cdot \Delta \mathbf{h}} \right]$$

όπου $\bar{\sigma}_0 = (Y_o + Y_f) / 2$ και $Q = \mu \cdot L_p / \bar{h}$.

Υπολογισμός ροπής στρέψης ραούλων και ισχύος κατεργασίας

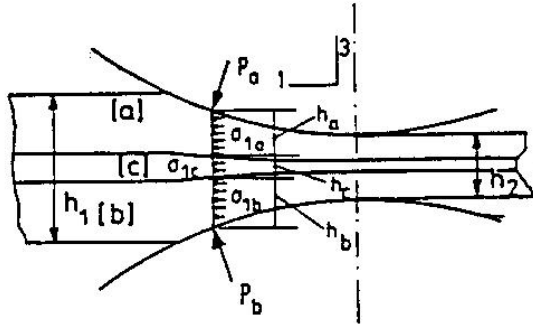
όπου N η συχνότητα περιστροφής των ραούλων.

- Ροπή στρέψης ραούλων : $T = 2 \cdot P' \cdot (\lambda \cdot L_p)$ όπου ο συντελεστής λ ισούται για θερμή έλαση 0.5 ή 0.45 για ψυχρή έλαση
- Απαιτούμενο έργο κατεργασίας : $W = 2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L_p) \cdot P$

- Ισχύς κατεργασίας: $W = 4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L_p \cdot P \cdot N$ όπου N η συχνότητα περιστροφής των ραούλων.

1.5 Θεωρία πολυστρωματικών υλικών

Η θεωρία έλασης πολυστρωματικού υλικού όπως περιγράφεται σχηματικά στο Σχ.3 λαμβάνει υπόψη την υπόθεση ότι τα υλικά είναι στερεά – τέλεια πλαστικά, το τόξο επαφής είναι κυκλικό και ο συντελεστής τριβής σταθερός πάνω σε αυτό.



Σχήμα 3: Ψυχρή έλαση εκρηκτικά επενδυμένου διμεταλλικού ελάσματος, τάσεις στο διάκενο των ραούλων

Εφόσον τα εξωτερικά στρώματα υφίστανται μεγαλύτερη επιμήκυνση από τον εσωτερικό πυρήνα, δυνάμεις τριβών εμφανίζονται ανάμεσα στα στρώματα και οι κάθετες δυνάμεις p_a και p_b είναι ίσες μεταξύ τους και για συνθήκες ψυχρής έλασης με την κατακόρυφη τάση σ_3 , $p_a = p_b = \sigma_3$. Αναφερόμενοι στα τρία στρώματα κατά το κριτήριο Tresca ισχύει

$$\begin{aligned} \sigma_3 - \sigma_{1a} &= 2 k_a \\ \sigma_3 - \sigma_{1c} &= 2 k_c \\ \sigma_3 - \sigma_{1b} &= 2 k_b \end{aligned} \quad (a)$$

Οι οριζόντιες τάσεις σ_{1i} ($i = a, b, c$) λαμβάνονται ως ομοιόμορφα κατανεμημένες στις κατακόρυφες τομές και αποτελούν το άθροισμα των τάσεων λόγω της συμβατικής έλασης και της διατμητικής τάσης στην διεπιφάνεια :

$$\begin{aligned} \sigma_{1a} &= x + y_a \\ \sigma_{1c} &= x - y_c \\ \sigma_{1b} &= x + y_b \end{aligned} \quad (b)$$

Η ισορροπία των τάσεων λόγω περιορισμού στην διεπιφάνεια δίνει:

$$y_a h_a + y_b h_b = y_c h_c \quad (c)$$

Η ενεργή τάση διαρροής για την έλαση υλικού 'sandwich' είναι:

$$2 k^* = \sigma_3 - x$$

$$K^* = \frac{(K_a \cdot h_a + K_b \cdot h_b + K_c \cdot h_c)}{h_a + h_b + h_c} \quad (1)$$

Λόγω των a, b, c η τελευταία γίνεται για την περίπτωση όπου η ενδιάμεση ζώνη είναι πολύ λεπτή :

$$2 \cdot k^* = \frac{2 \cdot (k_a \cdot h_a + k_b \cdot h_b)}{h_a + h_b}$$

όπου $h_{a,b}$ μέσο πάχος στρώματος και k_a, k_b όριο διαρροής σε διάτμηση.

Μεταλλογραφικές μελέτες μας δείχνουν ότι η ζώνη μεταφοράς στη διεπιφάνεια είναι πολύ μικρή και σπάνια ξεπερνά τα 100μm, οπότε η εξίσωση (1) απλοποιείται στην:

$$K^* = \frac{(K_a \cdot h_a + K_b \cdot h_b)}{h_a + h_b} \quad (2)$$

Για τον υπολογισμό της δύναμης έλασης F_R στηριζόμαστε στον τροποποιημένο τύπο του Ekelud's

$$F_R = b\bar{Y} \{R' \Delta h\}^{1/2} \left\{ 1 + \frac{1.6\mu \{R' \Delta h\}^{1/2} - 1.2 \Delta h}{h_1 + h_2} \right\}$$

Η ροπή που απαιτείται για να κινηθούν τα ραούλα υπολογίζεται από τη σχέση

$$T_R = 2F_R \cdot a$$

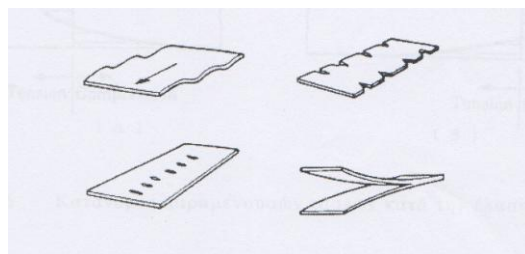
Όπου το επίπεδο του βραχίονα του ραούλου a , δίνεται από το τύπο

$$a = 0.5 \{R' \Delta h\}^{1/2} \frac{\beta}{1 - \beta} \ln \left(\frac{1}{\beta} \right) (b_2/b_m)$$

1.6 Ελαττώματα έλασης

Η επιτυχημένη έλαση απαιτεί την επιλογή και έλεγχο πολλών παραγόντων όπως οι ιδιότητες του υλικού, λειτουργικές παράμετροι της κατεργασίας, ο εξοπλισμός (έλαστρο) και η λίπανση.

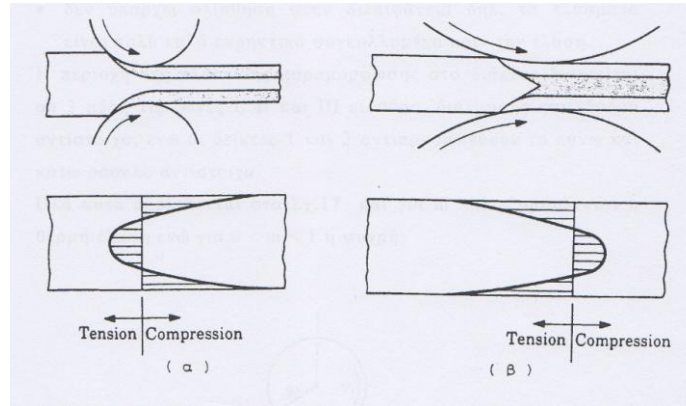
Στην περίπτωση μη σωστού συνδυασμού των παραπάνω παραμέτρων είναι δυνατόν να εμφανιστούν επιφανειακά ή εσωτερικά ελαττώματα βλέπε Σχήμα 4



Σχήμα 4: Ελαττώματα κατά την έλαση

Όσον αφορά τα πεδία των παραμενουσών τάσεων που αναπτύσσονται λόγω της ανομοιογενούς πλαστικής παραμόρφωσης δύο τύποι κατανομών έχουν αναγνωριστεί, βλέπε Σχήμα 5. Ραούλα μικρής διαμέτρου και / ή μικρές μειώσεις πάχους δημιουργούν πλαστική παραμόρφωση συγκεντρωμένη στην επιφάνεια του δοκιμίου και επάγουν θλιπτικές τάσεις στην επιφάνεια και εφελκυστικές στο κέντρο βλέπε σχήμα 5(α).

Αντίθετα, ράουλα μεγάλης διαμέτρου, μικρό πάχος ελάσματος και μεγάλοι λόγοι μείωσης δημιουργούν μεγαλύτερη πλαστική παραμόρφωση στο κέντρο του υλικού, κατάσταση που δημιουργεί εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις στη επιφάνεια και θλιπτικές στο κέντρο, βλέπε σχήμα 5(β) και βιβλιογραφία [22].



Σχ. 5α,5β Κατανομές παραμενουσών τάσεων την έλαση

Ένα από τα προβλήματα που συναντώνται στην έλαση είναι ότι για μειώσεις πάχους μεγαλύτερες του 10% ανά πάσο, οι λωρίδες των δύο υλικών αποχωρίζονται κατά μήκος του οριζόντιου μεσαίου επιπέδου από τη μεριά της εξόδου από το έλαστρο τείνοντας να ακολουθήσουν την καμπυλότητα των ραούλων. Το φαινόμενο λέγεται Κροκοδειλίαση (allegatoring), ενισχύεται δε από τη μειωμένη μεταλλουργικά ποιότητα και αντοχή της διεπιφάνειας. Βεβαίως και μεγάλες μειώσεις πάχους δεν είναι δυνατές αλλά ούτε και επιθυμητές. Σε επόμενα πιθανά πάσα το ελάττωμα αυτό πρέπει να έπεται κατά την είσοδο στο διάκενο των ραούλων.

Άλλη σημαντική παρατήρηση είναι ότι λόγο των διαφορετικών μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών του πολυστρωματικού η επιμήκυνση του ενός υλικού είναι μεγαλύτερη αυτής του άλλου, έχοντας σαν συνέπεια το πολυστρωματικό να καμπυλώνεται με το ένα υλικό στο κυρτό μέρος και το άλλο υλικό στο κοίλο όπως επίσης και παραμόρφωση των άκρων του πολυστρωματικού κατά την έννοια του μήκους. Έτσι αναδίπλωση του υλικού συμβαίνει κατά την έννοια του πάχους, προς το τέλος (ουρά) του πολυστρωματικού ενώ παρόμοιο φαινόμενο παρατηρείται και στην αρχή (υπερκρέμαση).



Σχήμα 6 : Ελαττώματα έλασης

Επίσης παρατηρείται πλευρική διαστολή μειούμενη σε περίπτωση έλασης με λίπανση. Το τελευταίο έχει επιπτώσεις όχι μόνο στη διαστατική ακρίβεια αλλά λόγω της ύπαρξης των δευτερογενών εφελκυστικών τάσεων μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργία ρωγμών στα άκρα ή σκασίματος στο κέντρο, ειδικά σε μέταλλα περιορισμένης ολκιμότητας βλέπε σχέδιο 7.

Επιπλέον οι προαναφερθείσες τάσεις που αναπτύσσονται στα στρώματα κοντά στη διεπιφάνεια ενισχυόμενες από την μη ομογενή παραμόρφωση οδηγούν σε κεντρικές ρωγμές και αποφυλλώσεις βλέπε σχέδιο 8.



Σχήμα 7 : Ελαττώματα έλασης



Σχήμα 8 : Ελαττώματα έλασης

1.7 Η έλαση ως διεργασία δημιουργίας υλικών σάντουιτς

Τα πολυστρωματικά υλικά ή αλλιώς υλικά σάντουιτς που αποτελούνται από μια αλληλουχία στρωμάτων υλικού διαφορετικής φύσεως, χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες λόγω της ποικιλίας των ιδιοτήτων που κατέχουν, όπως η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, υψηλή αντίσταση στη διάβρωση και υψηλή αντοχή. Κατά τη

διάρκεια των τελευταίων τριών δεκαετιών, η παραγωγή σάντουιτς υλικών μέσω της διεργασίας της έλασης, η οποία είναι πιο αποτελεσματική και οικονομική σε σύγκριση με άλλους τύπους διεργασιών, αποτελεί ένα ολοένα και μεγαλύτερης σημασίας αντικείμενο μελέτης.

Η έλαση, η οποία είναι μία εκ των τεχνικών συγκόλλησης για την κατασκευή υλικών σάντουιτς αλλά και επιστρωμένων υλικών, είναι η πιο αποδοτική και οικονομικά συμφέρουσα συγκριτικά με άλλες τεχνικές όπως η εκρηκτική συγκόλληση, συγκόλληση διάχυσης κλπ. Κατά τη διεργασία της έλασης, όπου δύο φύλλα διαφορετικού υλικού ασύνδετα μεταξύ τους περνάνε μέσα από τα ράουλα για να προκύψει μία συγκολλημένη πλάκα σάντουιτς υλικού, η διαστάσεις της νεοπαραχθείσας επιφάνειας και η πίεση επαφής μεταξύ των δύο φύλλων θεωρείται ότι παίζουν σημαντικό ρόλο για την παραγωγή πολυστρωματικών (σάντουιτς) υλικών με καλή συνοχή [1],[2]. Επιπλέον η σχετική ολίσθηση στη διεπιφάνεια μεταξύ των φύλλων θεωρείται επίσης καθοριστικός παράγοντας για την δημιουργία ισχυρών συγκολλητικών δυνάμεων μεταξύ των φύλλων του προϊόντος έλασης[3],[4].

Η έλαση πολυστρωματικών λωρίδων χρησιμοποιείται όχι μόνο για τη δημιουργία ψυχρής συγκόλλησης μεταξύ τους αλλά και για να μειωθεί η δύναμη που εφαρμόζεται κατά τη διαδικασία έλασης ενός πολυστρωματικού (υλικό σάντουιτς), κατά την έλαση μίας σκληρής μεταλλικής στρώσης ανάμεσα σε δύο μαλακές μεταλλικές στρώσεις η δύναμη που απαιτείται να εφαρμοστεί στα ράουλα μειώνεται με αποτέλεσμα να πετυχαίνουμε μεγαλύτερη διαμόρφωση [6].

Κατά την διαμόρφωση ενός πολυστρωματικού υλικού, οι διαφορετικές τάσεις που αναπτύσσονται σε κάθε στρώση τοπικά προκαλούν διακυμάνσεις στο πάχος των προϊόντων, που μπορεί να είναι σε μεγάλο βαθμό διαφορετικά σε αναλογία με το πάχος των πρώτων φύλλων πριν την διεργασία της έλασης. Έτσι ο μηχανισμός πλαστικής παραμόρφωσης κατά τη διεργασία της έλασης ενός πολυστρωματικού υλικού, γίνεται πιο περίπλοκος σε σχέση με ένα μονοστρωματικό υλικό. Λόγω της πολυπλοκότητας του μηχανισμού που προαναφέρθηκε η ανάλυση του μηχανισμού πλαστικής παραμόρφωσης των στρωμάτων γίνεται προσεγγιστικά. Μερικές από τις μελέτες των διαδικασιών παρασκευής πολυστρωματικών υλικών σάντουιτς με έλαση που έχουν παρουσιαστεί αποτελούν πειραματικές εργασίες[5],[6],[7],[8],[9].

Ορισμένες έρευνες έχουν διεξαχθεί για να διερευνηθεί η διεργασία με σκοπό να αντληθούν γνώσεις για την κατασκευή τριμεταλλικών. Οι Vaidyanath et al. [10], ο Park [11], McEwan και Milner [12], Tylecote et al. [13], Mohamed και Washburn [14], Pan et al. [15], Bay [16,17], Zhang και Bay [18-21], προσέφεραν ένα σώμα πειραματικών δεδομένων στη βάση του οποίου έχουν συναχθεί πολλά σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με το μηχανισμό της πίεσης συγκόλλησης κατά τη συγκόλληση με ψυχρή έλαση. Επιπλέον οι Afonja και San περίπου [22], Tzou et al. [23], Hwang και Tzou [24], Hwang et al. [25], Kiuchi et al. [26], και Lin και Hwang [27] οι οποίοι χρησιμοποιούν τη παραδοσιακή μέθοδο λόφου τριβής (slab method), τη μέθοδο κυματικών συναρτήσεων, τη μέθοδο του θεωρήματος του άνω ορίου και θερμοελαστοπλαστικό συνδυαστικό μοντέλο (FEM) αντίστοιχα έχουν προτείνει τα δικά τους αναλυτικά μοντέλα για την εξέταση του μηχανισμού πλαστικής παραμόρφωσης στο διάκενο των ράουλων.

Το θεώρημα του άνω ορίου που προτείνεται από τους Avitzure και Pachla [29], επεκτείνεται για να συμπεριλάβει την ανάλυση της ψυχρής έλασης τριμεταλλικού ελάσματος με ίδιου πάχους μεταλλικές στρώσεις. Για να διαφοροποιήσουν την έρευνά τους σε σχέση με προηγούμενες εργασίες [6,11,12] υπέθεσαν ότι οι στρώσεις δεν είναι συγκολλημένες από πριν και ότι μια σχετική κίνηση έχει δημιουργηθεί ανάμεσα στα στρώματα κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης. Επιπλέον, καθώς η τάση διαρροής του κάθε στρώματος είναι διαφορετική, η μείωση του πάχους της κάθε στρώσης κατά τη διάρκεια της έλασης υποτίθεται ότι είναι διαφορετική. Η ανάλυση είναι σε θέση να προβλέψει τις συνέπειες των διαφόρων παραμέτρων, όπως συνολική σύνθετη μείωση, το πρωταρχικό πάχος κάθε στρώσης και το σταθερό συντελεστή τριβής μεταξύ των ράουλων και των δοκιμίων σε συνάρτηση με ποικιλία παραμέτρων όπως είναι η δύναμη έλασης, η ισχύς έλασης και η μείωση του πάχους της κάθε στρώσης. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν διαφορετικά υλικά, όπως μαλακό χάλυβα, αλουμίνιο και χαλκό για να ελέγξουν την εγκυρότητα των προβλέψεων.

Μεταξύ των αναλυτικών ερευνών έλασης υλικών σάντουιτς, ο Maki [1],[2] χρησιμοποιώντας μία εργαλειομηχανή μεταβλητής ταχύτητας προτείνει μία μέθοδο ψυχρής συγκόλλησης για μεταλλικά φύλλα και αναφέρει ότι η αμοιβαία ολίσθηση μεταξύ των φύλλων έχει θετική συνέπειες στη δύναμη συγκόλλησης. Οι shirota και Dendo [3],[4] χρησιμοποίησαν μία εργαλειομηχανή με πλανητικά γρανάζια για να ερευνήσουν πειραματικά τη συσχέτιση των διαφόρων συνθηκών έλασης όπως είναι η

επιφανειακή επεξεργασία των μετάλλων πριν την έλαση, τη συνολική μείωση και άλλα με την δύναμη συγκόλλησης που αναπτύχθηκε μεταξύ των φύλλων του προϊόντος έλασης.

Κεφάλαιο 2 : Σύνθετα πολυστρωματικά υλικά

2.1 Σύνθετα υλικά

Σύνθετα υλικά ορίζονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην μηχανολογία και γενικότερα στις κατασκευές και αποτελούνται από δύο ή περισσότερα υλικά με διαφορετικές εν γένει φυσικοχημικές ιδιότητες οι οποίες παραμένουν διαχωρισμένες σε μακροσκοπικό επίπεδο. Χαρακτηρίζονται από ανισοτροπία και ιδιαίτερο τρόπο κατασκευής. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα, η ανισοτροπία, δίνει τεράστιες δυνατότητες κατά το σχεδιασμό, έτσι τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές αλλά και σε κατασκευές υψηλής τεχνολογία κυρίως στους τομείς της αεροναυπηγικής και αεροδιαστημικής τεχνολογίας.

Τα πρώτα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν άχυρο και λάσπη συνδυασμένα με τούβλα κατά την κατασκευή κτιρίων, ενώ τα πιο σύγχρονα χρησιμοποιούνται ευρέως στα διαστημικά σκάφη σε αντιμετώπιση δυσμενών συνθηκών. Από τα πιο κοινά σύνθετα υλικά τα οποία συναντούμε καθημερινώς είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα στις κατασκευές κτιρίων και γεφυρών και το fiberglass στην κατασκευή ειδών υγιεινής όπως μπανιέρες.

Όπως προαναφέρθηκε τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα συνιστάμενα υλικά και υπάρχουν δύο κατηγορίες στις οποίες κατατάσσονται αυτά, οι μήτρες και οι ενισχύσεις. Απαιτείται μίξη και από τις δύο κατηγορίες. Το μητρικό υλικό περιβάλλει και συγκρατεί τις ενισχύσεις διατηρώντας τη θέση τους, ενώ οι ίδιες οι ενισχύσεις προσφέρουν τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητές τους προς ενίσχυση της μήτρας. Οι συνεργασία των δύο συνιστωσών προσδίδει στο τελικό υλικό ιδιότητες, οι οποίες παρότι παράγονται από συγκεκριμένα υλικά δεν ταιριάζουν σε κανένα από αυτά. Οι πιο κοινά χρησιμοποιούμενες μήτρες είναι αυτές με την ονομασία ρητίνες. Υπάρχουν βέβαια πολλών ειδών πολυμερή για αυτή τη χρήση και πολλές κατηγορίες στις οποίες αυτά χωρίζονται με πιο κοινά τον πολυεστέρα, το βινύλιο, τον εστέρα, την εποξική ρητίνη, πολυαμίδια, πολυπροπυλένιο, PEEK κ.α. Οι ενισχύσεις είναι συνήθως ίνες αλλά συχνά χρησιμοποιούνται και ορυκτά.

Η μηχανική συμπεριφορά των ενισχυμένων με συνεχείς, μακριές και παράλληλες ίνες συνθέτων, εξαρτάται από την ικανότητα του δεσμού που αναπτύσσεται μεταξύ τους, να μεταφέρει τα εξωτερικά φορτία.

Η καλύτερη, πάντως, εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των ινών γίνεται όταν αυτές είναι τοποθετημένες παράλληλα στη διεύθυνση του επιβαλλόμενου φορτίου. Καθοριστικό ρόλο, τέλος, στην εν γένει συμπεριφορά του συνθέτου παίζει, ασφαλώς, και η διαδικασία παραγωγής του. Τα σύνθετα υλικά μπορούν να χωριστούν σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το κριτήριο που χρησιμοποιείται. Έτσι, αν το είδος της ενίσχυσης είναι το κριτήριο διαχωρισμού, τότε είναι δυνατόν να διακρίνουμε τα παρακάτω είδη.

Συγκεκριμένα, υπάρχουν σύνθετα με:

- Μακριές - συνεχείς ίνες μέσα στη μήτρα οι οποίες μπορεί να είναι παράλληλες - προσανατολισμένες ή τυχαίου προσανατολισμού.
- Μικρού μήκους ίνες και πάλι προσανατολισμένες ή τυχαία διασκορπισμένες μέσα στη μήτρα.
- Κόκκους όπως σφαιρίδια, επίπεδα, ελλειψοειδή, κενά κ.α.
- Διασπορές που είναι σαν τους κόκκους αλλά έχουν διάμετρο μικρότερη των 10^{-8} m.
- Στρωματώδεις δομές.
- Αλληλοδιαδεχόμενα δίκτυα.
- Πολλές φάσεις, δηλαδή μια μήτρα και εγκλείσματα περισσοτέρων του ενός είδους.

Αν όμως χρησιμοποιηθεί ως διαχωρισμού το υλικό της μήτρας, τότε έχουμε τα εξής είδη συνθέτων:

- Πολυμερικής Μήτρας
- Μεταλλικής Μήτρας
- Κεραμικής Μήτρας

Οι ιδιότητες και η δομή τόσο της ενίσχυσης όσο και της μήτρας αποτελούν τις κύριες συνιστώσες ενός σύνθετου υλικού. Τα σύνθετα υλικά πρέπει συνήθως να

μορφοποιηθούν εξ αρχής στο τελικό σχήμα. Το μητρικό υλικό μπορεί να διοχετευθεί στο καλούπι πριν ή μετά την τοποθέτηση των ενισχύσεων, ενώ η διαδικασία που ακολουθεί τη χύτευση διαφέρει από υλικό σε υλικό (πολυμερισμός, απλή στερεοποίηση κ.α.). Γενικά η μεθοδολογία κατασκευής των σύνθετων υλικών διαφέρει ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη μήτρα και ενισχύσεις, σημαντικό ρόλο παίζει ακόμα και η απαιτούμενη ποσότητα υλικού που θα κατασκευαστεί, καθώς και η αναλογία βαρών μήτρας-ενίσχυσης. Στόχος συνήθως, είναι η αύξηση του ποσοστού των ενισχύσεων στο τελικό υλικό. Έτσι υπάρχουν μέθοδοι που παράγουν αναλογία 60-40% (μητρικό υλικό-ενίσχυση), όπως η κοινή επιστρωμάτωση και άλλες που παράγουν τελικό προϊόν με αναλογία 40-60% όπως η έκχυση σε περιβάλλον κενού.

Γενικά οι ενισχύσεις και το μητρικό υλικό συνδυάζονται, επεξεργάζονται και υποβάλλονται στη διαδικασία μορφοποίησης (melding event), μετά την οποία το τεμάχιο έχει το τελικό του σχήμα. Για μια θερμοσκληραινόμενη πολυμερική ρητίνη η διαδικασία συσσωμάτωσης είναι μια αντίδραση η οποία ξεκινά με την πρόσδοση θερμότητας ή χημικού αντιδραστήριου όπως ένα οργανικό υπεροξείδιο. Για μία θερμοπλαστική πολυμερική μήτρα η διαδικασία συσσωμάτωσης είναι απλή στερεοποίηση. Για μία μεταλλική μήτρα η συσσωμάτωση γίνεται σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες κοντά στο σημείο τήξης. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι μορφοποίησης σύνθετων υλικών, όπως η μορφοποίηση σε περιβάλλον κενού, η μορφοποίηση υπό πίεση ή η μορφοποίηση σε αποστειρωμένο περιβάλλον κ.α., η ανάλυση των οποίων δεν είναι του παρόντος.

Ιδιότητες σύνθετων υλικών

Οι φυσικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών δεν είναι ισοτροπικές (εξαρτώνται από την διεύθυνση της εφαρμοζόμενης τάσης). Για παράδειγμα, η ακαμψία ενός σύνθετου πάνελ εξαρτάται από τον προσανατολισμό της εφαρμοζόμενης δύναμης καθώς επίσης και από τον σχεδιασμό του (χρησιμοποιούμενα υλικά μήτρας και ενισχύσεων, μέθοδος μορφοποίησης, αναλογία βαρών προσμίξεων κ.α.).

Η εξισώσεις που συσχετίζουν δυνάμεις-παραμορφώσεις για ένα ισοτροπικό υλικό μπορούν να περιγραφούν με τις παρακάτω μηχανικές ιδιότητες: Μέτρο του Young, λόγος Poisson, UTS με αρκετή ακρίβεια. Ενώ για ένα ανισότροπο υλικό θα χρειαζόντουσαν εξισώσεις τουλάχιστον δεύτερης τάξης και το λιγότερο είκοσι παραμέτρους περιγραφής

του υλικού. Για παράδειγμα, στα ορθογωνικά ισότροπα υλικά χρειάζονται τρεις διαφορετικές τιμές των παραπάνω παραμέτρων, μία σε κάθε διεύθυνση.

Οι ρητίνες

Τα πιο κοινά σύνθετα υλικά όπως το fiberglass, το carbon fiber και το Kevlar συμπεριλαμβάνουν τουλάχιστον δύο υλικά, το υπόστρωμα και τη ρητίνη. Οι πολυεστερικές ρητίνες έχουν κίτρινη απόχρωση και χαμηλή αντοχή. Η ευαισθησία της στις ακτίνες UV που μπορεί να την αλλοιώσουν με την υπερβολική έκθεση, την καθιστούν ένα υλικό καθημερινής χρήσης, περιορισμένων προδιαγραφών. Οι ρητίνες από βινυλεστέρα έχουν συνήθως πρασινωπή απόχρωση, έχουν μικρότερη πυκνότητα από την πολυεστερική ρητίνη, μεγαλύτερο χρόνο αποικοδόμησης και αλλοίωσης και μεγαλύτερη ευλυγισία. Θεωρείται πως έχουν αντοχή στην επαφή με καύσιμα. Παρόλα αυτά λιώνουν στην επαφή με βενζίνη. Οι εποξικές ρητίνες είναι σχεδόν διάφανες στο χρώμα και χρησιμοποιούνται ευρέως στην αεροδιαστημική βιομηχανία ως δομικό μητρικό υλικό ή σαν απλή κόλλα.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρούμαι μεγάλη εξάπλωση στη χρήση σύνθετων υλικών στις κατασκευές και τάση αντικατάστασης των κλασικών μεταλλικών υλικών εξαιτίας των πολύ καλών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν τα πρώτα (αντοχή προς βάρος, αντίσταση στη διάβρωση, στις ακραίες θεοκρασίες κ.α.). Ως παράδειγμα αναφέρεται η χρήση τους στην αεροναυπηγική όπου η ανάγκη για προηγμένα ελαφρά και ανθεκτικά υλικά υπογράφει την εξέλιξη αυτή. Στο σχήμα 9 φαίνονται τα μέρη της ατράκτου και των πτερυγίων ενός πολιτικού όπου υπάρχουν δομικά στοιχεία από σύνθετα υλικά.



Σχήμα 9: Μέρη της ατράκτου και των πτερυγίων ενός πολιτικού όπου υπάρχουν δομικά στοιχεία από σύνθετα υλικά (Hexcel Composites).

Ένα από τα τεχνολογικά προβλήματα που αντιμετωπίζονται εκτενώς ερευνητικά σήμερα είναι οι μηχανικές συνδέσεις δομικών στοιχείων από σύνθετα υλικά όπου αποτελούν το συνήθη τρόπο σύνδεσης αεροπορικών υλικών καθώς και επιθεμάτων όπου έχει ανιχνευθεί βλάβη. Στο Σχ.9 φαίνονται τα μέρη της επιδερμίδας, στην αριστερή πλευρά του κάθετου σταθεροποιητή, του αεροσκάφους Airbus A330, όπου έχουν τοποθετηθεί επιθέματα σύνθετων υλικών, χρησιμοποιώντας μηχανικές συνδέσεις (ηλώσεις).

2.2 Υλικά Σάντουιτς

Ο δομικός σχεδιασμός σάντουιτς περιλαμβάνει συνδυασμό δύο λεπτών και άκαμπτων επιφανειών με ένα σκληρό και σχετικό αδύναμο πυρήνα. Με την ενσωμάτωση του πυρήνα μεταξύ των δύο επιφανειών και την ολοκληρωτική συγκόλλησή τους σχηματίζεται μια δομή ανώτερης αντοχής σε κάμψη και χαμηλότερου βάρους. Δεδομένου ότι ο πυρήνας συχνά έχει εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητες, ολόκληρη η δομή σάντουιτς θα χαρακτηρίζεται από εξαιρετικές θερμομονωτικές ιδιότητες αλλά και ακουστική απόσβεση σε ορισμένες συχνότητες . Οι εξωτερικές επιφάνειες που χρησιμοποιούνται συχνότερα περιλαμβάνουν λαμαρίνα και ενισχυμένες με ίνες πολυμερή. Ενώ κοινά υλικά για τον πυρήνα είναι το ξύλο balsa, κηρήθρα, και εξυλασμένο πολυμερή αφρό. Αυτά τα υλικά και οι συνδυασμοί τους έχουν το δικό τους μερίδιο στην αγορά και διαθέτουν ένα ή περισσότερα πλεονεκτήματα όπως το χαμηλό κόστος ,τις υψηλές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες , θερμική και ακουστική μόνωση, επιβραδυντικές ιδιότητες στην φωτιά, συμμορφώνονται με τα πρότυπα χαμηλών εκπομπών ρύπων, ευκολία κατεργασίας, ευκολία διαμόρφωσης , κλπ. Η έννοια σάντουιτς χρησιμοποιείται σε μια εντυπωσιακή ποικιλία εφαρμογών και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των στοιχείων τείνουν να είναι λίγες και συνήθως περιλαμβάνουν σε μεγάλο βαθμό την χρήση χειρονακτικής εργασίας. Στην εργασία αυτή περιγράφεται και αναλύεται μία από τις πιο κοινές τεχνικές κατασκευής υλικών σάντουιτς (έλαση).

Υλικά Όψεων

Τα υλικά των εξωτερικών επιφανειών που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές σάντουιτς μπορούν να χωριστούν σε ενισχυμένα με ίνες πολυμερών σύνθετων υλικών και άλλων υλικών. Τα πολυμερή σύνθετα υλικά έχουν μοναδικές ιδιότητες σαν υλικά εξωτερικών επιφανειών κάτω από ορισμένες συνθήκες και μπορούν να ενσωματωθούν απευθείας στον πυρήνα. Εναλλακτικά και ανεξάρτητα από τον τύπο του υλικού οι εξωτερικές επιφάνειες των υλικών σάντουιτς μπορεί να κατασκευαστούν σε ένα βήμα και στη συνέχεια να επικολληθούν στον πυρήνα σε ένα άλλο βήμα σε μεταγενέστερο χρονικό σημείο. Όσο αφορά τα ενισχυμένα με ίνες πολυμερών υλικά όλα τα συστατικά που συνήθως χρησιμοποιούνται σε σύνθετες εφαρμογές χρησιμοποιούνται επίσης σαν υλικά εξωτερικών επιφανειών στις δομές σάντουιτς. Έτσι οι ενισχύσεις περιλαμβάνουν όλα τα είδη από γυαλί, άνθρακα και αραμίδιο. Ομοίως σχεδόν όλα τα είδη θερμοσκληρυντικών και θερμοπλαστικών ρητινών χρησιμοποιούνται.

Προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση ή για να αποκτηθεί κάποιο κατασκευαστικό πλεονέκτημα χρησιμοποιούνται προ-εμποτισμένες μονής κατεύθυνσης ή πλεγμένες ενισχύσεις. Τα προ-εμποτίσματα αποτελούνται συνήθως από γυαλί ή άνθρακα ενισχυμένο με ίνες εποξικό. Όταν οι σύνθετες εξωτερικές επιφάνειες συνενώνονται κατευθείαν στον πυρήνα, στις θαλάσσιες μεταφορές και εφαρμογές, τότε η ενίσχυση με γυαλί γίνεται με την μορφή πιλημάτων (CSM), υφάσματα και συνδυασμούς τους κυρίως, ενώ οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες εφαρμογές είναι συνήθως ακόρεστοι πολυεστέρες (UP) και μερικές φορές εστέρες βινυλίου (VE). Στο τομέα της αεροναυπηγικής η σύνθεση των υλικών σάντουιτς γίνεται με χρήση προ-εμποτισμάτων εποξικών ενισχυμένων με ίνες άνθρακα. Ωστόσο και οι πιο προηγμένες θαλάσσιες και μεταφορικές εφαρμογές τείνουν να χρησιμοποιούν διάφορα είδη προ-εμποτισμάτων σε αυξανόμενο βαθμό. Φυσικά, όλοι οι τύποι των σύνθετων εξωτερικών επιφανειών μπορεί να είναι προκατασκευασμένοι με οποιαδήποτε συμβατική κατασκευαστική διαδικασία που σημαίνει ότι κανένας συνδυασμός υλικού δεν αποκλείεται στο να χρησιμοποιηθεί ως υλικό εξωτερικών επιφανειών σάντουιτς.

Επιπρόσθετα πέρα από τις προαναφερθείσες μορφές υλικών οι εξωτερικές επιφάνειες μπορούν εύκολα να προκατασκευαστούν χρησιμοποιώντας χύτευση μειγμάτων σε διαμόρφωση με πρεσάρισμα. Αυτά τα μείγματα περιλαμβάνουν την

χύτευση σε στρώσεις (SMC) χύμα μείγματα χύτευσης (BMC) και ενισχυμένο θερμοπλαστικό και ενισχυμένα θερμοπλαστικά με γυαλί (GMT). Η (SMC) και (BMC) βασίζονται σε θερμοσκληραινόμενα μείγματα, συνήθως (UP), ενώ η (GMT) σε θερμοπλαστικά μείγματα, συνήθως πολυπροπυλένιο (PP). Στις περισσότερες περιπτώσεις όλα αυτά τα μείγματα χύτευσης ενισχύονται με ασυνεχείς και τυχαία προσανατολισμένες ίνες γυαλιού. Τα μη σύνθετα υλικά εξωτερικών επιφανειών κατασκευάζονται σε ένα βήμα και συνδέονται με τον πυρήνα σε ένα άλλο. Κοινά παραδείγματα περιλαμβάνουν καπλαμά, λαμαρίνα και μη ενισχυμένα πολυμερή, αν και τα τελευταία σπάνια αποτελούν μια ικανή δομή ως συστατικά του σάντουιτς. Το πιο κοινό υλικό εξωτερικών επιφανειών σε αυτή την κατηγορία με μεγάλη διαφορά είναι τα μεταλλικά φύλλα το οποίο προσφέρει καλές ιδιότητες σε λογικό κόστος με ένα μειονέκτημα βάρους. Οι εφαρμογές του περιλαμβάνουν τα ψυγεία μεταφοράς στις θαλάσσιες μεταφορές και κατασκευαστικά στοιχεία.

Υλικά πυρήνα

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται ως πυρήνας σε ένα υλικό σάντουιτς είναι το ξύλο balsa αν και εναλλακτικά υλικά πυρήνα τείνουν να αντικαταστήσουν το ξύλο balsa σε ένα αυξανόμενο αριθμό εφαρμογών. Τα πιο συνηθισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται ως πυρήνας σε όλες τις εφαρμογές εκτός της αεροδιαστημικής είναι επεκτεινόμενοι πολυμερής αφροί οι οποίοι συχνά έχουν μεγάλη ανεκτικότητα στις υψηλές θερμοκρασίες γι αυτό χρησιμοποιούνται επίσης θερμοπλαστικοί αφροί.

Σχεδόν κάθε πολυμερές μπορεί να επεκταθεί αλλά τα πιο κοινά σε εφαρμογές σάντουιτς είναι οι πολουρεθάνες (PUR), πολυστυρένια (PS), πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), πολυμεθακρυλαμύδιο (PMI), πολυαιθεραμίδιο (PEI) και πολυφαινολικά (PF). Η PUR μπορεί να γίνει αφρώδης ανάμεσα σε εξωτερικές επιφάνειες και γι αυτό δεν χρειάζεται να προκατασκευαστεί σε όγκους. Η επιτόπια δημιουργία αυτού εξαλείφει την ανάγκη σχηματισμού αφρού από κάποια σύνθετη μηχανή. Αν και μερικοί υψηλής απόδοσης πυρήνες όπως ο (PMI) και ο (PEI) χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αεροδιαστημικής, οι δομές πυρήνα της κηρήθρας κυριαρχούν σε σχέση με εναλλακτικά υλικά. Πολλά διαφορετικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή πυρήνα και κηρήθρας : φύλλα μετάλλου ενισχυμένα με ίνες πολυμερή, μη ενισχυμένα

πολυμερή και χαρτιά. Οι πιο συνηθισμένοι πυρήνες κηρήθρας βασίζονται σε αλουμίνιο και αραμιδικές ίνες χαρτιού βουτηγμένα σε φαινολική ρητίνη, το τελευταίο με την εμπορική επωνυμία (NOMEX)

2.3 Εφαρμογές υλικών σάντουιτς



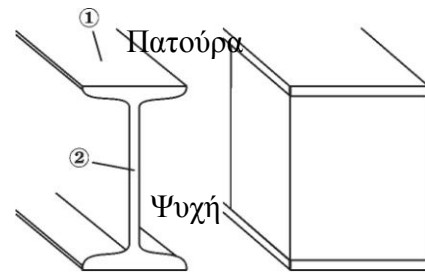
Ως δομικά στοιχεία

Οι πολυστρωματικές δομές χρησιμοποιούνται σε μία ευρεία ποικιλία εφαρμογών όπως στα αυτοκίνητα, στα εμπορευματοκιβώτια των πλοίων, στα σκάφη αναψυχής και εμπορικά σκάφη, αεροσκάφη, δομικά πάνελα, κλπ. Με την εξέλιξη της τεχνογνωσίας και της τεχνολογίας δημιουργήθηκαν τα σύνθετα πάνελα τύπου σάντουιτς, που αποτελούνται από ποικιλία υλικών και χρησιμοποιούνται σε αναρίθμητες εφαρμογές.

Τα σύνθετα πάνελα (τύπου σάντουιτς) που χρησιμοποιούνται ως δομικά στοιχεία σε οποιαδήποτε εφαρμογή, είναι μια ειδική κατασκευή που γίνεται από συγκόλληση φύλλων διαφορετικών υλικών. Η συγκόλληση του ενός υλικού με το άλλο, δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν οι ιδιότητες του κάθε συστατικού, από το οποίο αποτελείται το πάνελο, ξεχωριστά, με αποτέλεσμα μέγιστα κατασκευαστικά και μηχανικά πλεονεκτήματα.

Ο αρχικός σχεδιασμός του σύνθετου πάνελου βασίζεται στους πλακοδοκούς με διατομή σχήματος I που είναι ένα αποτελεσματικό δομικό σχήμα, γιατί τοποθετείται όσο το δυνατόν περισσότερο υλικό στις πατούρες, οι οποίες βρίσκονται όσο πιο μακριά γίνεται από το κέντρο της κάμψης ή τον ουδέτερο άξονα. Αρκετό υλικό μένει μόνο στην συνδετική “ψυχή” του δοκού για τον συντονισμό της λειτουργίας της πατούρας και την αντίσταση στις διατμητικές τάσεις και τα φορτία λυγισμού.

Στο σύνθετο πάνελ, οι εξωτερικές επιφάνειες (το περίβλημα) παίζουν τον ρόλο της πατούρας και ο πυρήνας παίρνει την θέση της “ψυχής” του δοκού. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός, ότι ο πυρήνας ενός σάντουιτς είναι από διαφορετικό υλικό ,από τις εξωτερικές επιφάνειες και “ξεδιπλώνεται” ως ένα συνεχόμενο στήριγμα για τις εξωτερικές επιφάνειες, χωρίς να είναι συγκεντρωμένο σε στενή παρειά όπως στον δοκό.



Σχήμα 10

Η βασική αρχή του πάνελ βασίζεται στην πλακοδοκό του σχήματος 10. Τα εξωτερικά φύλλα δρουν μαζί για να σχηματίσουν ένα αποτελεσματικό ζεύγος εφαρμοσμένων τάσεων ή ροπών αντίστασης εξουδετερώνοντας τις ροπές κάμψης. Ο πυρήνας αντιστέκεται στην διατμητική τάση και σταθεροποιεί τις εξωτερικές επιφάνειες έναντι των κάμψεων και της ρυτίδωσης. Η κόλλα που ενώνει τα φύλλα με τον πυρήνα είναι κρίσιμης σπουδαιότητας.

Το αρχικό πλεονέκτημα ενός σύνθετου πάνελ είναι ο πολύ υψηλός λόγος ακαμψίας - βάρους και υψηλός λόγος αντίστασης καμπτικής καταπόνησης / βάρους. Το σάντουιτς ενισχύει την αντοχή στην κάμψη της δομής χωρίς την προσθήκη ουσιαστικού βάρους.

Τα σάντουιτς πάνελ έχουν δείξει σε πολλές εφαρμογές τις ιδιότητές τους ως προς την αντοχή στην καταπόνηση, ηχομόνωση και πρόσθετη θερμομόνωση. Η απορρόφηση ενέργειας μπορεί σε μερικούς τρόπους παραμόρφωσης να πολλαπλασιαστεί έναντι μονοσύστατων υλικών λόγω των περιορισμένων κατά κάποιο τρόπο, επιβαλλόμενων κυμάτων παραμόρφωσης. Η χρήση κυψελοειδών πυρήνων προλαμβάνει την ανάγκη ενίσχυσης θερμικής μόνωσης, εξασφαλίζοντας χαμηλό δομικό βάρος, δεδομένου ότι οι περισσότεροι κυψελοειδείς πυρήνες έχουν μια χαμηλή θερμική αγωγιμότητα.

Ένα ακόμη από τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα σύνθετα πάνελς τύπου σάντουιτς, είναι η μείωση του κόστους λόγω του χαμηλού βάρους και της μείωσης των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με την αποδοτική σχετικά με το κόστος, παραγωγική διαδικασία βλέπε Πιν.1 και εικόνες 4(α),4(β).

	Υλικό	Συντελεστής ελαστικότητας E (GPa)	Πυκνότητα υλικού ρ (kg/dm ³)	Κόστος υλικού που εξοικονομείται σε βάρος (€/kg)	Κόστος του υλικού κατασκευής των πάνελ ανά όγκο (€/dm ³)	Κόστος του υλικού που εξοικονομείται με 2€/kg σε όγκο (€/dm ³)	Συνολικό κόστος (€/dm ³)
εξωτερική επιφάνεια (δέρμα)	Χάλυβας	210	7,8	0,6	4,68	15,60	20,28
	Αλουμίνιο	72	2,7	2,0	5,40	5,40	10,80
	Ενισχυμένο με υαλόνημα πλαστικό	20	1,7	3,3	5,61	3,40	9,01
	Ενισχυμένο με φυσικές ίνες πλαστικό	6	1,0	1,1	1,10	2,20	3,30
πυρήνας	Πολυπροπυλαίνιο	1,2	0,9	1,0	0,90	1,80	2,70
	Ξύλο από μπάλσα	0,15	0,15	10,0	1,50	0,30	1,80
	Κυψελωτό πολυπροπυλαίνιο	0,03	0,08	4,0	0,32	0,16	0,48
	Κυψελωτό χαρτί	0,02	0,08	2,0	0,16	0,16	0,32

Πίνακας 1: Ιδιότητες και ενδεικτικό κόστος υλικών



Εικόνα 4(α),4(β): Εμπορικό προϊόν που χρησιμοποιείται εκτεταμένα για την επικάλυψη εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειών κτιρίων και παράδειγμα εφαρμογής του στη πρόσοψη παλαιού κτιρίου

Τα υλικά σάντουιτς στις αεροπορικές κατασκευές



Η σχεδίαση και κατασκευή της πτητικής μηχανής προϋποθέτει την λύση σειράς προβλημάτων στους τομείς της αεροδυναμικής, της μηχανικής πτήσης, της δομικής ανάλυσης, των συστημάτων, κτλ., αλλά πάνω απ' όλα της επιλογής των κατάλληλων

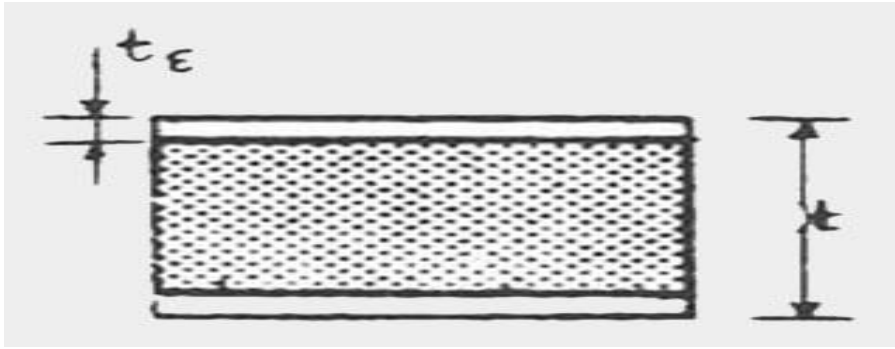
υλικών των οποίων η αξιοπιστία και η αναλογία αντοχής προς βάρος τα καθιστά ικανά να χαρακτηριστούν ως αεροπορικά υλικά και επομένως να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή της πτητικής μηχανής.

Τα μεταλλικά υλικά, όπως τα κράματα του αλουμινίου, μαγνησίου, τιτανίου και τελευταία του αλουμινίου - λιθίου, είναι εκείνα των οποίων τα τεχνικά χαρακτηριστικά συνετέλεσαν στη καθιέρωση τους ως κύρια αεροπορικά δομικά υλικά και βάσει αυτών να κατασκευαστεί το πλήθος σε αριθμό και μορφή αεροναυπηγικών προϊόντων.

Είναι όμως βέβαιο ότι η καθιέρωση αυτών των ελαφρών μεταλλικών κραμάτων, δεν μπόρεσε ποτέ να σταματήσει την έρευνα για ανεύρεση υλικών με τεχνικά χαρακτηριστικά ακόμα καλύτερα καθώς και κατασκευαστικών μεθόδων που θα επέτρεπαν την τόσο αναγκαία εξοικονόμηση βάρους στην αεροπορική κατασκευή.

Σε αυτή την έρευνα των υλικών, η χημεία έκανε μεγαλύτερα βήματα από ότι η μεταλλουργία, παρουσιάζοντας ένα πλήθος προϊόντων τα οποία αρχίζουν από τις ειδικές αεροπορικές κόλλες, τις εποξειδικές ρητίνες, τα υαλονήματα, τα ανθρακονήματα, τις πολυουρεθάνες, τις πολυστερίνες, τα θερμοπλαστικά και καταλήγουν στα ειδικά κεραμικά υλικά. Με τον κατάλληλο συνδυασμό ορισμένων εξ' αυτών των υλικών είναι δυνατόν να αποκτηθεί ένα "σύνθετο υλικό" το οποίο θα έχει τεχνικά χαρακτηριστικά όπως, αντοχή στα στατικά ή δυναμικά φορτία, ανθεκτικότητα στη διάβρωση και στις καιρικές συνθήκες, θερμική αγωγιμότητα, ακουστική μόνωση, ειδικό βάρος, μέτρο ελαστικότητας κτλ., πολύ καλύτερα από εκείνα των μεμονωμένων υλικών που το συνθέτουν. Τα συνηθέστερα σύνθετα υλικά είναι τα διάφορα υφάσματα ή νήματα εμποτισμένα με ρητίνες και τα στρωματοειδή (σάντουιτς) τα οποία θα περιγραφούν στη συνέχεια.

Ειδικότερα τα στρωματοειδή υλικά αποκτώνται με κατάλληλο μηχανικό συνδυασμό εντελώς διαφορετικών υλικών. Ο γνωστότερος και επικρατέστερος μηχανικός συνδυασμός είναι εκείνος βάση του οποίου αποκτώνται σύνθετα υλικά υπό τη μορφή στρωμάτων.



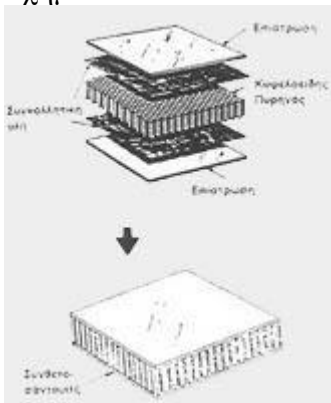
Σχήμα 11. Σχηματική παράσταση σύνθετου – σάντουιτς
 t : πάχος σάντουιτς, t_e : πάχος επίστρωσης.

Πάχος	t	$2t$	$4t$
Ακαμψία	1,0	7,0	37,0
Αντοχή	1,0	3,5	9,2
Βάρος	1,0	1,03	1,06

Με αναφορά στο Σχήμα 11, συγκριτικός πίνακας όπου φαίνεται η επίδραση του πάχους t του σάντουιτς, ήτοι του πυρήνα, στα μηχανικά χαρακτηριστικά. Ας παρατηρηθεί η αντίστοιχη πολύ μικρή αύξηση του βάρους.

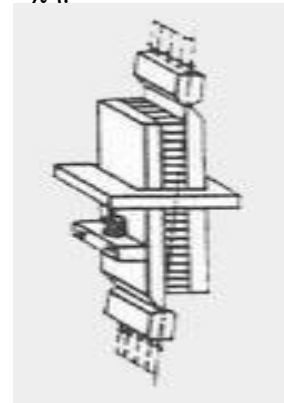
Αυτά τα υλικά συνίστανται από ένα πυρήνα και τις επιστρώσεις των δύο κύριων επιφανειών του. Ο πυρήνας είναι από ελαφρό υλικό που κύριο σκοπό έχει τη μεταφορά των διατμητικών τάσεων μεταξύ των δύο επιστρώσεων, οι οποίες με τη σειρά τους είναι από ισχυρότερο υλικό ανθεκτικό στις τάσεις εφελκυσμού και θλίψης εφαρμοσμένες στο επίπεδο τους. Οι επιστρώσεις είναι κολλημένες στις κύριες επιφάνειες του πυρήνα με κατάλληλο τρόπο που εξαρτάται από τον τύπο του πολυστρωματικού.

Σχήμα 12



Σχήμα 12. Κατασκευή σύνθετου - σάντουιτς με κυψελοειδή πυρήνα.

Σχήμα 13



Σχήμα 13. Δοκιμή αντοχής σε διάτμηση του κυψελοειδή πυρήνα.

Το υλικό και το πάχος των επιστρώσεων, το υλικό του πυρήνα, το πάχος του πυρήνα, δηλ. η απόσταση μεταξύ των δύο επιστρώσεων και το επικολλητικό μέσο, επιστρώσεων - πυρήνα, είναι οι παράμετροι που καθορίζουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σύνθετου αυτού.

Εάν η επικόλληση δεν είναι ιδανική, τότε υπάρχει περίπτωση να παύση η συνεργασία των επί μέρους υλικών και επομένως να απολεσθούν τα αναμενόμενα μηχανικά χαρακτηριστικά του σύνθετου στρωματοειδούς. Σκοπός της επικόλλησης είναι να μην επιτρέπει σχετικές κινήσεις μεταξύ επιστρώσεων και πυρήνα καθώς και την παρεμπόδιση δημιουργίας ρυτιδώσεων στην επίστρωση κατά την εφαρμογή θλιπτικού φορτίου.

Οι επιστρώσεις γενικώς είναι πολύ λεπτές επιφάνειες (μεταλλικού ελάσματος, κοντραπλακέ, υαλοϋφάσματος κτλ.) και φυσικό είναι να παρουσιάζουν εξαιρετικά χαμηλή αντοχή σε όλα τα φορτία που δεν εφαρμόζονται στο επίπεδο τους και υψηλή αντοχή στα φορτία που εφαρμόζονται στο επίπεδο τους. Ένα απλό παράδειγμα για την κατανόηση της διαφοράς αυτής στην αντοχή, γίνεται μέσω ενός φύλλου χαρτιού το οποίο παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση τραβώντας το από τις απέναντι πλευρές του, και έχει μηδέν αντοχή σε φορτία κάθετα προς την επιφάνεια του. Όλα τα άλλα φορτία που δημιουργούνται και δεν ευρίσκονται στο επίπεδο των επιστρώσεων, πρέπει να αντιμετωπίζονται από τον πυρήνα.

Επομένως, ο συνδυασμός του πυρήνα και των επιστρώσεων προς σχηματισμό του σύνθετου πολυστρωματικού υλικού έχει τα ακόλουθα θετικά αποτελέσματα, α) Τα φορτία μεταφέρονται στο επίπεδο των επιστρώσεων, β) οι επιστρώσεις συγκρατούνται από τον πυρήνα ώστε τοπικά τουλάχιστον να παραμένουν επίπεδες, γ) η απόσταση μεταξύ των επιστρώσεων παραμένει σταθερή και δ) παρεμποδίζεται η δημιουργία κυματώσεων ή ρυτιδώσεων ένεκα θλιπτικών φορτίων στις επιστρώσεις, που γενικά είναι πολύ λεπτά ελάσματα.

Έτσι αποκτάται ένα υλικό στο οποίο γίνεται πλήρης εκμετάλλευση των μηχανικών χαρακτηριστικών του πυρήνα και των επιστρώσεων. Στην περίπτωση που το φορτίο εφαρμόζεται συγκεντρωμένο "τοπικά", επί παραδείγματι μέσω κοχλιώσεων, τότε ο πυρήνας θα πρέπει να είναι τοπικά ενισχυμένος με ισχυρότερο υλικό από αυτόν, το οποίο θα αντέξει στη σύνθλιψη της κοχλιώσης. Συνήθως ο πυρήνας ενισχύεται τοπικά με έκχυση εποξειδικής κόλλας, ή με την εγκατάσταση χιτωνίου κατάλληλου για το φορτίο

της κοχλίωσης. Κατά παρόμοιο τρόπο πρέπει να αντιμετωπίζεται και η περίπτωση των ηλώσεων οι οποίες διαφορετικά δεν επιτρέπεται να εκτελούνται επί των λεπτών επιστρώσεων. Παραδείγματα σύνθετων στρωματοειδών υλικών δίδονται στον Πίνακα 2.

Πυρήνας	Επιστρώσεις	Υλικό συγκόλ.
Πολυουρεθάνη	Υαλοϋφασμα	Εποξειδική
Πολυστ. Foam		
>>	Κόντρα-πλακέ	>>
>>	Έλασμα αλουμ.	-
Εύλο μπάλσα	Κόντρα-πλακέ	-
>>	Έλασμα αλουμ.	-
>>	Υαλοϋφασμα	-
Κυψελ. αλουμ.	Έλασμα αλουμ.	-
>>	Υαλοϋφασμα	-
Κυψ. χάρ. Kraft	Έλασμα αλουμ.	-
>>	Υαλοϋφασμα	-
>>	Χάρτης Kraft	-
Χάρτου Nomex	Υαλοϋφασμα	-

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Συνδυασμοί υλικών, πυρήνα και επιστρώσεων στα σύνθετα-στρωματοειδή για αεροπορικές εφαρμογές.

Σύνηθες πολυστρωματικό αεροπορικό υλικό είναι το σύνθετο με πυρήνα από λεπτό έλασμα αλουμινίου (π.χ. AL 5056-H39) με κυψελοειδή διαμόρφωση και επιστρώσεις από έλασμα αλουμινίου. Αυτός ο τύπος του σύνθετου χρησιμοποιείται για την κατασκευή δαπέδων αεροσκαφών, για την κατασκευή των πτερυγίων του στροφίου ελικοπτέρων, για επικαλύψεις της ατράκτου, της πτέρυγας ή του ουραίου πτερώματος, καθώς επίσης για τοπικές ενισχύσεις της επικάλυψης σε θυρίδες ή άλλες περιοχές όπου απαιτείται αυξημένη ακαμψία. Επίσης, σύνθετα με κυψελοειδή πυρήνα χάρτου Kraft ή άλλου παρόμοιου χάρτου και επίστρωση υαλοϋφάσματος πάχους 0.25 χλσ, χρησιμοποιούνται συχνά στις εσωτερικές επενδύσεις, τοιχώματα και οροφές, των επιβατικών αεροσκαφών.

Η κατασκευή του κυψελοειδή πυρήνα γίνεται με τις ακόλουθες δύο μεθόδους.

α) Με τη μέθοδο της ανάπτυξης, ή του τεντώματος, όπου προβλέπεται η επάλειψη με κόλλα κατά λωρίδες των λεπτών μεταλλικών (ή μη μεταλλικών) ελασμάτων, τα οποία κομμένα στις επιθυμητές διαστάσεις τοποθετούνται το ένα επάνω στο άλλο ώστε να κολλήσουν κατά μήκος των λωρίδων και κατόπιν αφού κοπούν στο συγκεκριμένο πάχος τεντώνονται όπως το ακορντεόν, έτσι ώστε να σχηματισθεί ο κυψελοειδής πυρήνας.

Με αυτή τη μέθοδο κατασκευάζονται κυψελοειδείς πυρήνες με ειδικό βάρος από 30 χλγ/μ³ που είναι αρκετά χαμηλή τιμή έως και 190 χλγ/μ³ που είναι σχετικά μέτρια τιμή.

β) Η δεύτερη μέθοδος κατασκευής κυψελοειδή πυρήνα, ονομάζεται μέθοδος της ρυτίδωσης και συνίσταται στη διέλευση του ελάσματος μέσω οδοντωτών κυλίνδρων οι οποίοι του προσδίδουν ρυτιδωτή ή κυματοειδή μορφή, το οποίο αφού κοπεί στο επιθυμητό μήκος τοποθετείται προς κόλληση σε μπλοκ ρυτιδωμένων ελασμάτων απ' όπου αποκτάται ο κυψελοειδής πυρήνας. Με τη μέθοδο της ρυτίδωσης κατασκευάζονται κυψελοειδείς πυρήνες με ειδικό βάρος από 130 χλγ/μ³ έως και 880 χλγ/μ³, εφ' όσον υπάρχει η δυνατότητα ρυτίδωσης μέσω των κυλίνδρων και παχύτερων ελασμάτων. Έχοντας κατασκευάσει με μία από αυτές τις δύο μεθόδους τον κυψελοειδή πυρήνα, κατόπιν η επικόλληση των επιστρώσεων γίνεται μέσω ειδικού κολλητικού υλικού και συνήθως σε θερμοθαλάμους κενού. Η πυκνότητα του κυψελοειδή πυρήνα καθορίζει την αντοχή του στα διατμητικά φορτία, ενώ η γεωμετρία της κυψέλης προσδιορίζει την κύρια διεύθυνση αντοχής του πυρήνα σε αυτά τα φορτία. Η συνηθέστερη και σχεδόν καθιερωμένη γεωμετρία κυψέλης είναι η εξάγωνη, για μεταλλικούς και μη, κυψελοειδείς πυρήνες.

Η γεωμετρία της κυψέλης επηρεάζει οπωσδήποτε και το συνολικό βάρος του πυρήνα, εφόσον οι επιφάνειες μίας κυψέλης που έρχονται σε επαφή με τις γειτονικές κυψέλες, δηλαδή οι κοινές πλευρές, καθορίζουν και την ποσότητα της κόλλας που θα απαιτηθεί. Σε πολλές περιπτώσεις το βάρος της κόλλας φθάνει το 1%-4% του συνολικού βάρους του πυρήνα κατασκευασμένου με τη μέθοδο της ανάπτυξης και το 10%-25% για πυρήνα κατασκευασμένο με τη μέθοδο της ρυτίδωσης. Με τη μέθοδο της ανάπτυξης, όπου το μπλοκ των ελασμάτων συμπιέζεται ώστε να κολλήσουν οι λωρίδες μεταξύ τους, η κόλλα συναντάται στην ελάχιστη δυνατή ποσότητα της. Αντιθέτως στη μέθοδο της ρυτίδωσης όπου δεν είναι δυνατή παρόμοια συμπίεση των ήδη ρυτιδωμένων ελασμάτων, εκεί η κόλλα στις κοινές πλευρές των κυψελών συναντάται σε μεγαλύτερη ποσότητα και πάχος.

Για τις αεροπορικές εφαρμογές, ο πυρήνας καθώς και οι επιστρώσεις είναι από κράματα αλουμινίου, συνήθως AL5056-H39 ή AL2024-T3. Νεώτερο υλικό για κατασκευή πυρήνα, είναι το εμποτισμένο σε κατάλληλες ρητίνες χαρτί Nomex της εταιρείας Dupont, το οποίο είναι ακουστό και παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή στις τοπικές φορτίσεις και δεν υπόκειται εύκολα σε μόνιμες παραμορφώσεις όπως συμβαίνει

με τον πυρήνα αλουμινίου. Σύνθετα με πυρήνα Nomex χρησιμοποιούνται για τα εσωτερικά τοιχία και επενδύσεις των επιβατικών αεροσκαφών. Το ειδικό βάρος του πυρήνα Nomex ποικίλει από 24 χλγ/μ³ έως 144 χλγ/μ³, το πάχος πλευράς της κυψέλης από 0,04 mm έως 0,13 mm και το άνοιγμα (διάμετρος) της κυψέλης από 3,3 mm έως 9,5 mm. Με ειδικό βάρος άνω των 70 χλγ/μ³ χρησιμοποιείται για πατώματα αεροσκαφών.

Η επιλογή του πυρήνα, των επιστρώσεων, και της κόλλας είναι τα δύσκολα βήματα στην κατασκευή του σύνθετου εφ' όσον υπάρχει περίπτωση να επιλεγεί πυρήνας αρκετά ελαστικός και επιστρώσεις αρκετά άκαμπτες, ή αντιστρόφως, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει συνεργασία στην κατανομή των φορτίων μεταξύ πυρήνα και επιστρώσεων. Σε παρόμοιο αποτέλεσμα καταλήγει και η επιλογή της κόλλας που μπορεί να είναι πολύ ελαστική ή πολύ σκληρή και εύθραυστη. Εάν η κόλλα είναι ισχυρότερη από το υλικό του πυρήνα, τότε στην περίπτωση αναγκαστικής αποκόλλησης της επίστρωσης καταστρέφεται τμήμα του πυρήνα. Εάν η κόλλα είναι πολύ ελαστική, τότε θα επιτρέψει σχετικές κινήσεις μεταξύ πυρήνα και επίστρωσης με αποτέλεσμα μείωση της αντοχής του σύνθετου στην κάμψη.

Στις φορτίσεις σε κάμψη, όπως επί παραδείγματι συμβαίνει στις περιπτώσεις των δαπέδων, τότε η άνω επίστρωση τίθεται σε θλίψη ενώ η κάτω σε εφελκυσμό. Η επίστρωση υπό θλίψη αντιμετωπίζει το ενδεχόμενο σχηματισμού κυματώσεων, αποκόλλησης από τον πυρήνα και γενικώς φαινόμενα δομικής αστάθειας. Σε αυτές τις καταστάσεις ο πυρήνας και η κολλητική ύλη λαμβάνουν πρωτεύοντα ρόλο. Ο κυψελοειδής πυρήνας αλουμινίου χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή επιφανειών ελέγχου και πτερυγίων γενικότερα, όπου ακολουθούνται δύο τρόποι κατασκευής.

α) Με τον πρώτο τρόπο, που είναι κατασκευαστικά ο δυσκολότερος διότι αφορά λεπτά πτερύγια κυρίως μαχητικών αεροσκαφών, το πτερύγιο αποτελεί εξ' ιδίου το σύνθετο στρωματοειδές με πυρήνα που έχει το σχήμα του πτερυγίου και τις αντίστοιχες επιστρώσεις. Η κατασκευή ενός τέτοιου πτερυγίου απαιτεί κατάλληλες συσκευές και πιεστικούς Θερμοθάλαμους, όπου υπό καθορισμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας γίνεται η σύνθεση του σύνθετου πτερυγίου. Κατά παρόμοιο τρόπο κατασκευάζονται τα πτερύγια του στροφείου ελικοπτήρου.

β) Εάν τα πτερύγια ελέγχου έχουν διατομή μεγάλου σχετικού πάχους (μέγιστο σχετικό πάχος = μέγιστο πάχος διατομής προς χορδή διατομής) όπως συνήθως αυτό

συμβαίνει στα επιβατικά αεροσκάφη, τότε η επικάλυψη αυτών των πτερυγίων συμφέρει να γίνεται όχι με λεπτά ελάσματα αλουμινίου, αλλά με σύνθετο στρωματοειδές, ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ακαμψία της επικάλυψης και συγχρόνως να γίνεται εξοικονόμηση Βάρους.

Με τον τρόπο αυτό το πτερύγιο δεν αποτελεί εξ ιδίου ένα σύνθετο στρωματοειδές, αλλά χρησιμοποιεί "ελάσματα" σύνθετου στρωματοειδούς ως επικάλυψη. Παρομοίως κατασκευάζονται και τα πτερύγια ανεμογεννητριών μεγάλης διαμέτρου. Εκτός από τον κυψελοειδή πυρήνα, μπορεί σε συνδυασμό με την κατάλληλη επίστρωση, να χρησιμοποιηθεί ως πυρήνας το ξύλο μπάλα, η πολουρεθάνη, η πολυστερίνη (όπως το γνωστό Styrofoam της Dow Chemical), ή άλλα παρόμοια μικρής πυκνότητας υλικά. Στην περίπτωση κατασκευής δοκού με σύνθετο υλικό, όπου η εξοικονόμηση βάρους είναι ένα από τα βασικά στοιχεία, θα πρέπει η ανάλυση κατανομής των φορτίων να προσδιορίζει το ύψος του πυρήνα και την κατανομή των επιστρώσεων. Λογικό είναι ότι στη ρίζα της δοκού η επίστρωση θα έχει μεγαλύτερο πάχος, το οποίο αποκτάται με περισσότερες στρώσεις της επίστρωσης

Άλλες εφαρμογές των σύνθετων πάνελς

- Τα οχήματα παντός εδάφους GRP χρησιμοποιούν σύνθετα πάνελς σε μέρη του αμαξώματος για την επίτευξη μεγαλύτερης δυσκαμψίας και ισχύος, ενσωματώνοντας και την θερμομόνωση. Το μικρό βάρος της κατασκευής είναι ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα του οχήματος και συμβάλλει στην ικανότητά του να κινείται ακόμη και σε μεγάλο πάχος χιονιού και επιπλέον με την μείωση του βάρους του οχήματος αυξάνεται το ωφέλιμο φορτίο.

- Μια παρόμοια με την κατασκευή φορτηγών εφαρμογή, χρησιμοποιείται για την κατασκευή εμπορευματοκιβωτίων πλοίων για την κατασκευή των οποίων χρησιμοποιούνται σύνθετα πάνελς. Στα σκάφη αναψυχής το κατάστρωμα και το κύτος συνήθως κατασκευάζονται από σύνθετα πάνελ.

- Στην αεροναυπηγική, τα σύνθετα πάνελς χρησιμοποιούνται τις τελευταίες δεκαετίες για το εξωτερικό κέλυφος του αεροπλάνου αντί για συμπαγή μεταλλικά φύλλα, γιατί παρέχουν μεγάλη αντοχή σε συνδυασμό με το μικρό βάρος

Κεφάλαιο 3 : Πειραματική διαδικασία

3.1 Υλικά Δοκιμίων

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμίων μας ήταν διαθέσιμα υλικά από τα αποθέματα της αποθήκης του εργαστηρίου κατεργασίας υλικών του τμήματος των μηχανολόγων μηχανικών ΕΜΠ (πίνακας 3). Ποιό συγκεκριμένα όσον αφορά τα εξωτερικά περιβλήματα των δοκιμίων μας χρησιμοποιήθηκε:

Λαμαρίνα χαλκού πάχους 1mm

Ιδιότητες Χαλκού

πυκνότητα : 0,0089 gr/mm³

μέτρο ελαστικότητας E : 120000 MPa

λόγος Poisson : 0,30

Λαμαρίνα ορείχαλκου πάχους 0.8mm

Ιδιότητες Ορείχαλκου

πυκνότητα : 0,0083 gr/mm³

μέτρο ελαστικότητας E : 108000 MPa

λόγος Poisson : 0,38

Λαμαρίνα από χάλυβα πάχους 0.5mm

Ιδιότητες Χάλυβα

πυκνότητα : 0,0079 gr/mm³

μέτρο ελαστικότητας E : 207000 MPa

λόγος Poisson : 0,28

Σχετικά με τα υλικά πλήρωσης των μεταλλικών κουτιών μας χρησιμοποιήσαμε:

χαλκό υπό μορφή λεπτής σκόνης (πούδρα)

Ιδιότητες Χαλκού

πυκνότητα : 0,0089 gr/mm³

μέτρο ελαστικότητας E : 120000 MPa

λόγος Poisson : 0,30

Αλουμίνιο υπό μορφή σκόνης

Ιδιότητες Αλουμινίου

πυκνότητα : 0,00268 gr/mm³

μέτρο ελαστικότητας E : 72000 MPa

λόγος Poisson : 0,34

Σκόνη μαγνησίου

Ιδιότητες Μαγνησίου

πυκνότητα : 0,00268 gr/mm³

μέτρο ελαστικότητας E : 45000 MPa

λόγος Poisson : 0,28

Υλικό	Σύμβολο	Ειδικό βάρος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος γ [ρ/cm ³]	Μέτρο ελαστικότητας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος E [10 ⁴ Nmm ⁻²]	Σταθερά εγκάρσια παραμόρφωσης ή Λόγος του Poisson ν	Σταθερά θερμικής διαστολής μεταξύ 0° και 100° C a [10 ⁻⁶ /°C]
Αλουμίνιο	Al	2,70	7,2	0,34	24,0
Μόλυβδος	Mb	11,35	1,7	0,44	29,0
Σίδηρος	Fe	7,86	21,6	0,28	12,0
Χάλυβας	-	7,85	21,0	0,28	11,0
Χυτοσίδηρος	-	7,10 - 7,30	7,5 - 13,0	0,24 - 0,26	9,0
Χρυσός	Au	19,3	8,1	0,42	14,0
Χαλκός	Cu	8,93	12,6	0,35	16,2
Μπρούτζος	-	8,73	11,1	0,35	17,0
Μαγνήσιο	Mg	1,74	4,5	0,28	26,0
Νικέλιο	Ni	8,90	20,5	0,31	13,0
Ορείχαλκος	-	8,30 - 8,50	9,0 - 10,0	0,38	18,0 - 19,0
Ψευδάργυρος	Zn	7,13	4,0 - 13,0	0,20 - 0,30	26,0
Κασσίτερος	Sn	7,30	5,6	0,33	27,0
Άργυρος	Ag	10,50	8,1	0,37	20,0
Μπετόν	-	1,50 - 2,40	2,5 - 4,5	0,20	12,0
Γυαλί	-	2,20 - 2,60	4,0 - 10,0	0,19 - 0,28	3,0 - 10,0

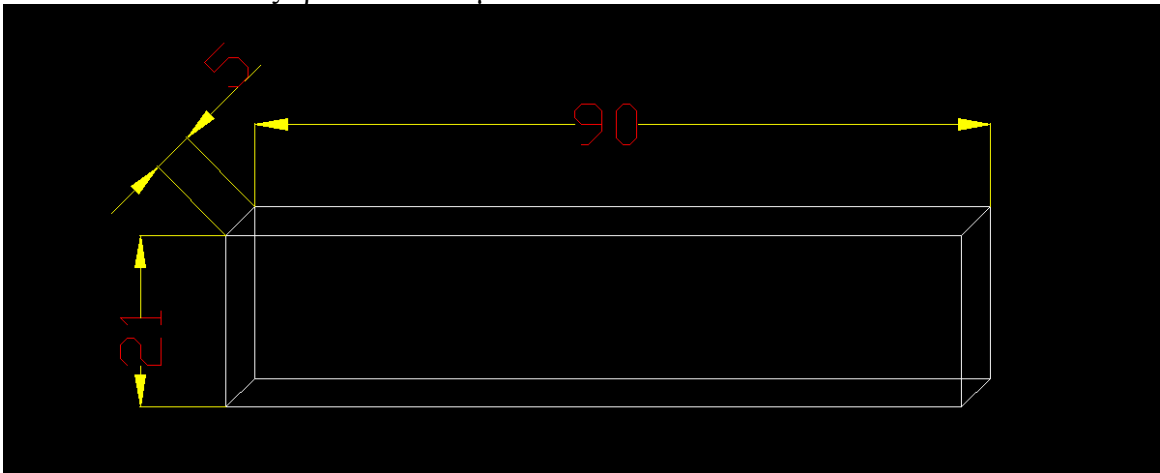
Πίνακας 3 : Χαρακτηριστικές σταθερές υλικών

3.2 Κατασκευή δοκιμίων

Η μορφοποίηση των δοκιμίων μας έγινε από εξειδικευμένο τεχνίτη με τη χρήση εργαλείων και υλικών, του εργαστηρίου κατεργασίας υλικών, ώστε να προκύψουν σχετικά πανομοιότυπα σε διαστάσεις δοκίμια για να υπάρχει μέτρο σύγκρισης και εξαγωγής ορθών συμπερασμάτων.

Το σχήμα και οι διαστάσεις προέκυψαν έπειτα αξιολόγηση άλλων πειραματικών μελετών στις οποίες πολυστρωματικά υλικά υφίστανται την κατεργασία της έλασης. Οι επιθυμητές διαστάσεις των δοκιμίων μας είχαν μήκος **90mm**, πλάτος **21mm** και πάχος **5mm** (εικόνες 5,6). Η διαδικασία που ακολουθήσαμε ήταν το κόψιμο και το λύγισμα της εκάστοτε λαμαρίνας για το σχηματισμό του μεταλλικού κουτιού. Εν συνεχεία γινόταν ραφή με τη μέθοδο της χαλκοκόλλησης κατά μήκος του δοκιμίου μας και στη μία πλευρά του κουτιού ώστε η άλλη να παραμείνει ελεύθερη για την εισαγωγή του επιθυμητού υλικού υπό μορφή σκόνης. Ακολουθούσε το φινίρισμα με τη χρήση λειαντή ειδικά στη περιοχή των ραφών για ποιο ομοιόμορφο αποτέλεσμα. Τέλος το μεταλλικό μας κουτί με την μία πλευρά ανοιχτή δεχόταν την εισαγωγή της εκάστοτε μεταλλικής σκόνης και την πλήρωσή του ακολουθούσε το σφράγισμα της πλευράς μέσω του λυγισμού κομματιού του περιβλήματος που είχε προβλεφθεί για το σκοπό αυτό.

Εικόνα 5: Διαστάσεις πρότυπου δοκιμίου 90X21X5mm





Εικόνα 6: Απεικόνιση των δοκιμών πριν και μετά την διεργασία της έλασης

3.3 Διαδικασία έλασης

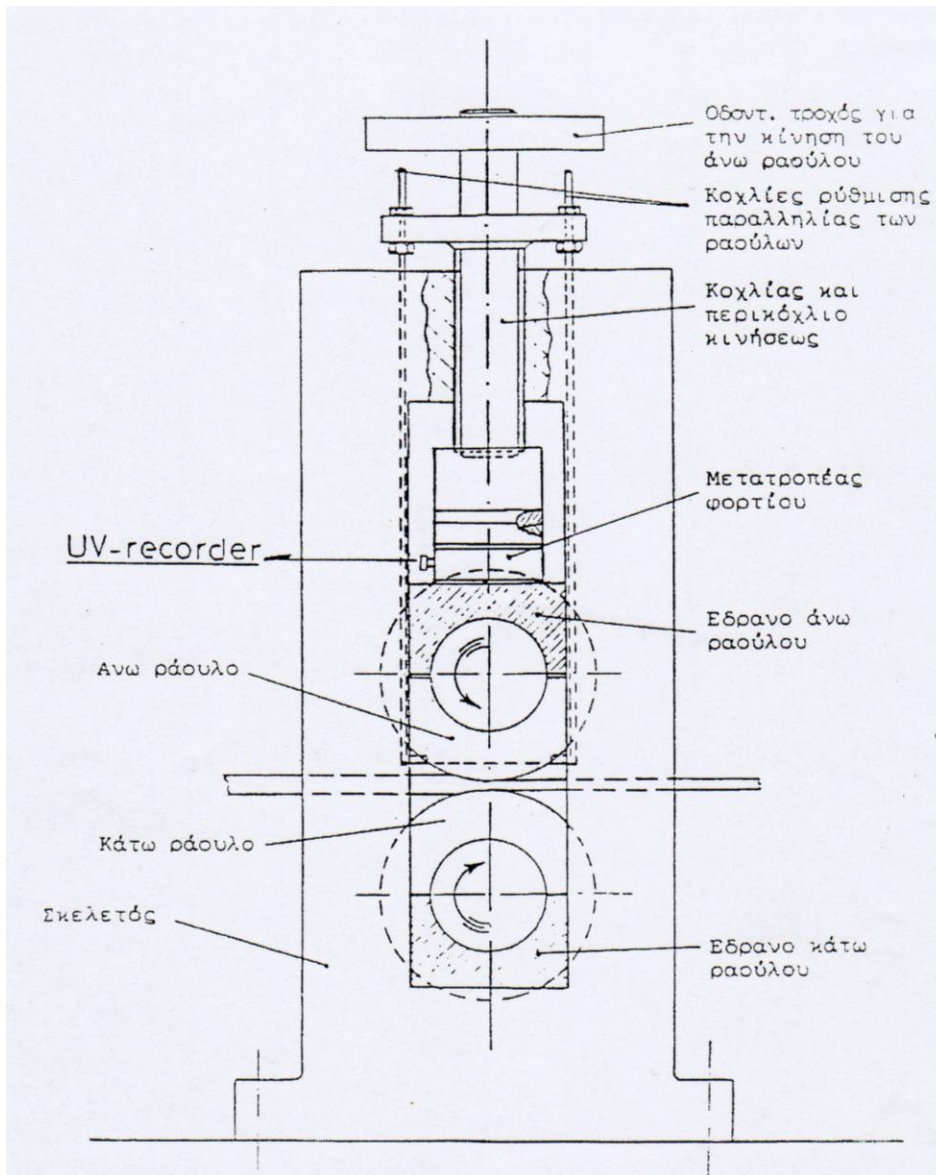
Εξοπλισμός

Η βασική διάταξη που χρησιμοποιήσαμε για την έλαση αποτελείται από ένα έλαστρο 2 ραούλων από βαμμένο χάλυβα, διαμέτρου 200 mm και πλάτους 100 mm. Το άνω ράουλο έχει τη δυνατότητα κατακόρυφης μετατόπισης μέσω μηχανισμού οδοντωτών τροχών, ώστε να μεταβάλλεται το ονομαστικό διάκενο μεταξύ 0-25mm. Οι δύο κοχλίες που κινούν κατακόρυφα το άνω ράουλο περιστρέφονται ταυτόχρονα, εκτός και αν γίνει ιδιαίτερη ρύθμιση της παραλληλίας των ραούλων, σχέδιο 5. Ο σκελετός του ελάστρου

είναι χυτοσιδηρός και εξασφαλίζει την απαιτούμενη στιβαρότητα, βλέπε σχήμα 14 και εικόνες 7,8.

Ο ηλεκτρομειωτήρας ήταν ασύγχρονος, ισχύος 7,5 kW. Η διάταξη μετάδοσης της κίνησης από τον ηλεκτρομειωτήρα στα δύο ράουλα περιλάμβανε κιβώτιο μετάδοσης με δύο οδοντωτούς τροχούς ίσου αριθμού οδόντων για την ισοταχή περιστροφή τους. Η μετάδοση της κίνησης στο κιβώτιο γίνεται μέσω ζεύγους οδοντωτών τροχών σχέσεως 3 : 1, ώστε τελικά τα ράουλα να περιστρέφονται με ταχύτητα από 3.3 έως 20 rpm. Ο σύνδεσμος σταυρωτής άρθρωσης που συνδέει το κιβώτιο μετάδοσης με τα ράουλα επιτρέπει την κατακόρυφη κίνηση του άνω ραούλου για τον καθορισμό του διακένου. Η εκκίνηση γίνεται μέσω διακόπτη αστέρα – τριγώνου, και υπάρχει θερμική προστασία υπερφόρτισης του κινητήρα.

Οι συσκευές που χρησιμοποιήσαμε για την καταγραφή της δύναμης και της ροπής που εφαρμόστηκε κατά την εκτέλεση του πειράματός μας, αποτελούνται από ένα ροπόμετρο και ένα δυναμόμετρο προσαρμοσμένα επί του έλαστρου. Το δυναμόμετρο απαρτίζεται δύο ανεξάρτητους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς KISTLER μέγιστης δυνατότητας 40 tons ο καθένας, προσαρμοσμένους στο άνω μέρος των εδράσεων του άνω ραούλου. Το ροπόμετρο απαρτίζεται από δύο μετατροπείς ροπής KYOWA με strain gages, προσαρμοσμένους μεταξύ κιβωτίου μετάδοσης και σταυρωτών συνδέσμων. Το σήμα τους ενισχύεται και προβάλλεται μέσω δύο ηλεκτρονικών ενισχυτών τα οποία μας δίνουν τη δυνατότητα φιλτραρίσματος τυχόν θορύβων ή ακραίων τιμών για ποιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αυτά καταγράφονται από έναν καταγραφέα με ακίδες ο οποίος είναι αναλογικός και καταγράφει ταυτόχρονα την δύναμη και την ροπή που ασκείται στο δοκίμιο μας. Επιπλέον για μεγαλύτερη ακρίβεια έχουμε συνδέσει και έναν υπολογιστή με ειδικό μετρητικό λογισμικό.



Σχήμα 14: Μηχανισμός Ραούλων έλαστρου Εργαστηρίου Τομέα
 Τεχνολογίας των κατεργασιών



Εικόνα 7 : Έλαστρο Εργαστηρίου Τομέα Τεχνολογίας Κατεργασιών των Κατασκευών



Εικόνα 8 : Έλαστρο Εργαστηρίου Τομέα Τεχνολογίας Κατεργασιών των Κατασκευών

Προετοιμασία

Αρχικά έγινε ακριβής μέτρηση των διαστάσεων των δοκιμίων με ηλεκτρονικό παχύμετρο και κατόπιν τοποθετήθηκαν σε ηλεκτρονική ζυγαριά ώστε να προκύψουν τα ακριβή βάρη τόσο των εξωτερικών περιβλημάτων όσο και των δοκιμίων μας μετά την πλήρωση τους με τις μεταλλικές σκόνες. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων απεικονίζονται στους παρακάτω πίνακες με βάση το υλικό γέμισης.

Έτσι στον Πίνακα 4 περιλαμβάνονται τα δοκίμια με γέμιση σκόνης αλουμινίου, στον Πίνακα 5 αντίστοιχα για γέμιση σκόνης μαγνησίου και στο Πίνακα 6 για σκόνη χαλκού.

ΔΟΚΙΜΙΟ	Α-ΧΑΛΚΟΣ	Β-ΟΡΕΙΧΑΛΚΟΣ	Γ-ΧΑΛΥΒΑΣ
ΒΑΡΟΣ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑΤΟΣ	41,3gr	32gr	19,4gr
ΒΑΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΜΕ ΣΚΟΝΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	43gr	33,6gr	21,5gr
ΜΗΚΟΣ	90mm	88,7mm	88mm
ΠΛΑΤΟΣ	21,8mm	21,8mm	21,3mm
ΠΑΧΟΣ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑΤΟΣ	1mm	0,8mm	0,5mm
ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	5,1mm	4,95mm	4,4mm

Πίνακας 4: Δοκίμια Α,Β,Γ με υλικό πλήρωσης σκόνη αλουμινίου

ΔΟΚΙΜΙΟ	Δ-ΧΑΛΚΟΣ	Ζ-ΟΡΕΙΧΑΛΚΟΣ	Ε-ΧΑΛΥΒΑΣ
ΒΑΡΟΣ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑΤΟΣ	41,4gr	33,6gr	18,6gr
ΒΑΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΜΕ ΣΚΟΝΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	43,7gr	36,9gr	21,4gr
ΜΗΚΟΣ	90,22mm	89,7mm	87,66mm
ΠΛΑΤΟΣ	21,6mm	21,4mm	21,1mm
ΠΑΧΟΣ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑΤΟΣ	1mm	0,8mm	0,5mm
ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	5,35mm	3,3mm	3,2mm

Πίνακας 5: Δοκίμια Δ,Ζ,Ε με υλικό πλήρωσης σκόνη μαγνησίου

ΔΟΚΙΜΙΟ	Ι-ΧΑΛΚΟΣ	Η-ΟΡΕΙΧΑΛΚΟΣ	Κ-ΧΑΛΥΒΑΣ
ΒΑΡΟΣ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑΤΟΣ	41,5gr	32,5gr	19gr
ΒΑΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΜΕ ΣΚΟΝΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	57,9gr	54gr	37,6gr
ΜΗΚΟΣ	88,28mm	88,48mm	86,71mm
ΠΛΑΤΟΣ	21,2mm	21,4mm	20,8mm
ΠΑΧΟΣ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑΤΟΣ	1mm	0,8mm	0,5mm
ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	5,5mm	6mm	4,95mm

Πίνακας 6: Δοκίμια Ι,Η,Κ με υλικό πλήρωσης σκόνη χαλκού

Εκτέλεση πειράματος

Πραγματοποιήθηκαν εννιά 9 σειρές έλασης με εννιά διαφορετικά δοκίμια σε έλαστρο 2 ραούλων σε ταχύτητα 4m/min μεταξύ των δύο ραούλων 200mm διαμέτρου και 100mm πλάτους σε σειρά πασών υπό ξηρές συνθήκες . Τα τρία 3 από τα δοκίμιά μας (δοκίμια Α,Κ,Ι) είχαν εξωτερικό περίβλημα από χαλκό πάχους 1mm. Το υλικό γέμισης ήταν για το πρώτο δοκίμιο Α αλουμίνιο υπό μορφή σκόνης. Για το δοκίμιο Δ το υλικό γέμισης είναι σκόνη μαγνησίου ενώ για το δοκίμιο Ι το υλικό γέμισης είναι σκόνη χαλκού.



Παρόμοια τα υπόλοιπα 3 τρία (δοκίμια Β,Ζ,Η) είχαν εξωτερικό περίβλημα από ορείχαλκο πάχους 0.8mm ενώ για το δοκίμιο Β το υλικό γέμισης ήταν σκόνη αλουμινίου, για το δοκίμιο Ζ το υλικό γέμισης είναι σκόνη μαγνησίου και για το δοκίμιο Η σκόνη χαλκού.



Τέλος έχουμε μία τριάδα δοκιμίων (δοκίμια Γ,Ε,Κ) με εξωτερικό περίβλημα από λαμαρίνα χάλυβα πάχους 0.5mm και αντίστοιχα υλικό γέμισης σκόνη αλουμινίου για το δοκίμιο Γ, σκόνη μαγνησίου για το δοκίμιο Ε και σκόνη χαλκού για το δοκίμιο Κ.



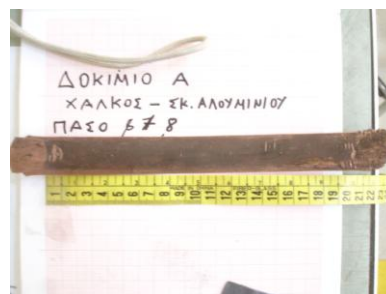
Παρατηρήσεις πάνω στη μορφολογία των δοκιμίων για κάθε πάσο

Οι προκύπτουσες κατόπιν μετρήσεων τιμές του πάχους, του πλάτους και του μήκους του κάθε δοκιμίου για μία σειρά πασών από το έλαστρο μας φαίνονται στους παρακάτω πίνακες. Αντίστοιχα οι παράμετροι της έλασης για κάθε δοκίμιο όπως υπολογίστηκαν για μία σειρά πασών από το έλαστρο μας φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Το δοκίμιο Α παρέμεινε σχεδόν ίδιο κατά τη διάρκεια του πρώτου πάσου με μία μικρή απορρόφηση του πάχους των ραφών (χαλκοκόλληση κατά μήκος στη μία επιφάνεια του δοκιμίου μας και καθέτως στο ένα άκρο) που εξείχαν και των μικροανωμαλιών της επιφάνειας. Με το πέρας του δεύτερου πάσου έγινε μεγαλύτερη απορρόφηση των ατελειών αυξάνοντας την ομοιογένεια της επιφάνειας, παρόμοια και στο πέρας του τρίτου πάσου. Στο τέταρτο πάσο το δοκίμιο μας απέκτησε λείο και επίπεδο σχήμα με μικρή εξόγκωση στα άκρα η οποία απορροφήθηκε στο πέρας του 5 πάσου. Στο έκτο πάσο παρατηρούμε ότι το διάγραμμα της δύναμης που εφαρμόστηκε

κατά μήκος της επιφάνειας είναι αρμονικό (μία κορυφή) που δείχνει ότι η επιφάνεια του δοκιμίου είναι εντελώς λεία. Στα επόμενα δύο πάσα συνεχίστηκε η αύξηση του μήκους και του πλάτους του δοκιμίου και η ταυτόχρονη μείωση του πάχους με το δοκίμιο να αποκτά μία μικρή κύρτωση.

Δοκίμιο A	Αρχ. Διαστάσεις				Πάχος: 5,5mm	Πλάτος: 21,80mm	Μήκος: 90mm	
Διάσταση Πάσου	1mm	1mm	1mm	1mm	0.5mm	0.5mm	0.5mm	0.5mm
Αριθμός Πάσου	1	2	3	4	5	6	7	8
Πάχος (mm)	5,15	4,2	3,41	2,6	2,25	1,76	1,41	0,94
Πλάτος (mm)	21,85	22,51	22,98	23,5	23,7	23,83	23,88	24,3
Μήκος (mm)	90,5	91,5	92,44	96,3	104,73	130,09	161,39	240,6



ΔΟΚΙΜΙΟ Α (ΧΑΛΚΟΣ - ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΣΚΟΝΗ)						
Αριθμός Πάσου	Γ_i μείωση πάχους τριμ/κού ανά πάσο (%)	Γ_T ολική μείωση πάχους τριμ/κού ανά πάσο (%)	αύξηση πλάτους τριμ/κού (%)	αύξηση μήκους τριμ/κού (%)	F_R Δύναμη έλασης /πάσο (KN) exp.	T_R Ροπή έλασης /πάσο (Nm) exp.
1	6,4	6,4	0,23	0,55	7,339	10,9
2	18,4	24,8	3,02	1,1	12,028	25,01
3	18,8	43,6	2,09	1,03	21,186	39,7
4	23,7	67,3	2,26	4,18	49,048	94,4
5	13,5	80,8	0,85	8,75	62,323	112,2
6	21,8	102,6	0,55	24,2	84,633	170,05
7	19,9	122,5	0,21	24,1	79,677	148,2
8	33,3	155,8	0,175	49,1	117,42	210,17

Στο πέρας του πρώτου πάσου υπάρχουν αρκετές ατέλειες στην επιφάνεια με τις ραφές να εξέχουν. Στο δεύτερο και στο τρίτο πάσο έχουμε απορρόφηση μεγάλου μέρους των ραφών και των μικροανωμαλιών. Στο τέταρτο πάσο οι ραφές του δοκιμίου έχουν ενσωματωθεί πλήρως με λεία επιφάνεια και εμφάνιση μικρών ραγισμάτων επί των ραφών τα οποία όμως στο πέμπτο πάσο επιπεδώνονται με ταυτόχρονη δημιουργία μικρών σπασιμάτων στο ένα άκρο.

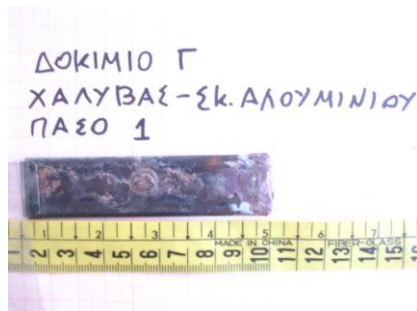
Δοκίμιο Β	Αρχ. Διαστάσεις	Πάχος: 4,95mm	Πλάτος: 21,8mm	Μήκος: 88,7mm	
Διάσταση Πάσου	(2mm)	(1mm)	(1mm)	(0,5mm)	(0,5mm)
Αριθμός Πάσου	1	2	3	4	5
Πάχος (mm)	3,1	2,3	1,73	1,31	0,91
Πλάτος (mm)	22,74	23,29	23,6	23,85	24,01
Μήκος (mm)	90,55	92,95	113,12	147,19	201,36



ΔΟΚΙΜΙΟ Β (ΟΡΕΙΧΑΛΚΟΣ - ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΣΚ.)						
Αριθμός Πάσου	r_i μείωση πάχους τριμεταλλικού ανά πάσο %	r_T ολική μείωση πάχους τριμεταλλικού ανά πάσο (%)	αύξηση πλάτους τριμ/κού %	αύξηση μήκους τριμ/κού %	F_R Δύναμη έλασης /πάσο (kN) exp.	T_R Ροπή έλασης /πάσο (Nm) exp.
1	37,4	37,4	4,3	2,1	11,321	13,2
2	25,8	63,2	2,4	2,6	43,729	61,5
3	24,8	88	1,3	21,7	101,54	176,87
4	24,3	112,3	1,1	30,1	123,94	257,15
5	30,5	142,8	0,7	36,8	175,05	292,27

Μικρή απορρόφηση των εξογκωμάτων, ραφών και μικροατελειών κατά το πέρας του πρώτου και δεύτερου πάσου, με αύξηση της ομοιογένειας στο πέρας του τρίτου και τέταρτου πάσου ώστε τελικά στο πέμπτο πάσο να έχουμε πλήρη απορρόφηση των ραφών και μικροατελειών. Και με το πέρας του έκτου πάσου το δοκίμιο είναι εντελώς λείο και ομοιογενές.

Δοκίμιο Γ	Αρχ. Διαστάσεις	Πάχος: 4,4mm	Πλάτος: 21,3mm	Μήκος: 88mm		
Διάσταση Πάσου	(1mm)	(1mm)	(1mm)	(1mm)	(0,5mm)	(0,5mm)
Αριθμός Πάσου	1	2	3	4	5	6
Πάχος (mm)	3,23	2,4	2,31	1,75	1,39	0,97
Πλάτος (mm)	22,02	22,5	22,55	22,92	23	23,25
Μήκος (mm)	88,91	89,62	89,77	95,12	108,97	145,59



ΔΟΚΙΜΙΟ Γ (ΧΑΛΥΒΑΣ - ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΣΚ.)						
Αριθμός Πάσου	r_i μείωση πάχους τριμεταλλικού / πάσο %	r_T ολική μείωση πάχους τριμεταλλικού ανά πάσο %	αύξηση πλάτους τριμεταλλικού %	αύξηση μήκους τριμ/κού %	F_R Δύναμη έλασης /πάσο (KN) exp.	T_R Ροπή έλασης /πάσο (Nm) exp.
1	26,6	26,6	3,4	1	12,041	31
2	25,7	52,3	2,2	0,8	27,921	51,7
3	3,8	56,1	0,2	0,2	23,446	12,4
4	24,2	80,3	1,6	6,5	103,98	206,2
5	20,6	100,9	0,3	14,56	116,37	222,2
6	30,2	131,1	1	33,6	169,66	271,3

Μικρή απορρόφηση των ραφών και των μικροατελειών της επιφάνειας έχουμε στο πέρας του πρώτου πάσου, η οποία αυξάνεται με και στα επόμενα δύο πάσα. Στο πέρας του τέταρτου πάσου εμφανίζονται μικρά ραγίσματα στη επιφάνεια της επιμήκους ραφής τα οποία λειαινόνται και απορροφούνται στα επόμενα δύο πάσα.

Δοκίμιο Δ	Αρχ. Διαστ.	Πάχος: 5,35mm	Πλάτος: 21,6mm	Μήκος: 90,22mm			
Διάσταση Πάσου	(1mm)	(1mm)	(1mm)	(0,5mm)	(0,5mm)	(0,5mm)	(0,5mm)
Αριθμός Πάσου	1	2	3	4	5	6	7
Πάχος (mm)	4,41	3,62	2,77	2,35	1,9	1,41	0,97
Πλάτος (mm)	22,3	22,6	23,15	23,35	23,55	23,71	24,2
Μήκος (mm)	91,41	92,92	103,31	118,56	144,76	187,92	280,2



ΔΟΚΙΜΙΟ Δ (ΧΑΛΚΟΣ - ΜΑΓΝΗΣΙΟ ΣΚ.)						
Αριθμός Πάσου	r_i μείωση πάχους τριμεταλλικού ανά πάσο %	r_T ολική μείωση πάχους τριμεταλλικού ανά πάσο %	αύξηση πλάτους τριμ/κού %	αύξηση μήκους τριμ/κού %	F_R Δύναμη έλασης /πάσο (KN) exp.	T_R Ροπή έλασης /πάσο (Nm) exp.
1	17,6	17,6	3,2	1,3	9,885	15,14
2	17,9	35,5	1,3	1,7	23,192	47,97
3	23,5	59	2,4	11,2	68,09	145,4
4	15,2	74,2	0,9	14,8	68,064	134,98
5	19,15	93,35	0,9	22,1	82,216	158,51
6	25,8	119,15	0,7	29,9	98,564	194,96
7	31,2	150,35	2	49,1	118,35	236,59

Στα πρώτα τρία πάσα έχουμε σταδιακή απορρόφηση των ραφών και των μικροατελειών της επιφάνειας. Στο τέταρτο πάσο εμφανίζονται ραγίσματα κατά μήκος της ραφής τα οποία λειαινόνται στο πέμπτο πάσο αλλά παραμένουν σαν ρωγμή. Στο έκτο πάσο η διαμήκης ρωγμή αυτή ανοίγει περισσότερο με το υπόλοιπο τμήμα να παραμένει λείο. Στο έβδομο πάσο το δοκίμιο έχει πλέον ανοίξει σε δύο μέρη τα οποία έχουν αντίθετες κατευθύνσεις.

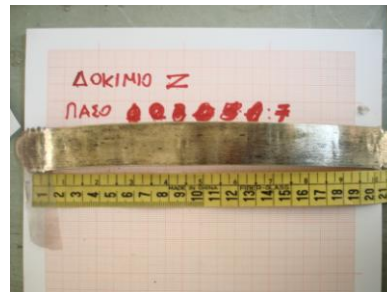
Δοκίμιο Ε	Αρχ. Διαστ.	Πάχος: 4,45mm	Πλάτος: 21,1mm	Μήκος: 87,66mm			
Διάσταση Πάσου	(1mm)	(1mm)	(0,5mm)	(0,5mm)	(0,5mm)	(0,5mm)	(0,5mm)
Αριθμός Πάσου	1	2	3	4	5	6	7
Πάχος (mm)	3,45	2,8	2,34	2,02	1,75	1,29	0,89
Πλάτος (mm)	21,6	22,16	22,5	22,7	22,85	23,1	23,2
Μήκος (mm)	88,83	89,67	92,25	101,13	113,43	145,83	200



ΔΟΚΙΜΙΟ Ε (ΧΑΛΥΒΑΣ - ΜΑΓΝΗΣΙΟ ΣΚ.)						
Αριθμός Πάσου	Γ_i μείωση πάχους τριμεταλλικού ανά πάσο %	Γ_T ολική μείωση πάχους τριμεταλλικού ανά πάσο %	αύξηση πλάτους τριμ/κού %	αύξηση μήκους τριμ/κού %	F_R Δύναμη έλασης /πάσο (KN) exp.	T_R Ροπή έλασης /πάσο (Nm) exp.
1	22,5	22,5	2,4	1,3	4	9,75
2	18,8	41,3	2,3	0,9	27,999	52,7
3	16,4	57,7	1,5	2,9	58,478	95,87
4	13,7	71,4	0,9	9,6	81,528	146,05
5	13,4	84,8	0,7	12,2	89,504	155,98
6	26,3	111,1	1	28,6	134,64	268,52
7	31	142,1	0,4	37,2	169,17	323,2

Στα πρώτα δύο πάσα έχουμε μικρή απορρόφηση των ραφών και των μικροατελειών της επιφάνειας ενώ στο τρίτο πάσο εμφανίζονται δύο μικρά κάθετα ραγίσματα . Το δοκίμιο εξακολουθεί να λειαίνεται χωρίς την εμφάνιση κάποιας ρωγμής και στα επόμενα τρία πάσα ενώ στο τελικό έβδομο πάσο εμφανίζονται μικρά εξογκώματα κατά μήκος της ραφής.

Δοκίμιο Z	Αρχ. Διαστ.	Πάχος: 5,33mm	Πλάτος: 21,4mm	Μήκος: 89,7mm			
Διάσταση Πάσου	(1mm)	(1mm)	(1mm)	(0,5mm)	(0,5mm)	(0,5mm)	(0,5mm)
Αριθμός Πάσου	1	2	3	4	5	6	7
Πάχος (mm)	4,42	3,61	2,94	2,52	2,07	1,6	1,11
Πλάτος (mm)	21,8	22,34	22,85	22,97	23,21	23,31	23,66
Μήκος (mm)	90,82	92,23	98,7	110,37	130,32	160,73	230,3



ΔΟΚΙΜΙΟ Z (ΟΡΕΙΧΑΛΚΟΣ - ΜΑΓΝΗΣΙΟ ΣΚ.)						
Αριθμός Πάσου	r_i μείωση πάχους τριμεταλλικού ανά πάσο %	r_T ολική μείωση πάχους τριμεταλλικού ανά πάσο %	αύξηση πλάτους τριμ/κού %	αύξηση μήκους τριμ/κού %	F_R Δύναμη έλασης /πάσο (kN) exp.	T_R Ροπή έλασης /πάσο (Nm) exp.
1	17,1	17,1	1,9	1,2	6,066	13,76
2	18,3	35,4	2,5	1,6	22,004	50,64
3	18,6	54	2,3	7	64,317	132,9
4	14,3	68,3	0,5	11,8	86,678	161,21
5	17,8	86,1	1	18	118,16	201,16
6	22,7	108,8	0,4	23,33	133,54	257,32
7	30,6	139,4	1,5	43,28	184,18	313,2

Κατά το πρώτο πάσο έχουμε μικρή απορρόφηση των ραφών και των μικροατελειών της επιφάνειας του δοκιμίου. Στο δεύτερο πάσο παρόμοια αυξάνεται η επιπεδότητα της επιφάνειας και αυτό γίνεται ακόμα πιο λείο και ομοιογενές στο τρίτο πάσο. Μικρές κάθετες ρωγμές εμφανίζονται στη ραφή στο τέταρτο πάσο οι οποίες λειαίνονται στο πέμπτο πάσο. Τέλος στο έκτο πάσο το δοκίμιο μας είναι εντελώς λείο και ομοιογενές.

Δοκίμιο Η	Αρχ. Διαστάσεις	Πάχος: 6mm	Πλάτος: 20,80mm	Μήκος: 89,76mm		
Διάσταση Πάσου	(1mm)	(1mm)	(1mm)	(1mm)	(0,5mm)	(0,5mm)
Αριθμός Πάσου	1	2	3	4	5	6
Πάχος (mm)	5,3	4,45	3,52	2,79	2,37	1,84
Πλάτος (mm)	21,67	22	22,46	22,92	23,06	23,35
Μήκος (mm)	90,52	91,47	96,09	111,31	127,31	160,47



ΔΟΚΙΜΙΟ Η (ΟΡΕΙΧΑΛΚΟΣ -ΧΑΛΚΟΣ ΣΚ.)						
Αριθμός Πάσου	Γ_i μείωση πάχους τριμεταλλικού ανά πάσο %	Γ_T ολική μείωση πάχους τριμεταλλικού ανά πάσο %	αύξηση πλάτους τριμ/κού %	αύξηση μήκους τριμ/κού %	F_R Δύναμη έλασης /πάσο (KN) exp.	T_R Ροπή έλασης /πάσο (Nm) exp.
1	11,7	11,7	4	0,8	6,046	6,16
2	16	27,7	1,5	1	18,075	146,49
3	20,9	48,6	2,1	5	57,549	118,97
4	20,7	69,3	2	15,8	104,1	171
5	15	84,3	0,6	14,4	110,56	203,27
6	22,4	106,7	1,3	26	142,06	290,21

Πολύ μικρές αλλαγές έχουμε κατά το πρώτο πάσο όπου συμβαίνει απορρόφηση των ραφών και των μικροατελειών κάτι που συνεχίζεται και στο δεύτερο πάσο αλλά και στο τρίτο όπου πλέον το σώμα του δοκιμίου έχει πάρει μία μικρή κλίση. Στο τέταρτο πάσο εξακολουθεί να αυξάνεται η επιπεδότητα του δοκιμίου ενώ στο πέμπτο πάσο κατά μήκος της ραφής δημιουργείται σχισμή.

Δοκίμιο Κ	Αρχ. Διαστάσεις	Πάχος: 4,95mm	Πλάτος: 20,80mm	Μήκος: 88,01mm	
Διάσταση Πάσου	(1mm)	(1mm)	(1mm)	(0,5mm)	(0,5mm)
Αριθμός Πάσου	1	2	3	4	5
Πάχος (mm)	4,11	3,23	2,54	2,15	1,79
Πλάτος (mm)	21,16	21,75	22,25	22,45	22,58
Μήκος (mm)	88,1	89,02	95,51	108,92	135,04



ΔΟΚΙΜΙΟ Κ (ΧΑΛΥΒΑΣ -ΧΑΛΚΟΣ ΣΚ.)						
Αριθμός Πάσου	r_i μείωση πάχους τριμεταλλικού ανά πάσο %	r_T ολική μείωση πάχους τριμεταλλικού ανά πάσο %	αύξηση πλάτους τριμ/κού %	αύξηση μήκους τριμ/κού %	F_R Δύναμη έλασης /πάσο (KN) exp.	T_R Ροπή έλασης /πάσο (Nm) exp.
1	16,9	16,9	1,7	1	5,358	9,32
2	21,4	38,3	2,7	1,1	31,655	67,25
3	21,4	59,7	2,3	7,3	92,751	192,76
4	15,4	75,1	0,9	14	103,26	166,25
5	16,7	91,8	0,6	24	129,85	224,68

Έχουμε μικρή απορρόφηση των ραφών και των μικροατελειών στο πέρας του πρώτου και του δεύτερου πάσου ενώ και στο τρίτο πάσο αυξάνεται η επιπεδότητα του δοκιμίου με ταυτόχρονη εμφάνιση ρωγμών στη ραφή. Οι ρωγμές αυτές διαπλατώνονται και απορροφούνται στο επόμενο δύο πάσα και το δοκίμιο αποκτά εντελώς λεία και ομοιόμορφη επιφάνεια.

Δοκίμιο I	Αρχ. Διαστάσεις	Πάχος: 5,5mm	Πλάτος: 89,48mm	Μήκος: 87,78mm	
Διάσταση Πάσου	(1mm)	(1mm)	(1mm)	(1mm)	(0,5mm)
Αριθμός Πάσου	1	2	3	4	5
Πάχος (mm)	4,71	3,84	3,04	2,15	1,61
Πλάτος (mm)	21,65	22,2	22,5	23,1	23,4
Μήκος (mm)	90,77	93,51	106,78	142,38	184,39



ΔΟΚΙΜΙΟ I (ΧΑΛΚΟΣ -ΧΑΛΚΟΣ ΣΚ.)						
Αριθμός Πάσου	Γ_i μείωση πάχους τριμεταλλικού ανά πάσο %	Γ_T ολική μείωση πάχους τριμεταλλικού ανά πάσο %	αύξηση πλάτους τριμ/κού %	αύξηση μήκους τριμ/κού %	F_R Δύναμη έλασης /πάσο (KN) exp.	T_R Ροπή έλασης /πάσο (Nm) exp.
1	14,4	14,4	2,1	1,4	13,872	38,1
2	18,5	32,9	2,5	3	39,819	70,29
3	20,8	53,7	1,4	14,2	81,346	134,78
4	29,3	83	2,7	33,3	122,49	224,58
5	25,1	108,1	1,3	29,5	117,7	229,46

Κεφάλαιο 4 : Αξιολόγηση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

4.1 Επεξεργασία δοκιμίων

Επιπλέον μετά την επιτυχή ολοκλήρωση των πειραματικών κατεργασιών έλασης στα δοκίμια που παρήχθησαν έγινε τομή και αφαίρεση τμήματος τους προκειμένου να χρησιμοποιηθεί αυτό για την παρατήρηση και τον σχηματισμό εικόνας του εσωτερικού των δοκιμίων και των λεπτομερειών αυτού. Εν συνεχεία ακολουθήσαμε την μέθοδο του εγκιβωτισμού σε ρητίνη των τεμαχίων αυτών προκειμένου να τα προσανατολίσουμε στο επίπεδο που επιθυμούμε ώστε να γίνει ενδεδειγμένη παρατήρησή τους στο μικροσκόπιο για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Η λείανση με μία σειρά διαφορετικών τραχυτήτων γυαλόχαρτων και το φινίρισμα των τεμαχίων αυτών ήταν το τελικό στάδιο επεξεργασίας προκειμένου να αποφύγουμε τις ατέλειες όπως οι γρατζουνιές και ξένα σώματα που πιθανόν είχαν διεισδύσει στα δοκίμια μας.

Ποιο συγκεκριμένα τα δοκίμια που προέκυψαν μετά την έλαση των πολυστρωματικών τοποθετήθηκαν σε τροχό κοπής διαμέτρου 250mm πάχους 2mm με χρήση υγρού μείωσης της τριβής, από όπου τους αφαιρέθηκε το ακριανό τμήμα μήκους 3cm εκατοστών (τμήμα που περιλάμβανε την ραφή στο άκρο του “κουτιού”) και εν συνεχεία αντιπροσωπευτικό τμήμα 2cm εκατοστών αφαιρέθηκε προκειμένου να μελετηθεί για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Τα τεμάχια αυτά εν συνεχεία με τη βοήθεια ειδικών στατήρων τοποθετήθηκαν κάθετα σε ειδικά κουτιά εγκιβωτισμού (Strauer). Κατόπιν σε αναλογία 3 προς 2 ή 2 προς 1 τοποθετήσαμε τη ρητίνη εγκιβωτισμού και τον διαλύτη σε ένα κυπελάκι τηρουμένων όλων των μέτρων ασφαλείας (γάντια πλαστικά, μάσκα προσώπου για τις αναθυμιάσεις, εξαερισμός, γυαλιά προστασίας) και αφού τα αναμίξαμε το ρευστό εκχύθηκε στα κουτιά εγκιβωτισμού όπου και στερεοποιήθηκε με τα δοκίμια να παραμένουν ακινητοποιημένα στην επιθυμητή θέση, βλέπε εικόνα 9.

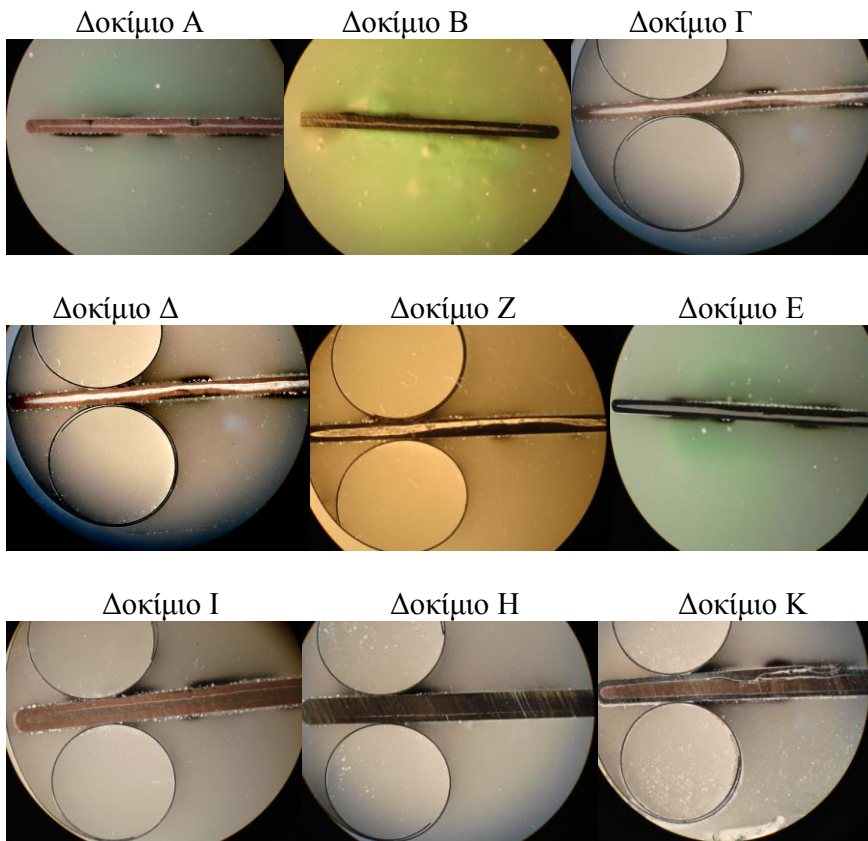


Εικόνα 9: Φαίνονται ο διαλύτης, η ρητίνη και τα κουτιά εγκιβωτισμού καθώς επίσης και τρία από τα δοκίμια μας.

Το επόμενο βήμα προκειμένου να έχουμε καθαρή εικόνα για την παρατήρηση των δοκιμίων μας ήταν η λείανση και η στίλβωσή τους σε ειδικό μηχάνημα λείανσης. Τα γυαλόχαρτα που χρησιμοποιήσαμε με σειρά τραχύτητας είναι τα 220, 300, 500, 700, 800, 1000, 1200, 1500, 2400 και το τελικό φινίρισμα έγινε με χρήση αλοιφής στίλβωσης σε βελουτέ πλάκα.

4.2 Οπτική παρατήρηση

Τα εγκιβωτισμένα δοκίμιά μας απαλλαγμένα πλέον από ατέλειες (γρατζουνιές, ξένα σώματα, οξειδώσεις), βλέπε εικόνα 10, τοποθετήθηκαν σε ένα οπτικό μικροσκόπιο Leica τύπου DMR με προδιαγραφές : operating temp. 10-36°C, overvoltage category 2, contamination class 2 και μεγεθύνσεων X50,100,200,500,1000 προκειμένου να παρατηρηθούν λεπτομερώς. Για τη λήψη φωτογραφιών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα επεξεργασίας εικόνας Image Pro Plus for Windows Ver1.3 της media cybernetics.



Εικόνα 10: Οπτική απεικόνιση των δοκιμίων με οπτικό μικροσκόπιο τύπου Leitz OTILUX της Leica σε μεγέθυνση X4

4.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Συνοπτικά αναφερόμενοι στις αλλαγές που προέκυψαν από την κατεργασία της έλασης στα δοκίμια μας μπορούμε να τις κατηγοριοποιήσουμε σε

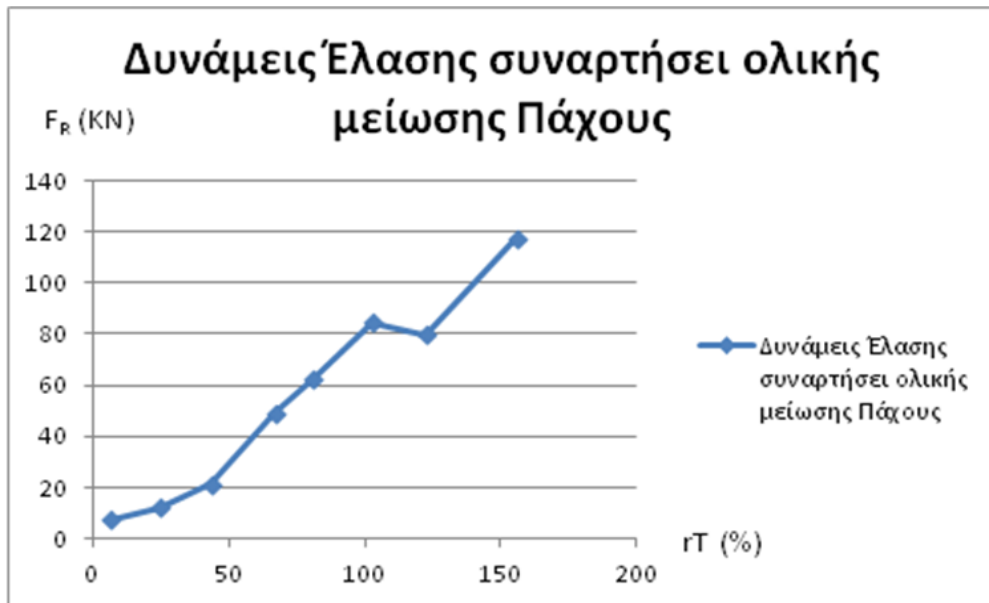
- Τραχύτητα και Μορφολογία επιφάνειας
- Ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης και μεταλλουργικών αλλαγών
- Παραμένουσες τάσεις λόγω της παραμόρφωσης

Τραχύτητα και μορφολογία

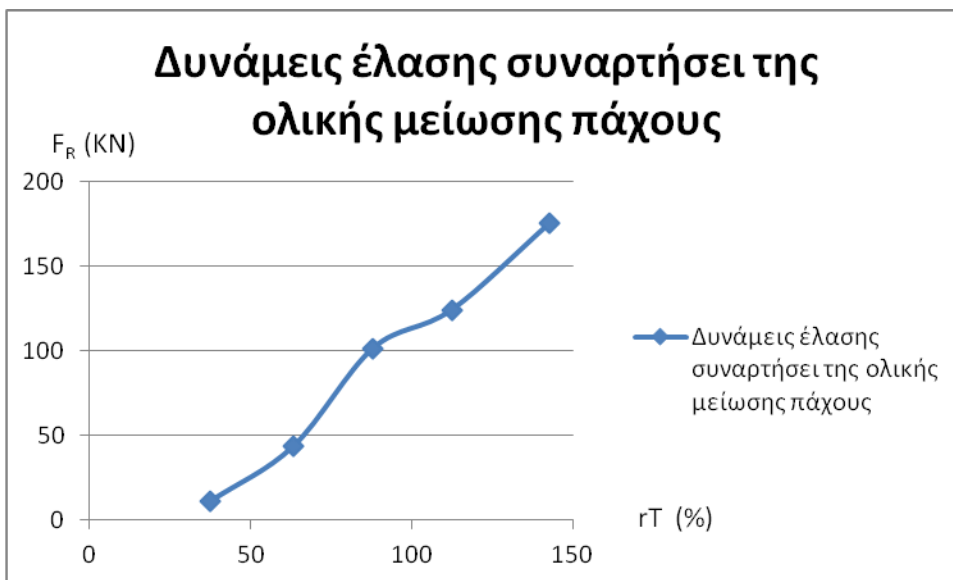
Σχετικά με την τραχύτητα των δοκιμίων έχει καταγραφεί μέσω της οπτικής παρατήρησης για κάθε δοκίμιο μία εμπειρική εκτίμηση σε συνδυασμό με την επιβαλλόμενη ποσοστιαία μείωση του πάχους για κάθε πάσο στο τέταρτο κεφάλαιο. Λόγω της ευρείας αποκόλλησης και της μη σταθερής επιφάνειας του πυρήνα δεν κατέσται δυνατή η λήψη μετρήσεων τραχύτητας με πειραματικό όργανο, γι' αυτό και οι εκτιμήσεις αυτές είναι βασισμένες στην εμπειρική οπτική παρατήρηση και αποτελούν υποκειμενικές εκτιμήσεις συνοδευόμενες από φωτογραφικό υλικό για κάθε στάδιο της κατεργασίας και αιτιολογούνται με βάση την απλή λογική. Σημαντικό στοιχείο είναι ακόμη ότι η κατεργασία της έλασης πραγματοποιήθηκε σε ψυχρές συνθήκες απουσία λίπανσης και με σταθερή ταχύτητα ενώ τα δοκίμια δεν είχαν υποστεί κάποια προηγούμενη επεξεργασία λείανσης με αποτέλεσμα η τραχύτητα της χαλκοραφής στη μία πλευρά των δοκιμίων να επηρεάζει σημαντικά τη μορφολογία και την τραχύτητα των δοκιμίων καθόλα τα στάδια της έλασης. Επιπλέον η επιφανειακή τραχύτητα των ραούλων θα πρέπει να θεωρηθεί σταθερή και αμετάβλητη καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής εργασίας. Κατ' επέκταση οι μεταβολές της τοπογραφίας της επιφάνειας πρέπει να θεωρηθούν ως συνάρτηση μόνο της ποσοστιαίας μείωσης του πάχους.

Επαγωγικά σκεπτόμενοι μπορούμε να πούμε ότι καθώς αυξάνεται η ποσοστιαία μείωση του πάχους η τιμή της τραχύτητας μειώνεται τείνοντας να φτάσει την τιμή της τραχύτητας των ραούλων.

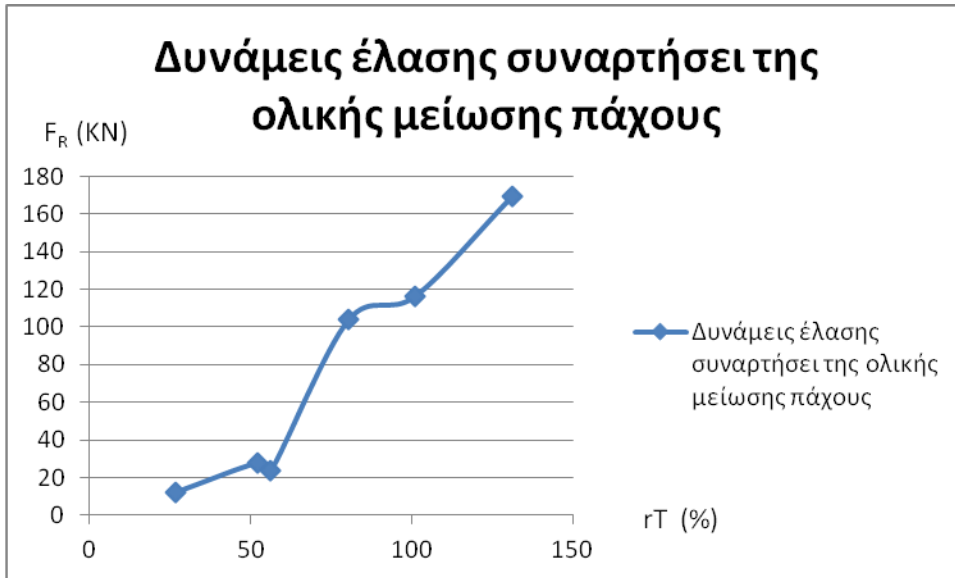
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της δύναμης έλασης συναρτήσει της ολικής μείωσης πάχους για κάθε δοκίμιο .



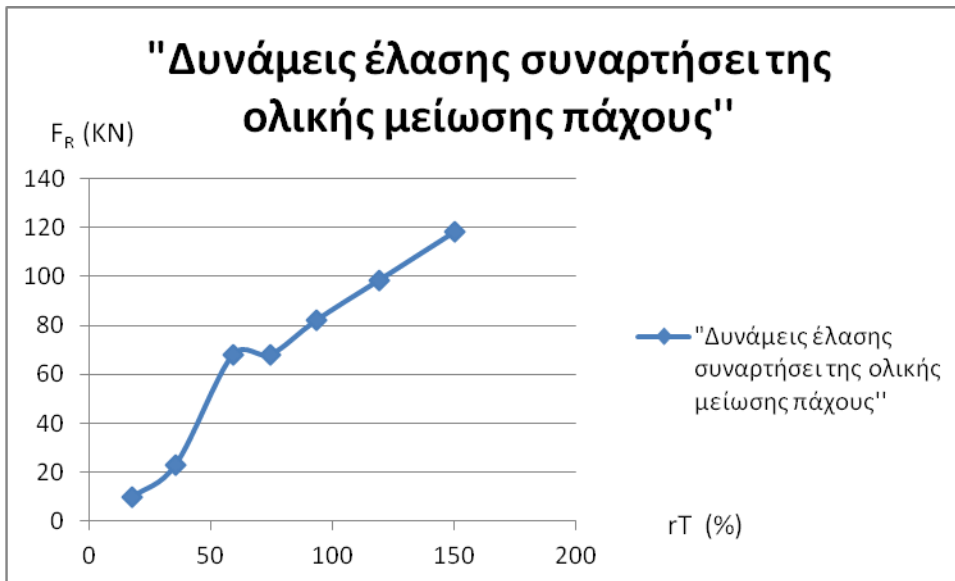
Σχ.14 Δυνάμεις έλασης (exper.) τριμεταλλικού Α (Cu -) συναρτήσει της ολικής μείωσης πάχους r_T .



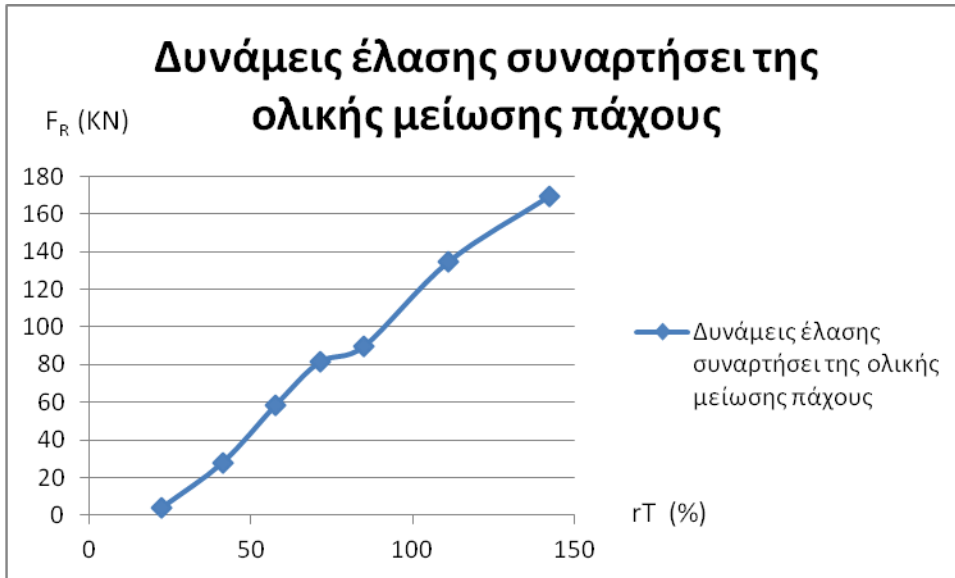
Σχ.15 Δυνάμεις έλασης (exper.) τριμεταλλικού Β (-) συναρτήσει της ολικής μείωσης πάχους r_T .



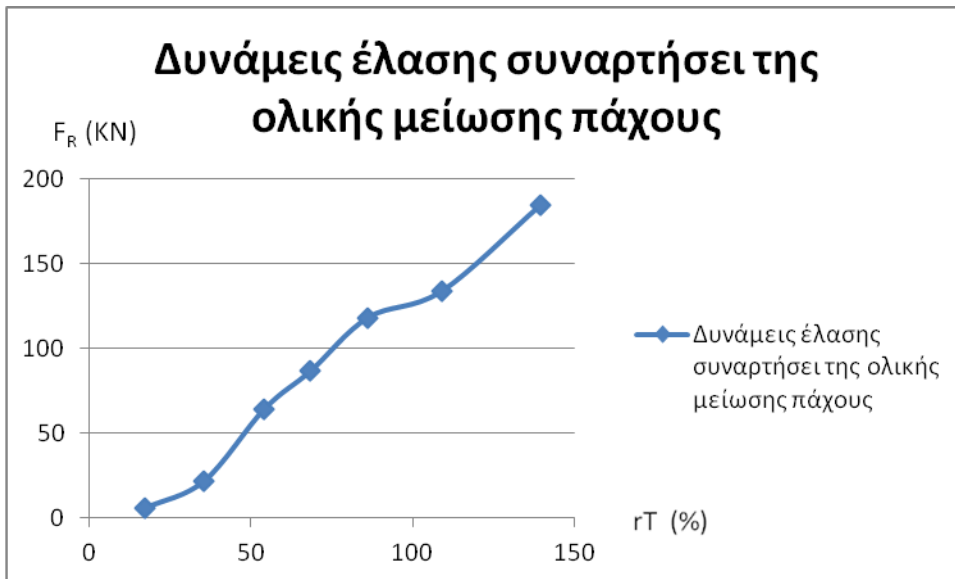
Σχ.16 Δυνάμεις έλασης (exper.) τριμεταλλικού Γ (-) συναρτήσει της ολικής μείωσης πάχους r_T .



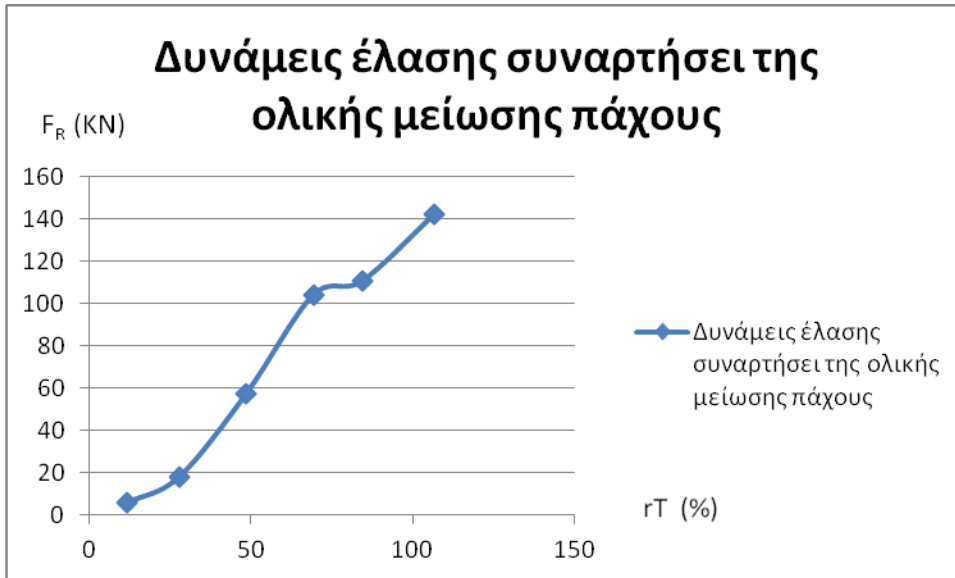
Σχ.17 Δυνάμεις έλασης (exper.) τριμεταλλικού Δ (-) συναρτήσει της ολικής μείωσης πάχους r_T .



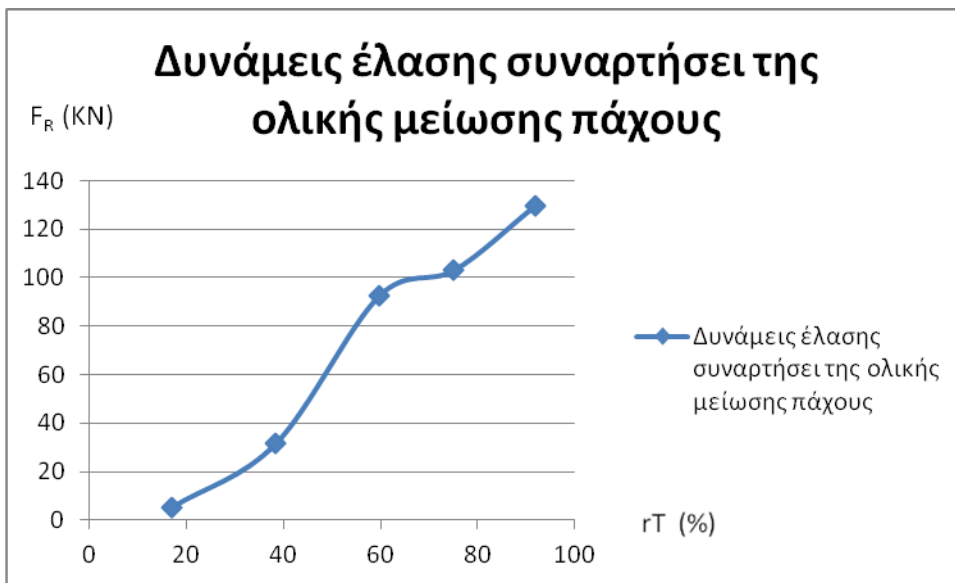
Σχ.18 Δυνάμεις έλασης (exper.) τριμεταλλικού E (-) συναρτήσει της ολικής μείωσης πάχους r_T .



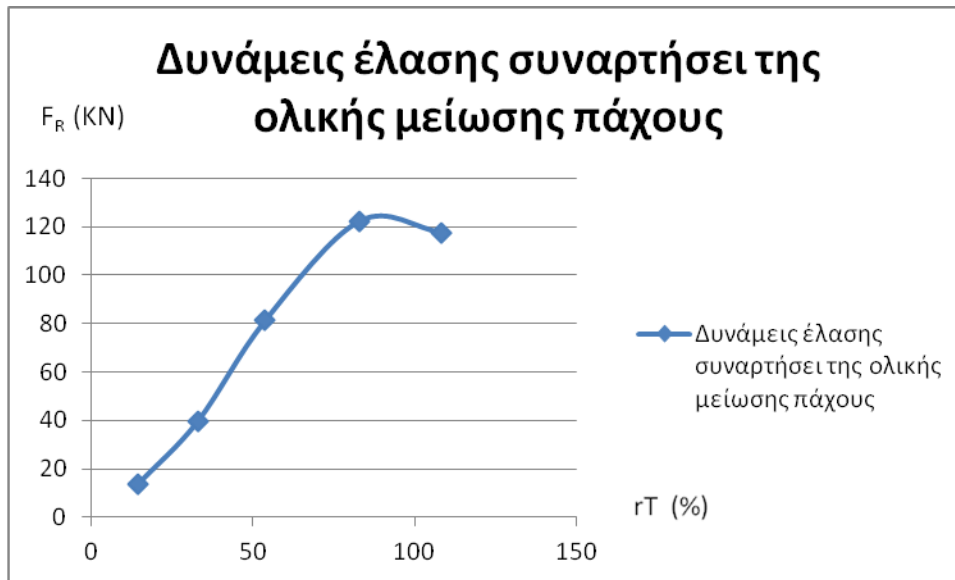
Σχ.19 Δυνάμεις έλασης (exper.) τριμεταλλικού Z (-) συναρτήσει της ολικής μείωσης πάχους r_T .



Σχ.20 Δυνάμεις έλασης (exper.) τριμεταλλικού Η (-) συναρτήσει της ολικής μείωσης πάχους r_T .



Σχ.21 Δυνάμεις έλασης (exper.) τριμεταλλικού Κ (-) συναρτήσει της ολικής μείωσης πάχους r_T .

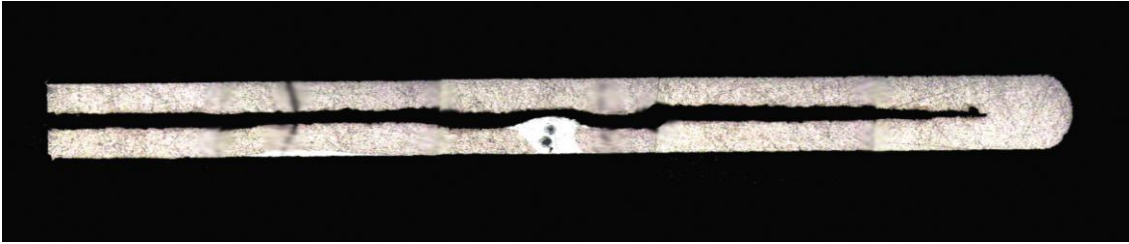


Σχ.22 Δυνάμεις έλασης (exper.) τριμεταλλικού I (-) συναρτήσει της ολικής μείωσης πάχους r_T .

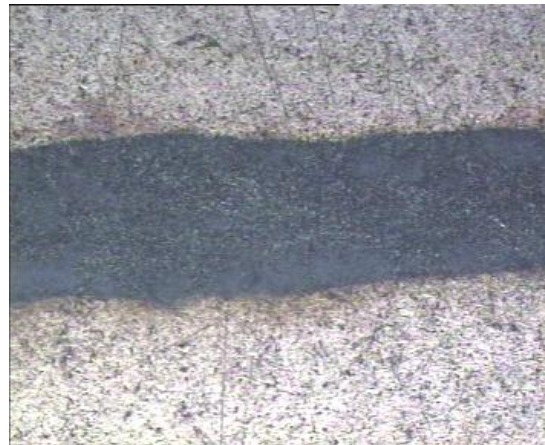
Παρατηρούμε ότι σε όλα τα διαγράμματα έχουμε μία σχεδόν γραμμική αύξηση στη δύναμη έλασης για κάθε πάσο και την επακόλουθη μείωση του πάχους. Δηλαδή υφίσταται κάποια εργοσκήρυνση που οδηγεί σε αύξηση της δύναμης έλασης για την ίδια παραμόρφωση κάθε φορά. Αυτό αντιμετωπίζεται με χρήση θερμικών κατεργασιών των δοκιμίων πριν η κατά τη διάρκεια της έλασης

Ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης

- Διεπιφάνεια χαλκός – σκ. αλουμινίου, Cu- Al , δοκίμιο Α



Μεγέθυνση X10



Μεγέθυνση X20

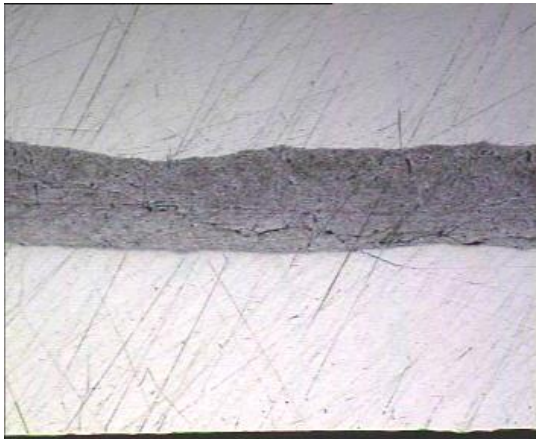
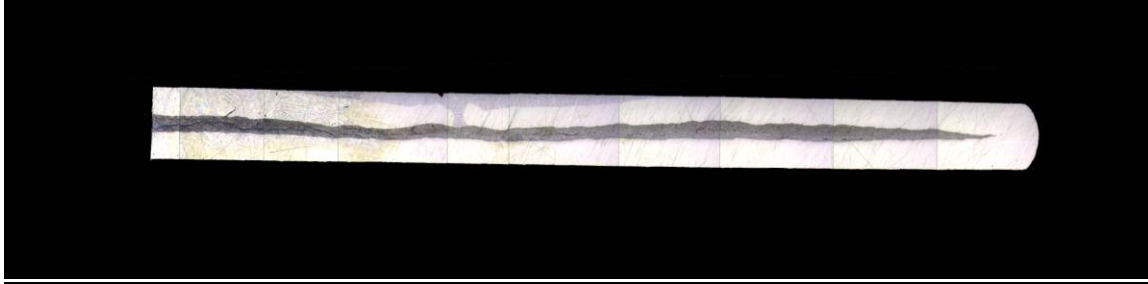


Μεγέθυνση X20

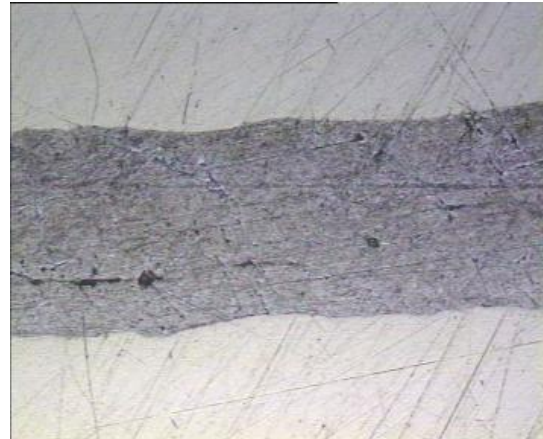


Μεγέθυνση X50

- Διεπιφάνεια ορείχαλκος – σκ. Αλουμινίου, - Al δοκίμιο B



Μεγέθυνση X10



Μεγέθυνση X20

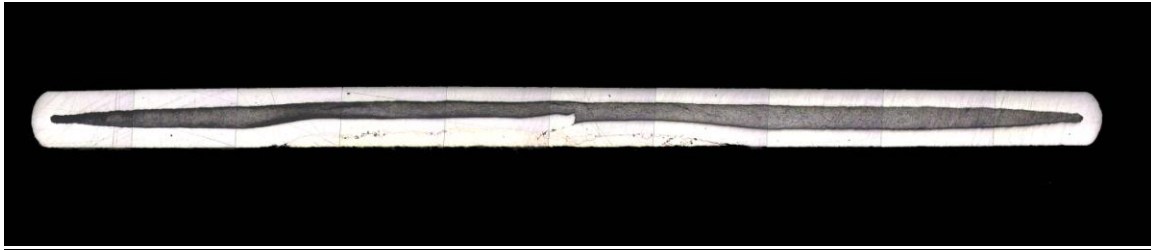


Μεγέθυνση X50

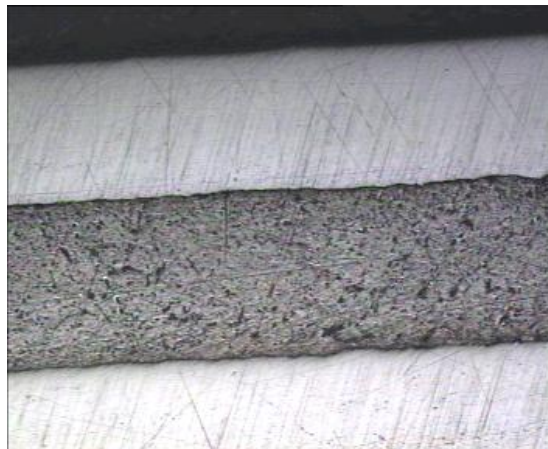


Μεγέθυνση X50

- Διεπιφάνεια χάλυβας – σκ. αλουμινίου, Fe – Al , δοκίμιο Γ



Μεγέθυνση X5



Μεγέθυνση X10

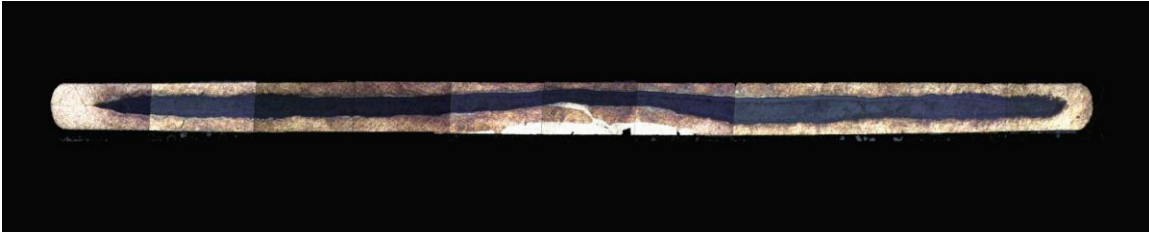


Μεγέθυνση X20



Μεγέθυνση X50

- Διεπιφάνεια χαλκός – σκ. μαγνησίου , Cu – Al , δοκίμιο Δ



Μεγέθυνση X10



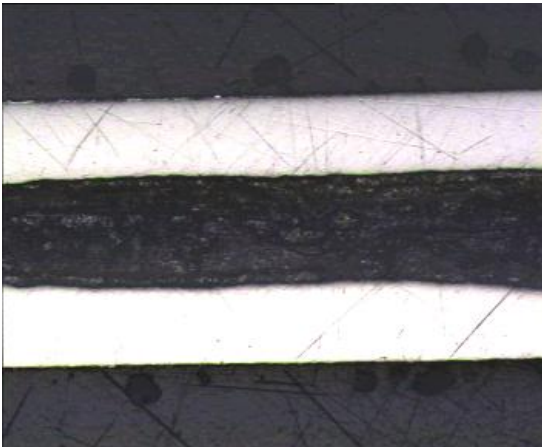
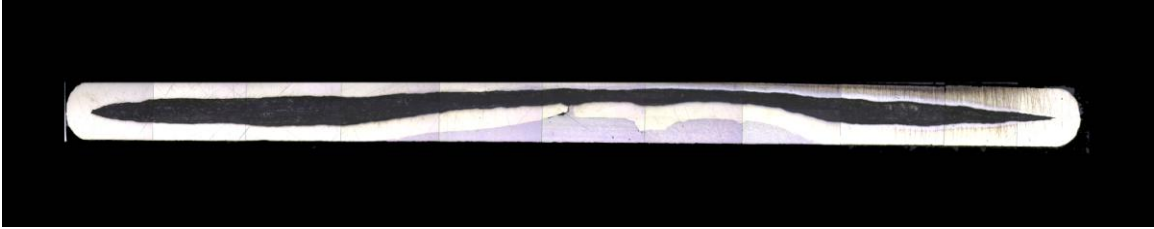
Μεγέθυνση X10

- Διεπιφάνεια χάλυβας – σκ. μαγνησίου, Fe – Mg , δοκίμιο E

Δεν έγινε μεταλλογραφική παρατήρηση λόγω εκτενούς παραμόρφωσης του δοκιμίου.



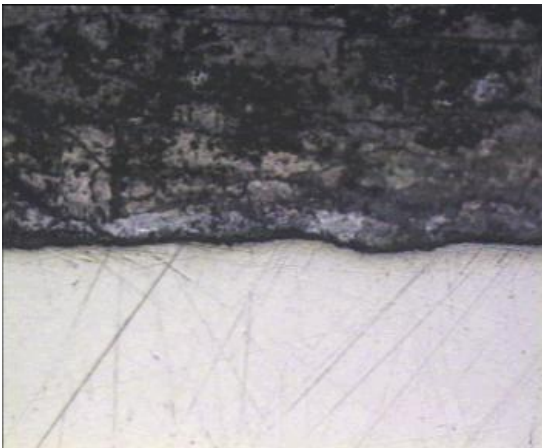
- Διεπιφάνεια ορείχαλκος – σκ. μαγνησίου, – Mg , δοκίμιο Z



Μεγέθυνση X5



Μεγέθυνση X10

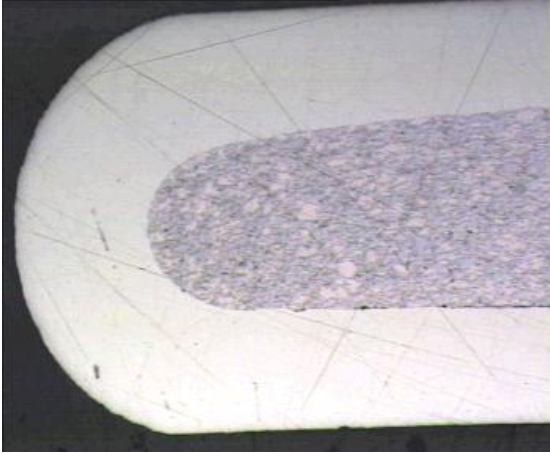
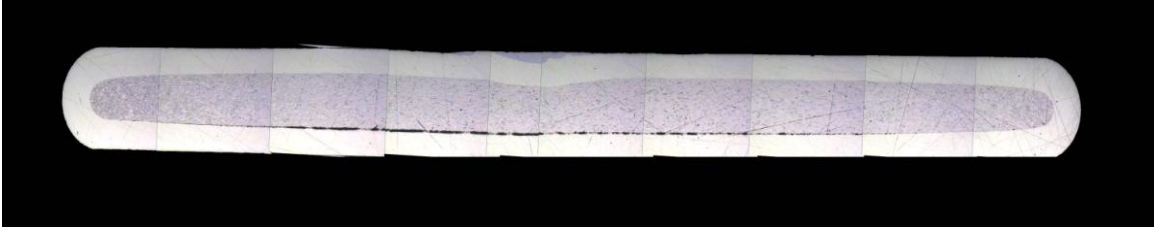


Μεγέθυνση X20

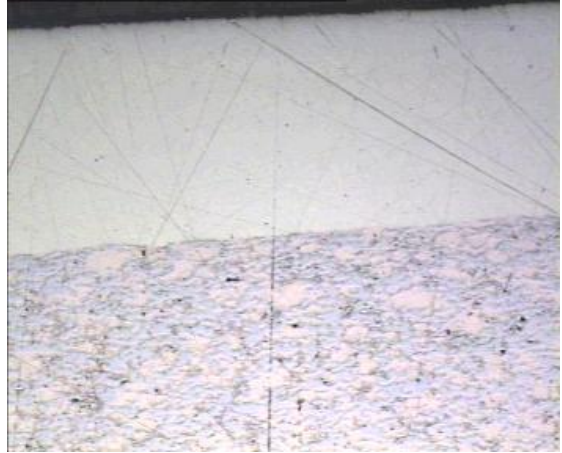


Μεγέθυνση X20

- Διεπιφάνεια ορείχαλκος – σκ. χαλκού, – Cu , δοκίμιο Η



Μεγέθυνση X5



Μεγέθυνση X10

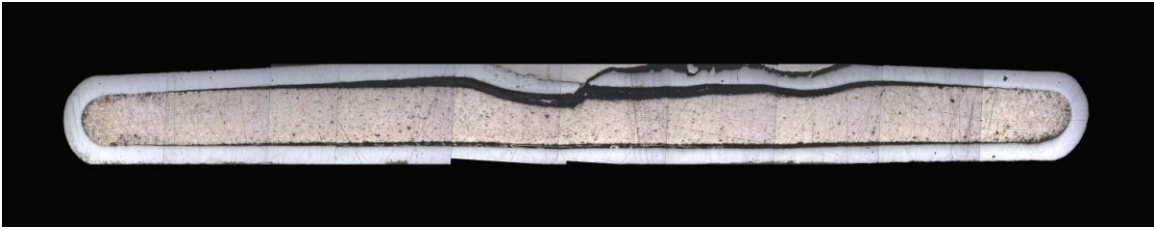


Μεγέθυνση X20

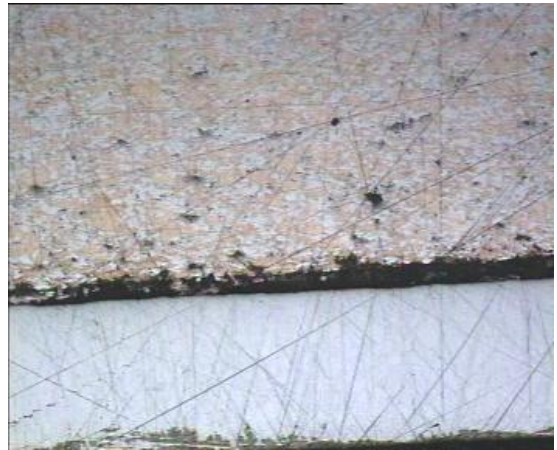


Μεγέθυνση X50

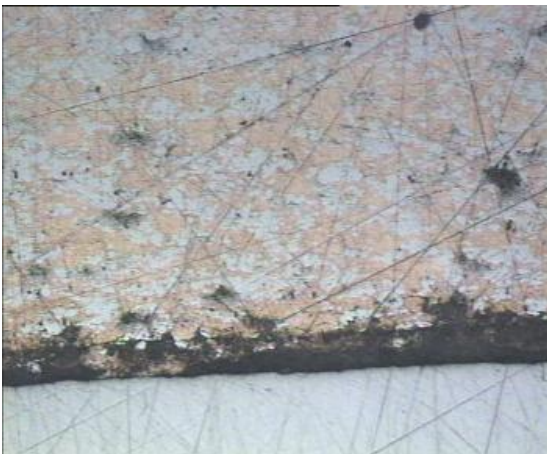
- Διεπιφάνεια χάλυβας – σκ. χαλκού, Fe – Cu , δοκίμιο K



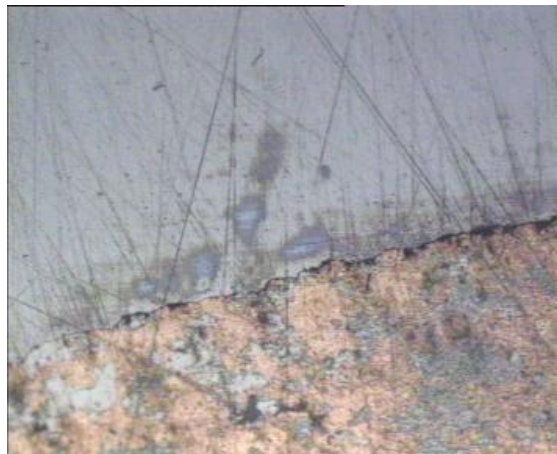
Μεγέθυνση X10



Μεγέθυνση X10



Μεγέθυνση X20



Μεγέθυνση X50

- Διεπιφάνεια χαλκός – σκ. χαλκού, Cu – Cu , δοκίμιο I



Μεγέθυνση X10



Μεγέθυνση X10



Μεγέθυνση X20



Μεγέθυνση X20

Συνοπτικά οι συνδυασμοί υλικών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν Cu-Al, Cu-Mg, Cu-Cu, Brass-Al, Brass-Mg, Brass-Cu, Fe-Al, Fe-Mg, Fe-Cu και η έλαση έγινε χωρίς λίπανση σε 8 πάσσα για το Cu-Al με ολική μείωση πάχους 155%, ενώ για το Cu-Mg σε 7 πάσσα και με ολική μείωση πάχους 150,35%, αντίστοιχα για το Cu-Cu σε 5 πάσσα με ολική μείωση 108,1%, Brass-Al σε 5 πάσσα με μείωση του πάχους 142,8%, Brass-Mg σε 7 πάσσα με μείωση του πάχους 139,4%, Brass-Cu σε 6 πάσσα με μείωση του πάχους 106,7%, Fe-Al σε 6 πάσσα με μείωση του πάχους 131,1%, Fe-Mg σε 7 πάσσα με μείωση του πάχους 142,1%, Fe-Cu σε 5 πάσσα με μείωση του πάχους 91,8%.

Η δύναμη της έλασης που ασκήθηκε έφτασε τις τιμές 117,42 για το συνδυασμό *χαλκός – αλουμίνιο*, τα 118,35 για το συνδυασμό *χαλκός – μαγνήσιο*, τα 117,7 για το συνδυασμό *χαλκός – χαλκός*, τα 142,06KN για το συνδυασμό *ορείχαλκος – χαλκός*, τα 184,18KN για το συνδυασμό *ορείχαλκος – μαγνήσιο*, τα 175,05 για το συνδυασμό *ορείχαλκος – αλουμίνιο*, τα 169,66KN για το συνδυασμό *χάλυβας – αλουμίνιο*, τα 169,17KN για το συνδυασμό *χάλυβας – μαγνήσιο* και τα 129,85KN για το συνδυασμό *χάλυβας – χαλκός*.

Σε κανένα από τα δοκίμια που υπέστησαν ψυχρή έλαση η διεπιφάνεια δεν είχε καλή πρόσφυση όπως βλέπουμε και από τις φωτογραφίες. Υπάρχουν ρηγματώσεις και ασυνέχειες σε αρκετά δοκίμια μας και παρατηρούμε αρκετά ελαττώματα λόγω έλασης στην επιφάνεια των δοκιμίων μας. Η θερμή έλαση ενδείκνυται περισσότερο για έλαση πολυστρωματικού με πυρήνα μεταλλικής σκόνης εφόσον η θερμοκρασία δεν θα επηρεάσει τις επιθυμητές ιδιότητες της σκόνης (π.χ. απομαγνητισμός).

Βιβλιογραφία

- [1] Maki S, Nakamura M, Matsuda T, Nagai N. Influence of rolling condition on bond strength in cladding of steel sheet with aluminum. *Journal of Japan Society for Technology of Plasticity* 1989;30:71.
- [2] Nakamura M, Maki S, Matsuda T, Nagai N. Cold bonding of metal sheets using mutual sliding by modified contact differential speed rolling. *Journal of Japan Society for Technology of Plasticity* 1988;29:404.)
- [3] Shirota T, Dendo T. Some experiments on clad rolling by planetary mill in cold stage. *Journal of Japan Society for Technology of Plasticity* 1983;24:53.
- [4] Shirota T, Dendo T. Effect of rolling conditions on bonding behavior in cold clad rolling by planetary mill. *Journal of Japan Society for Technology of Plasticity* 1983;24:480.)
- [5] R. Hawkins, J.C. Wright, Observation on the deformation properties of sandwich materials, *Int. J. Mech. Sci.* 14 (1972) 875–883.
- [6] A.A. Afonja, D.H. Sansome, A theoretical analysis of the sandwich rolling process, *Int. J. Mech. Sci.* 15 (1973) 1–14.
- [7] R.R. Arnold, P.W. Witton, Stress and deformation studies for sandwich rolling hard metals, *Proc. Inst. Mech. Eng.* 173 (8) (1959).
- [8] S.L. Semiatin, H.R. Piehler, Formability of sandwich sheet materials in plain strain compression and rolling, *Met. Trans.* 10A (1979) 97–107.
- [9] A.G. Atkins, A.S. Weinstein, The deformation of sandwich materials, *Int. J. Mech. Sci.* 12 (1970) 641–657.
- [10] L.R. Vaidyanath, M.G. Nicholas, D.R. Milner, Pressure welding by rolling, *Brit. Weld. J.* 6 (1959) 13–28.
- [11] J.M. Park, Recrystallization welding, *Weld. J.* (1953) 209s–221s.
- [12] K.J.B. McEwan, D.R. Milner, Pressure welding of dissimilar metals, *Brit. Weld. J.* (1962) 406–420.
- [13] R.F. Tylecote, D. Howd, J.R. Furmidge, The influence of surface films on the pressure welding of metals, *Brit. Weld. J.* 5 (1958) 21–38.
- [14] H.A. Mohamed, J. Washburn, Mechanism of solid state pressure welding, *Weld. J.* (1975) 302s–310s.
- [15] D. Pan, K. Gao, J. Yu, Cold roll bonding of bimetallic sheets and strips, *Mater. Sci. Technol.* 5 (1989) 934–939.
- [16] N. Bay, Cold welding. Part I. Characteristic, bonding mechanisms, bond strength, *Met. Construct.* (1986) 369–372.
- [17] N. Bay, Cold welding. Part II. Process variants and application, *Met. Construct.* (1986) 486–490.
- [18] W. Zhang, N. Bay, Influence of hydrostatic pressure in cold-pressure welding, *Ann. CIRP* (1) (1992) 293.
- [19] W. Zhang, N. Bay, Cold welding-fractographic investigation of the weld formation, *Weld. J.* (1997) 361s–366s.
- [20] W. Zhang, N. Bay, Cold welding-theoretical modeling of the weld formation, *Weld. J.* (1997) 417s–420s.
- [21] W. Zhang, N. Bay, Cold welding-experimental investigation of the surface preparation methods, *Weld. J.* (1997) 326s–330s.
- [22] Kalpakjian S. , *Manufacturing processes for engineering materials*, Addison – Wesley Publ. Co. (1997)
- [23] A.G. Mamalis, W. Johnson, Defects in the processing of metals and composites, in : M.Predeleanou (Ed.), *Computational methods for predicting material processing defects*, Elsevier , Amsterdam (1987) , pp.231-250
- [24] Δ.Ε.Μανωλάκος *Κατεργασίες Ι Βιβλίο σημειώσεων σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα (2010)*
- [25] A.A. Afonja, D.R. Sansome, An experimental investigation of the sandwich rolling of thin hard sheets, in: *Proceedings of the 13th International MTDR Conference*, September 1972, pp. 12–18.
- [26] G.Y. Tzou, K.I. Lee, H.R. Jian, J.C. Lion, Analysis of the cold and hot bond rolling of clad sheet, *Met. Form.* (2000) 315–321.
- [27] Y.M. Hwang, G.Y. Tzou, An analytical approach to asymmetrical cold and hot rolling of clad sheet using the slab method, *J. Mater. Proc. Tech.* 62 (1996) 249–259
- [28] Z.C. Lin, T.G. Huang, Different degree of reduction and sliding phenomenon study for three dimensional hot rolling with sandwich flat strip, *Int. J. Mech. Sci.* 42 (2000) 1983–2012.

ΕΛΑΣΗ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ "ΣΑΝΤΟΥΙΤΣ"

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΙΧΑΗΛ Κ. ΛΑΖΑΡΙΔΗ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Δ. Μανωλάκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. Παντελής, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χ. Παναγόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2011