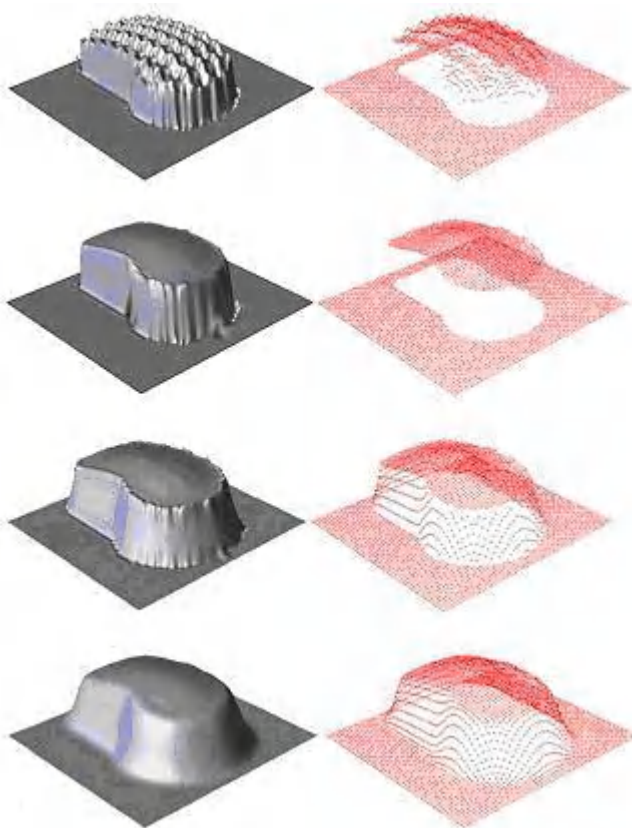




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ «ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ»

ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ
ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ
ΘΕΡΜΟΜΟΡΦΩΣΗΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΚΑΡΑΒΑΤΣΙΟΥ ΣΤΑΥΡΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2009

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Η εργασία αναφέρεται σε μεθόδους μορφοποίησης πολυμερών υλικών. Γίνεται αναφορά κάποιων ιστορικών στοιχείων αυτής, μελετούνται τα στάδια και τα είδη των μηχανών που χρησιμοποιούνται καθώς και οι διάφορες τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα.

Θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον διευθυντή του τομέα Κατεργασιών και επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Δημ. Μανωλάκο για την συμπαράσταση και εμπιστοσύνη που μου έδειξε, καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Γεωρ. Κουζίλο για τη βοήθεια του σε τεχνικά θέματα. Η ολοκλήρωση της εργασίας αυτής θα ήταν αδύνατη χωρίς την βοήθεια τους. Επίσης θα πρέπει να ευχαριστήσω το διδακτικό και υπαλληλικό προσωπικό για την βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στους γονείς μου, για την υπομονή, την κατανόηση και την πολύτιμη συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών και να αφιερώσω την εργασία αυτή στα παιδιά και στη γυναίκα μου.

Αθήνα, Οκτώβριος 2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ.....	11
1.1. Εισαγωγή	1Error! Bookmark not defined.
1.2. Είδη Πολυμερών Υλικών.....	1Error! Bookmark not defined.
1.3. Πολυμερισμός	24
Βιβλιογραφία 1 ^ο Κεφαλαίου.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ	
ΥΛΙΚΩΝ	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.7
2.1. Εισαγωγή	Error! Bookmark not defined.8
2.2. Μορφοποίηση Θερμοπλαστικών Υλικών	29
2.3. Μορφοποίηση Θερμοσκληρυνόμενων Πολυμερών και Ελαστομερών	39
2.4. Ελαττώματα Προϊόντων Μορφοποίησης Μέσω Τήγματος	41
2.5. Παραγωγή Αφρώδων Πολυμερών	42
2.6. Τεχνικές Σύνδεσης Πολυμερών	44
Βιβλιογραφία 2 ^ο Κεφαλαίου.....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΙΣΤΟΡΙΑ - ΣΤΑΔΙΑ ΘΕΡΜΟΜΟΡΦΩΣΗΣ	46
3.1. Εισαγωγή	47
3.2. Προϊόντα Θερμομόρφωσης.....	51
3.3. Περιγραφή Θερμομόρφωσης	53
3.3.1. Χαρακτηριστικά Θερμομόρφωσης	53
3.3.2. Στάδια Θερμομόρφωσης.....	62
Βιβλιογραφία 3 ^ο Κεφαλαίου.....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΜΟΡΦΩΣΗΣ	68
4.1. Εισαγωγή	69
4.2. Διαμόρφωση σε Κενό	69
4.3. Διαμόρφωση υπό Πίεση	70
4.4. Ελεύθερη Διαμόρφωση, μέσω Κύματος ή Φυσαλίδων	71
4.5. Διαμόρφωση υπό Σκεπάσματος	72
4.6. Διαμόρφωση με βοήθεια Εμβόλου	72
4.7. Διαμόρφωση με Εφαρμογή Κύματος - Τεχνική Αντίστροφης Εξαγωγής.....	77
4.8. Διαμόρφωση με Αιφνιδιαστικό Κρότο	78

4.9. Διαμόρφωση Αντίστροφης Εξαγωγής με βοήθεια Εμβόλου	78
4.10. Σχεδιασμός Χυτών Θερμομόρφωσης με χρήση Αντίστροφης Εφαρμοσμένης Μηχανικής.....	79
Βιβλιογραφία 4 ^ο Κεφαλαίου.....	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΙΔΗ ΜΗΧΑΝΩΝ ΘΕΡΜΟΜΟΡΦΩΣΗΣ	98
5.1. Εισαγωγή	99
5.2. Μηχανές Λεπτών Κατασκευών	99
5.3. Μηχανές Βαρέων Κατασκευών.....	102
Βιβλιογραφία 5 ^ο Κεφαλαίου	105
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΡΜΟΜΟΡΦΩΣΗΣ	106
6.1. Εισαγωγή	107
6.2.Μεταφορά Θερμότητας με Ακτινοβολία	109
Βιβλιογραφία 6 ^ο Κεφαλαίου.....	123
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ	
ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.24
7.1. Εισαγωγή	Error! Bookmark not defined.5
7.2. Υπερελαστικό Μοντέλο Mooney - Rivlin .	Error! Bookmark not defined.
7.3. Προσαρμογή Παραμέτρων Μοντελοποίησης.	Error! Bookmark not defined.
7.4. Μοντελοποίηση με Πεπερασμένα Στοιχεία.	Error! Bookmark not defined.
Βιβλιογραφία 7 ^ο Κεφαλαίου.....	Error! Bookmark not defined.3
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Κατεργασίες Μορφοποίησης Θερμοπλαστικών Υλικών	38
Πίνακας 2.2: Κατεργασίες Μορφοποίησης Θερμοσκληρυνόμενων Υλικών.....	41
Πίνακας 3.1: Σύγκριση Τεσσάρων Θερμοπλαστικών Διαδικασιών.....	50-51
Πίνακας 3.2: Κατάλογος Προϊόντων Θερμομόρφωσης	51-52
Πίνακας 3.3: Είδη Φύλλων Θερμομόρφωσης	56-57
Πίνακας 3.4: Είδη Ηλεκτρικών Θερμαντήρων Ακτινοβολίας	58-59

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Πολυαιθυλένιο.....	14
Σχήμα 1.2: Πολυστυρένιο.....	14
Σχήμα 1.3: Καουτσούκ.....	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 1.4: Ελαστικό αυτοκινήτου.....	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 1.5: Spandex.....	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 1.6: Πλαστικά υλικά.....	19
Σχήμα 1.7: Χημικός τύπος Delrin.....	19
Σχήμα 1.8: Γρανάζια από Delrin.....	19
Σχήμα 1.9: Δοχείο Θερμομόνωσης από Styrofoam.....	20
Σχήμα 1.10: Lego τούβλο.....	20
Σχήμα 1.11: Υλικό από PVC.....	21
Σχήμα 1.12: Ρούχο από Lycra.....	22
Σχήμα 1.13: Μοριακός τύπος εποξικής ρητίνης.....	23
Σχήμα 1.14: Ίνες από φάιμπεργκλας.....	23
Σχήμα 1.15: Μοντέλο αεροπλάνου F-15 από φάιμπεργκλας.....	23
Σχήμα 1.16: Μοριακός τύπος του Kevlar.....	24
Σχήμα 1.17: Μοριακός τύπος της σιλικόνης.....	24
Σχήμα 2.1: Μέθοδος εκβολής.....	29
Σχήμα 2.2: Τμήματα του κοχλία εκβολής.....	30
Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστικά μεγέθη του κοχλία εκβολής.....	30
Σχήμα 2.4: Μορφοποίηση φύλλου με συμπίεση.....	31
Σχήμα 2.5: Στάδια χύτευσης με τη μέθοδο της έγχυσης.....	32
Σχήμα 2.6: Τρόποι Έγχυσης.....	32
Σχήμα 2.7: Χύτευση με αντίδραση και έγχυση.....	33
Σχήμα 2.8: Στάδια μορφοποίησης με εμφύσηση μετά από εκβολή.....	34
Σχήμα 2.9: Θερμομόρφωση υπό κενό (α) και υπό πίεση (β).....	35
Σχήμα 2.10: Μεταβολή του πάχους του υπο θερμομόρφωση δοκιμίου.....	36
Σχήμα 2.11: Μορφοποίηση πολυμερούς με κύλινδρους.....	36-37
Σχήμα 2.12: Μορφοποίηση πολυμερούς με μέθοδο ινοποίησης.....	38
Σχήμα 2.13: Χύτευση με συμπίεση.....	39
Σχήμα 2.14: Χύτευση με μεταφορά.....	40
Σχήμα 3.1: Παραγωγή Θερμομόρφωσιμων Υλικών στις Η.Π.Α.....	48

Σχήμα 3.2: Η εξέλιξη της θερμομόρφωσης	49
Σχήμα 3.3: Διαμόρφωση με αρσενικό ή θετικό καλούπι.....	59
Σχήμα 3.4: Διαμόρφωση με θηλυκό ή αρνητικό καλούπι	59
Σχήμα 3.5: Παράδειγμα διαμόρφωσης με αρσενικό καλούπι.....	60
Σχήμα 3.6: Παράδειγμα διαμόρφωσης με έμβολο	60
Σχήμα 3.7: Μηχανή FFS.....	61
Σχήμα 3.8: Μηχανή τροφοδοσίας φύλλου μικρής διαδρομής	62
Σχήμα 3.9: Ηλεκτρομαγνητικές περιοχές	63
Σχήμα 4.1: Διαδοχική σειρά θερμομόρφωσης υπό κενό	69
Σχήμα 4.2: Διαδοχική σειρά θερμομόρφωσης υπό πίεση.....	71
Σχήμα 4.3: Ελεύθερη διαμόρφωση σε κενό.....	71
Σχήμα 4.4: Διαδοχική σειρά μεθόδου Drape θερμομόρφωσης.....	72
Σχήμα 4.5: Διαδοχική σειρά μεθόδου θερμομόρφωσης με έμβολο	73
Σχήμα 4.6: Απεικόνιση εμβόλου.....	74
Σχήμα 4.7: Επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας R του εμβόλου.....	75
Σχήμα 4.8: Διαμόρφωση με εφαρμογή κύματος	77
Σχήμα 4.9: Διαμόρφωση με αιφνιδιαστικό κρότο.....	78
Σχήμα 4.10: Διαμόρφωση αντίστροφης εξαγωγής με βοήθεια εμβόλου.....	79
Σχήμα 4.11: Πρότυπο τεμάχιο για διαμόρφωση καλουπιού	80
Σχήμα 4.12: Κατασκευή καλουπιού από πηλό	81
Σχήμα 4.13: Στάδια αντίστροφης εφαρμοσμένης μηχανικής	83
Σχήμα 4.14: Σύστημα ψηφιοποίησης με σειρά ακίδων	85
Σχήμα 4.15: Μηχανές ψηφιοποίησης με σειρά ακίδων	86
Σχήμα 4.16: Ταξινόμηση χαρακτηριστικών γνωρισμάτων μητρών	86
Σχήμα 4.17: Τελεστής εξομάλυνσης μέσω λαπλασιανής εξίσωσης.....	88
Σχήμα 4.18: Διαδικασία εξομάλυνσης σημείων	89
Σχήμα 4.19: Κώδικας λαπλασιανής εξίσωσης	90
Σχήμα 4.20: Κώδικας για διαμόρφωση πλευρικών τοιχωμάτων	91
Σχήμα 4.21: Εξομάλυνση γωνιών και πλευρικών τοιχωμάτων	92
Σχήμα 4.22: Εξομάλυνση με διαμόρφωση κατά λωρίδες και χάσματος	93-94
Σχήμα 4.23: Μοντέλο ποντικιού για επίδειξη.....	94
Σχήμα 4.24: Σύστημα ψηφιοποίησης με ακίδες.....	95
Σχήμα 4.25: Διαδικασία μοντελοποίησης μήτρας με εξομάλυνση	95
Σχήμα 4.26: Μήτρα για κατασκευή ποντικιού μέσω θερμομόρφωσης	96

Σχήμα 5.1: Μηχανή λεπτών κατασκευών	101
Σχήμα 5.2: Στάδια μηχανής λεπτών κατασκευών	102
Σχήμα 5.3: Παραδείγματα χρήσης μηχανών λεπτών κατασκευών	102
Σχήμα 5.4: Μηχανή βαρέων κατασκευών	103
Σχήμα 5.5: Μηχανή βαρέων κατασκευών με ρότορα.....	104
Σχήμα 6.1: Επιρροή θερμοκρασίας στη θερμομόρφωση.....	108
Σχήμα 6.2: Διάγραμμα ενεργειακής ροής.....	109
Σχήμα 6.3: Προσεγγιστικός υπολογισμός θερμότητας με ακτινοβολία	111
Σχήμα 6.4: Χαρακτηριστική καμπύλη εξίσωσης (a).....	112
Σχήμα 6.5: Γραφική παράσταση εξίσωσης (a) στο κέντρο του φύλλου	112
Σχήμα 6.6: Γραφική παράσταση εξίσωσης (a) στην επιφάνεια φύλλου	113
Σχήμα 6.7: Συσκευή μέτρησης θερμοκρασίας.....	113
Σχήμα 6.8: Επίδραση της απόστασης των θερμαντικών στοιχείων στην κατανομή της θερμοκρασίας και του πάχους του φύλλου	114
Σχήμα 6.9: Ροή θερμότητας.....	115
Σχήμα 6.10: Πίνακας σταθερών	116
Σχήμα 6.11: Θερμοκρασιακή κατανομή χρωματισμένου φύλλου PMMA.....	117
Σχήμα 6.12: Περιοριστικός παράγοντας για θέρμανση δυο επιφανειών.....	118
Σχήμα 6.13: Επίδραση διαφορετικού εργαλείου απομάκρυνσης στη μέγιστη θερμοκρασία του φύλλου	119
Σχήμα 6.14: Σχεδιάγραμμα ηλεκτρικού κυκλώματος προσομοίωσης.....	121
Σχήμα 6.15: Κατανομή θερμοκρασίας κατά τη προσομοίωση	121
Σχήμα 7.1: Κατανομή γ -μετατόπισης του φύλλου.....	128
Σχήμα 7.2: Κατανομή πάχους του φύλλου	129
Σχήμα 7.3: Κατανομή του ύψους στο κέντρο της πάνω επιφάνειας του φύλλου ανάλογα της εφαρμοζόμενης πίεσης	129
Σχήμα 7.4: Κατανομή πάχους στο κέντρο της πάνω επιφάνειας του φύλλου σε σχέση με την εφαρμοζόμενη πίεση.....	130
Σχήμα 7.5: Συνάρτηση σχετικού πάχους αναλογικά της απόστασης από τον x-άξονα από το κέντρο της πάνω επιφάνειας του φύλλου	130
Σχήμα 7.6: Συνάρτηση σχετικού πάχους αναλογικά της απόστασης από τον z-άξονα από το κέντρο της πάνω επιφάνειας του φύλλου	131
Σχήμα 7.7: Πάχος τελικού προϊόντος.....	131
Σχήμα 7.8: Απόσταση μεταξύ μήτρας και σχηματιζόμενου φύλλου	132

Σχήμα 7.9: Μεταφορά θερμότητας από το θερμαντικό στοιχείο	136
Σχήμα 7.10: Μεταφορά ενέργειας/θερμοκρασίας από το θερμαντικό στοιχείο στο φύλλο	136
Σχήμα 7.11: Μηχανή θερμομόρφωσης Monark	137
Σχήμα 7.12: Μετρητής ρευστότητας	137
Σχήμα 7.13: Αναγνωριστική μήτρα κέρδους από μετρήσεις θερμοκρασίας.....	138
Σχήμα 7.14: Τυπικά προϊόντα προϊόντων από θερμομόρφωση με τη μέθοδο Niebling	141-142
Σχήμα 7.15: Στάδια θερμομόρφωσης υπό πίεση.....	143
Σχήμα 7.16: Φάσεις της διαδικασίας Niebling	143
Σχήμα 7.17: Διαφοροποιήσεις πραγματικής τάσης-παραμόρφωσης στους 100° C	145
Σχήμα 7.18: Διαφοροποιήσεις πραγματικής τάσης-παραμόρφωσης στους 200° C	145
Σχήμα 7.19: Αξονοσυμμετρικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων	150
Σχήμα 7.20: Διαδοχικά στάδια παραμόρφωσης κατά τη διαδικασία εμφύσησης στους 100° C.....	150
Σχήμα 7.21: Κατανομή πάχους στο παραμορφωμένο υλικό, με εφαρμογή διαφορετικής πίεσης, στους 100° C	151

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Πολυμερή Υλικά

1.1. Εισαγωγή

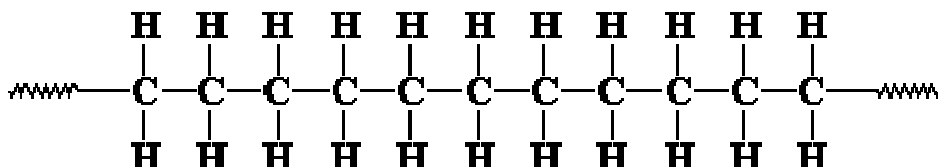
Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η επιστήμη των πολυμερών "γεννήθηκε", πραγματικά, τη δεκαετία του '20, όταν ο γερμανός χημικός Hermann Staudinger εισήγαγε για πρώτη φορά την έννοια του μακρομορίου. Μια θεώρηση που ερχόταν σε αντίθεση με την προγενέστερη εκδοχή του Naegeli περί "μεγαλομορίου" διαστάσεων κolloειδούς, το οποίο αποτελούσε άθροισμα μικρότερων μορίων συνδεδεμένων με ασθενείς δεσμούς ακαθόριστης φύσεως. Η θεωρία του Staudinger άρχισε να αποκτά υποστηρικτές στη δεκαετία του '30 και ο ίδιος βραβεύτηκε με το βραβείο Nobel το 1953.

Ωστόσο, δε θα πρέπει να υποτιμηθεί η συμβολή κι άλλων μελετητών, οι οποίοι από τα μέσα του 19ου αιώνα εργάστηκαν στο ίδιο ερευνητικό πεδίο:

- Το 1838, ο γάλλος χημικός Henri Victor Regnault παρατήρησε το σχηματισμό στερεής ουσίας, από βινυλοχλωρίδιο, μετά από έκθεση του στο φως. Η έρευνα αυτή δεν είχε συνέχεια.
- Η μετατροπή του καουτσούκ, με την προσθήκη θείου, σε ελαστικό καλύτερων ιδιοτήτων παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον αμερικανό Charles Goodyear (1839). Το 1844, για τη διαδικασία αυτή, καθιερώθηκε ο όρος βουλκανισμός, μετά από εισήγηση του άγγλου ερευνητή Thomas Hancock.
- Πρώτος ο γάλλος Henri Braconnot, το 1832, παρασκεύασε νιτρική κυτταρίνη, η βιομηχανική παραγωγή της οποίας άρχισε το 1846, μετά από βελτιώσεις του Christian Freidrich Schonbein.
- Το 1870, με τη συνδυασμένη έρευνα των John Wesley και Isaiah S.Hyatt, παρασκευάστηκε το πρώτο πλαστικό: η συνθετική κυτταρίνη (celluloid). Η σύνθεση της στηρίχθηκε στην πλαστικοποίηση της νιτρικής κυτταρίνης με καμφορά.
- Η αναζήτηση υποκατάστατων της εύφλεκτης νιτρικής κυτταρίνης από σταθερότερα υλικά, οδήγησε στη σύνθεση νέων υλικών. Το 1910, ο Leo Hendrik Baekeland συνέθεσε την πρώτη θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη: το βακελίτη.
- Στην περίοδο του μεσοπολέμου ανακαλύφθηκαν και αναπτύχθηκαν τα θερμοπλαστικά πολυμερή όπως: πολυστυρένιο (PS), πολυαιθυλένιο (PE), πολυπροπυλένιο (PP), χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC).
- Το 2003 η παγκόσμια ετήσια παραγωγή πολυμερών άγγιζε τα 150 με 200 εκατομμύρια τόνους προϊόντων και συναγωνίζεται εκείνη του χάλυβα [1].

Η λέξη πολυμερές είναι σύνθετη: πολύς + μέρος. Και πραγματικά, μπορούμε να ορίσουμε τα **πολυμερή** (polymers) ως φυσικές ή τεχνητά παρασκευασμένες ύλες, αποτελούμενες από μόρια μεγάλων διαστάσεων (μεγάλου μοριακού βάρους), τα μακρομόρια. Δομικοί λίθοι των μακρομορίων είναι χημικές ενώσεις-μονάδες, μικρού μοριακού βάρους, που καλούνται μονομερή και ο αριθμός τους ποικίλει από 100 έως 100.000 ανά αλυσίδα.

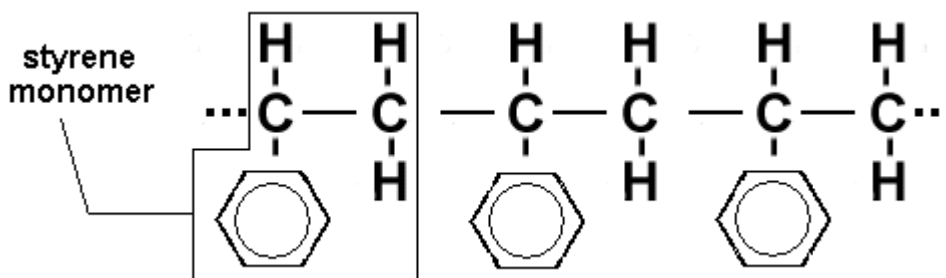
Έτσι, το πολυμερές υλικό είναι μια χημική ένωση, της οποίας η σύσταση αποτελείται από δομικές μονάδες που συνδέονται με ομοιοπολικό δεσμό. Η χημική αυτή ένωση προκύπτει από τη σύνδεση πολλών απλών μορίων με μικρό μοριακό βάρος, με αποτέλεσμα η τελική χημική ένωση να έχει πολλαπλάσιο μοριακό βάρος. Για παράδειγμα το αιθυλένιο ($\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$) μετατρέπεται στη μονάδα $-\text{H}_2\text{C}-\text{CH}_2-$ η οποία σχηματίζει το πολύ-αιθυλένιο, το απλούστερο πολυμερές ($-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$).



Σχήμα 1.1: Πολυαιθυλένιο

Παρατηρήστε ότι αν κολλήσουμε ένα άτομο υδρογόνου (H) στο κάθε τέλος της «ευθείας γραμμής» (αντί των «στριμμένων» γραμμών) δημιουργείται μια αρκετά κοινή μορφή gasoline(βενζίνης) ($\text{C}_{11}\text{H}_{24}$). Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι πολλά τεχνητά πολυμερή σώματα συντίθενται από το πετρέλαιο. Επιπλέον, πολλά πολυμερή σώματα καίγονται εξίσου εύκολα – όπως το πετρέλαιο -, παράγουν επίσης τοξικά προϊόντα, ειδικά εκείνα τα πολυμερή που περιέχουν χλώριο (Cl).

Όλα τα πολυμερή υλικά ταξινομούνται είτε ως πολυμερή υλικά προσθήκης είτε ως πολυμερή συμπύκνωσης. Συγκεκριμένα ένα πολυμερικό υλικό προσθήκης είναι εκείνο στο οποίο επαναλαμβάνεται ο μοριακός τύπος του μονομερούς και στον μοριακό τύπο του πολυμερούς, π.χ. το πολυαιθυλένιο. Ο μοριακός τύπος του πολυστυρενίου φαίνεται στην εικόνα 1.2 καθώς και το μονομερές από το οποίο προέρχεται το πολυμερές αυτό.



Σχήμα 1.2: Πολυστυρένιο

Το πολυμερές συμπύκνωσης είναι εκείνο του οποίου ο μοριακός τύπος έχει προκύψει από διάσπαση του μονομερούς ή περιέχει λιγότερα άτομα μονομερούς, π.χ. οι πολυεστέρες και πολυάνθρακες.

Πολλά πολυμερή υλικά εμφανίζονται στη φύση, όπως το μετάξι, η κυτταρίνη, το φυσικό λάστιχο και οι πρωτεΐνες. Ένας εξίσου μεγάλος αριθμός πολυμερών σωμάτων έχει συντεθεί στο εργαστήριο, όπως τα πλαστικά, οι συνθετικές ίνες και το συνθετικό λάστιχο. Η χημική διαδικασία του πολυμερισμού, δηλαδή η διαδικασία κατά την οποία προκύπτουν τα πολυμερή σώματα από τα μονομερή τους, είναι μια σύνθετη

διαδικασία, η οποία συντελείτε με τη θερμότητα, την πίεση ή την παρουσία ενός ή περισσοτέρων καταλυτών.

Ο ανταγωνισμός των πολυμερών με τα μεταλλικά, κυρίως, υλικά είναι επίμονος. Τα πολυμερή μορφοποιούνται εύκολα και παρασκευάζονται "στα μέτρα μας", έτσι ώστε να συνδυάζουν ταυτόχρονα πολλά πλεονεκτήματα, όπως: τη δυνατότητα δημιουργίας προϊόντων πολύπλοκης γεωμετρίας, τη διαφάνεια, -μπορούν, έτσι, να αντικαταστήσουν το γυαλί,- χαμηλή πυκνότητα, καλές μηχανικές ιδιότητες και, αρκετά συχνά, χαμηλό κόστος.

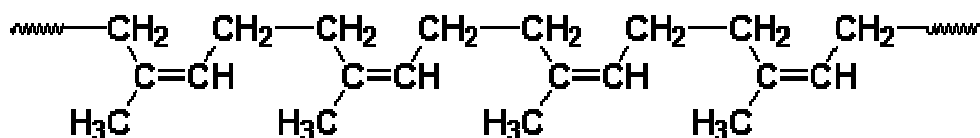
Τα πολυμερή σε σχέση με τα μεταλλικά υλικά, παρουσιάζουν όμως και μειονεκτήματα. Στις περισσότερες περιπτώσεις έχουν χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες και δεν είναι δυνατή η χρήση τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, η χρήση τους επιφυλάσσει μεγάλους κινδύνους ρύπανσης του περιβάλλοντος (πρόβλημα ανακύκλωσης) [2].

1.2. Είδη Πολυμερών Υλικών

i) Ελαστομερή (Elastomers, Rubbers)

Είναι συνήθως γραμμικά πολυμερή με διακλαδισμένες αλυσίδες. Κατά τη φόρτιση τους μπορούν να υποστούν μεγάλες παραμορφώσεις, και να επανέλθουν στο αρχικό τους σχήμα μετά την άρση του φορτίου, -ιδιότητα υπερελαστικότητας. Οι χαρακτηριστικότεροι αντιπρόσωποι των ελαστομερών είναι το ελαστικό κόμμι, το συνθετικό και φυσικό καουτσούκ, το συνθετικό πολύ-ισοπρένιο, το ελαστικό στυρένιο-βουταδιένιο, το πολυ-χλωροπρένιο και οι σιλικόνες. Το καουτσούκ βρίσκει την κυριότερη εφαρμογή του στα λάστιχα των αυτοκινήτων. Όταν το καουτσούκ θερμανθεί με θείο, υφίσταται βουλκανισμό. Δημιουργούνται, δηλαδή, διασταυρώσεις (cross-linking) μεταξύ των μορίων, οι οποίες ενισχύουν πολύ τη δομή του ελαστικού. Με τον τρόπο αυτό, το ελαστομερές γίνεται σκληρότερο, ανθεκτικότερο και λιγότερο ευαίσθητο σε θερμοκρασιακές μεταβολές. Η σχέση αναλογίας που υπάρχει ανάμεσα στην περιεκτικότητα του καουτσούκ σε θείο και της βελτίωσης των μηχανικών του ιδιοτήτων, επιτρέπει την παραγωγή καουτσούκ με μεγάλο εύρος ιδιοτήτων.

Το λάστιχο είναι οποιαδήποτε στερεά ουσία, η οποία κατά το βουλκανισμό (vulcanization) γίνεται ελαστική. Ο μοριακός τύπος του καουτσούκ φαίνεται στην παρακάτω εικόνα



Σχήμα 1.3: Καουτσούκ

Όλα τα σώματα που προκύπτουν από το καουτσούκ ή το συνθετικό λάστιχο είναι πολυμερικές ενώσεις, υψηλού μοριακού βάρους και αποτελούνται από μακριές σειρές ενός ή περισσοτέρων μονομερών.

Το ελαστικό είναι ανθεκτικό στα αλκάλια και τα ασθενή οξέα. Η ελαστικότητα του λάστιχου, η ανθεκτικότητα, η στεγανότητα, η συγκολλητικότητα και η ηλεκτρική του αντίσταση το καθιστούν χρήσιμο ως κόλλα, σύνθεση επιστρώματος, ίνα, υλικό που καλουπώνεται, διαπλάθεται εύκολα και ως ηλεκτρικός μονωτής. Γενικά το συνθετικό λάστιχο έχει τα εξής πλεονεκτήματα σε σχέση με το φυσικό :

- «Καλύτερη» γήρανση,
- Λιγότερη διάβρωση,
- Περισσότερη αντίσταση στο πετρέλαιο, στους διαλυτές, στο οξυγόνο, στο όζον και σε ορισμένα χημικά,
- Ανθεκτικότητα πέρα από κάποιο εύρος θερμοκρασίας..

Τα πλεονεκτήματα από την άλλη του φυσικού λάστιχου είναι τα :

- Λιγότερη συγκέντρωση θερμότητας κατά την κάμψη
- Μεγαλύτερη αντίσταση κατά τη δημιουργία οπής όταν είναι ζεστό.

Ο βουλκανισμός (vulcanization) είναι η επεξεργασία εκείνη, η οποία προσδίδει στο λάστιχο κάποιες συγκεκριμένες ιδιότητες, όπως δύναμη, ελαστικότητα, αντίσταση στους διαλύτες και ανθεκτικός σε μέτριες θερμοκρασίες ζέστης ή κρύου. Χημικά, η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει το σχηματισμό των συνδετικών κρίκων μεταξύ των πολυμερών αλυσίδων στο μόριο του λάστιχου. Ο βουλκανισμός ολοκληρώνεται με μια διαδικασία, η οποία περιλαμβάνει συνδυασμό θείου και θέρμανσης στο λάστιχο, μέθοδος που εφευρέθηκε από τον Charles Goodyear το 1839, ενώ μια μέθοδος κρύου βουλκανισμού, κατά την οποία κάνουμε «βάπτισμα» του λάστιχου ή το ψεκάζουμε με ατμούς κάποιας ένωσης με θείο, αναπτύχθηκε από τον Alexander Parkes το 1846.



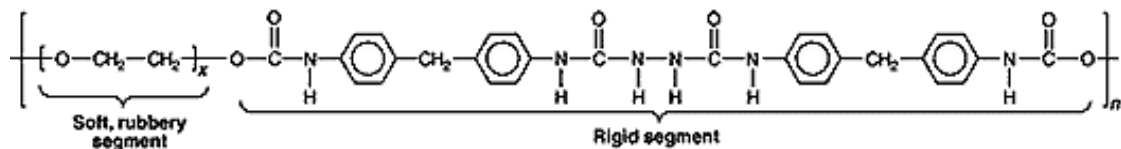
Σχήμα 1.4: Ελαστικό αυτοκινήτου

Το σκληρό λάστιχο περιλαμβάνει ποσοστό θείου 30% με 50%, το οποίο αναμιγνύεται πριν τη θέρμανση, ενώ στο μαλακό λάστιχο το αντίστοιχο ποσοστό είναι χαμηλότερο του 5%. Κατά την ανάμιξη θείου και λάστιχου συνήθως προστίθεται κάποιος οργανικός επιταχυντής, όπως ανιλίνη, ο οποίος μικραίνει το χρόνο της διεργασίας ή

ελαττώνει τη θερμότητα στα όρια που χρειάζονται για τον βαλκανισμό. Το τελικό στάδιο περιλαμβάνει την τοποθέτηση της ένωσης σε καλούπια για να σχηματιστεί η επιθυμητή μορφή και υποβάλλεται σε πίεση και θερμότητα.

Το τελικό προϊόν δεν είναι κολλώδες όπως το ακατέργαστο λάστιχο, δεν σκληραίνει κατά την έκθεση στο κρύο ή μαλακώνει στη ζέστη - εκτός αν το ποσό θερμότητας είναι μεγάλο - παρουσιάζει ελαστικότητα, μετά από παραμόρφωση επαναφέρεται στην αρχική του μορφή, σε αντίθεση με το ακατέργαστο το οποίο παραμορφώνεται, είναι ανθεκτικό στο γδάρισμα, αλλά και στη βενζίνη και στις περισσότερες χημικές ουσίες και καλός μονωτής στον ηλεκτρισμό και στη θερμότητα. Η διαδικασία του βουλκανισμού έκρινε την πορεία του λάστιχου και βοήθησε την ανάπτυξη βιομηχανιών, όπως της αυτοκινητοβιομηχανίας.

Αξίζει να αναφέρουμε ότι τα λάστιχα αιθυλενίου – προπυλενίου (RPDM), εξαιτίας της υψηλής τους αντοχής στη διάβρωση και στο φως του ήλιου, χρησιμοποιούνται για τα μέρη του αυτοκινήτου, για μάνικες, για ηλεκτρική μόνωση και για υποδήματα. Τα ελαστομερή από ουραιθάνιο ονομάζονται Spandex και αποτελούνται από τμήματα ουραιθανίου και πολυαιθέρα ή πολυεστέρα. Το ουραιθάνιο προσδίδει αντοχή και ανθεκτικότητα σε θερμότητα, ενώ ο πολυαιθέρας ή πολυεστέρας παρέχει την ελαστικότητα. Η οικογένεια αυτή είναι η πιο «ευέλικτη» εξαιτίας της σκληρότητας, της αντοχής, της μη-διάβρωσης από πετρέλαιο και των καλών χαρακτηριστικών κατά τη γήρανση. Η χρήση του κυμαίνεται από ρόδες αεροπλάνων έως μαξιλάρια καθισμάτων. Άλλα συνθετικά προϊόντα λάστιχου είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά σε κάποιες χημικές ουσίες, αλλά το υψηλό κόστος τους περιορίζει τη ευρεία χρήση τους. Τέλος υπάρχουν και τα λάστιχα σιλικόνης τα οποία είναι οργανικά παράγωγα των ανόργανων πολυμερών σωμάτων. [3]



Σχήμα 1.5: Spandex

ii) Πλαστικά

Το πλαστικό είναι ένα οποιαδήποτε οργανικό υλικό, το οποίο έχει τη δυνατότητα να ρέει σε μια επιθυμητή μορφή, κατά την εφαρμογή θερμότητας και πίεσης, και κατόπιν να διατηρεί την μορφή αυτή. Τα λάστιχα είναι υποσύνολο των πλαστικών, αν και δεν υπάρχει καμία σαφής διαχωριστική γραμμή μεταξύ των δύο. Αρκετά λάστιχα είναι δύσκαμπτα και σκληρά και πολλά πλαστικά είναι ελαστικά!

Το πλαστικό αποτελείται από ένα συνδυασμό πλαστικοποιητών, υλικών πληρώσεως, χρωστικών ουσιών και άλλων πρόσθετων ουσιών. Ο συνδυασμός αυτός των ουσιών προσδίδει στο πλαστικό τα κύρια χαρακτηριστικά του και συνήθως το όνομά του. Κατά συνέπεια, το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) είναι το όνομα τόσο των ουσιών που συνδυάστηκαν όσο και του πλαστικού που δημιουργείται. Οι ουσίες που συνδυάζονται μπορεί να είναι φυσικά υλικά, όπως παράγωγα κυτταρίνης, καζεΐνη ή πρωτεΐνη γάλακτος, αλλά και συνθετικές ρητίνες.

Η καζεΐνη, όπως και η κυτταρίνη - από την οποία προκύπτουν τα παράγωγα κυτταρίνης - είναι φυσικό πολυμερές σώμα. Οι συνθετικές ρητίνες είναι παράγωγα πολυμερισμού από μικρά απλά μόρια, τα μονομερή. Πλαστικοποιητές προστίθενται για αύξηση ευκαμψίας και ανθεκτικότητας. Τα υλικά πληρώσεως προστίθενται για βελτίωση συγκεκριμένων ιδιοτήτων, όπως τη σκληρότητα ή τη κραδασμικότητα. Οι χρωστικές ουσίες συντελούν στο να προσδώσουν στο πλαστικό κάποιο χρώμα. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι οποιοδήποτε χρώμα ή μορφή καθώς και διάφοροι συνδυασμοί ιδιοτήτων, όπως η σκληρότητα, αντοχή στη γήρανση, ελαστικότητα, αντίσταση στο κρύο, ζέστη ή οξύ μπορούν να επιτευχθούν σε ένα πλαστικό.

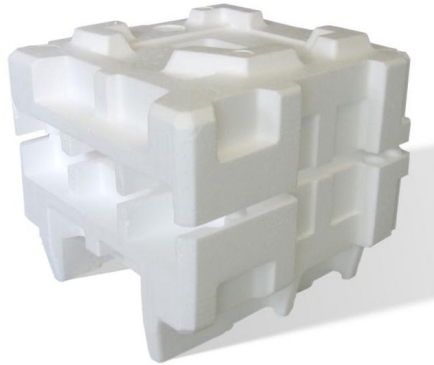
Υπάρχουν 2 βασικοί τύποι πλαστικών :

- ❖ **Θερμοπλαστικά** (thermoplastics). Αποτελούνται από κυρίως γραμμικά μακρομόρια που με τη θέρμανση μαλακώνουν και ρέουν, λόγω χαλάρωσης των μοριακών δεσμών και αφού μορφοποιηθούν, ψύχονται και στερεοποιούνται. Η διεργασία αυτή είναι αντιστρεπτή. Τα θερμοπλαστικά είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και τους διαλύτες. Στα θερμοπλαστικά ευρείας και βιομηχανικής χρήσεως περιλαμβάνονται το πολυαιθυλένιο (PE), το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυστυρένιο (PS), το πολυακρυλονιτρίλιο (PAN), τα πολυαμίδια (Nylon), καθώς επίσης και η οικογένεια των φθοροπολυμερών.
- ❖ **Θερμοσκληρυνόμενα** (thermosets ή thermosetting plastics). Πρόκειται για διδιάστατα ή τριδιάστατα δίκτυα αποτελούμενα από μικρά, σχετικά, μακρομόρια που προέρχονται από την επανάληψη του μονομερούς μερικές εκατοντάδες φορές. Κατά την ανάμιξη των συστατικών του πολυμερούς (ρητίνη με το αντίστοιχο σκληρυντικό), με ή χωρίς θέρμανση, το πολυμερές σκληραίνει και μορφοποιείται κατά αναντίστροφο τρόπο. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή δεν επιδέχονται περαιτέρω κατεργασία, διότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας διασπώνται οι δευτερεύοντες δεσμοί, αν και το πολυμερές δεν τήκεται λόγω της ιδιάζουσας δικτυωτής κατανομής των μακρομορίων του και συνήθως είναι άμορφα. Τα κυριότερα θερμοσκληρυνόμενα είναι τα φαινολικά πολυμερή (φαινοπλάστες ή βακελίτες), οι εποξυδικές ρητίνες, οι αμινοπλάστες (ρητίνες ουρίας ή μελαμίνης με φορμαλδεύδη), οι πολυεστέρες, κλπ [4]

Τα πλαστικά βρίσκονται υπό μορφή σωλήνων, φύλλων, σπειρωμάτων, οι οποίες μορφές βεβαίως ακολουθούν κάποιες προδιαγραφές. Εντούτοις, τα πλαστικά στοιχεία κατασκευάζονται συνήθως από τις πλαστικές σκόνες, στα οποία οι επιθυμητές μορφές διαμορφώνονται είτε με συμπίεση, είτε με μεταφορά, είτε με έγχυση, είτε με εξώθηση.

Ο **πολυεστέρας** είναι μια συνθετική «ίνα» που παράγεται από τον πολυμερισμό του προϊόντος της αντίδρασης οινοπνεύματος και οργανικού οξέος. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των πολυεστέρων είναι η αντίστασή τους κατά το ζάρωμα και η επαναφορά στο αρχικό τους σχήμα μετά από τσαλάκωμα. Επιπλέον έχουν σταθερότητα στις διαστάσεις τους, πλένονται και στεγνώνουν γρήγορα και έχουν άριστα χαρακτηριστικά σε περιπτώσεις πλυσίματος, και για το λόγο αυτό οι πολυεστέρες χρησιμοποιούνται σε υφάσματα ενδυμασίας. Οι μικροΐνες, που αναπτύχθηκαν το 1986, είναι μια ποικιλία πολυεστέρων και είναι εξαιρετικά λεπτές. Συγκεκριμένα έχουν το μισό πάχος από τις ίνες μεταξιού [5].

Το **πολυστυρένιο** είναι πολυμερές σώμα του στυρενίου και είναι ευρέως χρησιμοποιημένο πλαστικό. Είναι άχρωμο, διαφανές θερμοπλαστικό, το οποίο μαλακώνει ελαφρώς πάνω από τους 212° F και γίνεται ιξώδες υγρό στους 365° F περίπου. Είναι ανθεκτικό στα οξέα, αλκάλια, πετρέλαια και οινοπνεύματα. Παράγεται είτε ως στέρεο είτε ως αφρώδες πλαστικό, το οποίο έχει την εμπορική ονομασία Styrofoam (εικ. 1.9). Κάποιες από τις χρήσεις τους περιλαμβάνουν ηλεκτρική και θερμική μόνωση, τα κουφώματα παραθύρων, το κέλυφος των μπαταριών και καπάκια τουαλέτων [5].



Σχήμα 1.9: Δοχείο Θερμομόνωσης από Styrofoam

Το **πλαστικό ABS** χρησιμοποιείται κυρίως σε εργαλεία κατάδυσης. Ένα ευρύ φάσμα των πλαστικών αυτών παράγεται με την ποικιλία των ποσοστών των 3 ιδρυτικών μονομερών, του ακρυλονιτριλίου (Acrylonitrile), του βουταδιενίου (Butadiene) και του στυρενίου (Styrene). Γενικά τα πλαστικά αυτά διακρίνονται για την μεγάλη τους δυσκαμψία, την ανθεκτικότητα σε μεγάλη κρούση (ακόμα και σε χαμηλή θερμοκρασία) και τις καλές διηλεκτρικές ιδιότητες. Πρέπει να προσθέσουμε ακόμα τις ευρείες δυνατότητες χρωματισμού και έτοιμη διαθεσιμότητα. Εξαιτίας όλων αυτών των ιδιοτήτων συνειδητοποιούμε τον ανταγωνισμό των πλαστικών αυτών έναντι των παραδοσιακών υλικών της δεκαετίας του '50, όπως τα μέταλλα, για παραγωγή των υψηλών ανθεκτικών κομματιών με ευρεία καταναλωτική απήχηση. Ένα υλικό που βρήκε απήχηση στα πρώτα στάδια ανάπτυξης των πλαστικών ABS, είναι το διάσημο τούβλο Lego, από τη Δανία [5].



Σχήμα 1.10: Lego τούβλο

Τα **πλαστικά βινυλίου** είναι θερμοπλαστικά πολυμερή και χρησιμοποιούνται σε προϊόντα που παράγονται από καλούπια, σε σωλήνες που πρέπει να έχουν ευκαμψία, σε αδιάβροχα και σε πολυστρωματικά γυαλιά ασφαλείας. Τα πλαστικά αυτά είναι πολυμερή και συμπολυμερή των παραγώγων βινυλίου (δηλαδή παράγωγα του αιθυλενίου, H_2C-CH_2), π.χ. του χλωριδίου βινυλίου ($H_2C=CHCl$) και του οξικού άλατος βινυλίου ($H_2C=CH-OOC-CH_3$). Το Teflon μερικές φορές ταξινομείται σαν πολυμερές σώμα βινυλίου [5].

Το **πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)** ανήκει στην κατηγορία των θερμοπλαστικών και είναι συγκεκριμένα πολυμερές του βινυλοχλωριδίου. Οι ρητίνες του PVC είναι σκληρές, αλλά με προσθήκη πλαστικοποιητών έχουμε τη δημιουργία εύκαμπτων και ελαστικών πλαστικών. Το πλαστικό αυτό χρησιμοποιείται εκτενώς ως μονωτικό στα καλώδια και σύρματα κατά του ηλεκτρισμού. Το πολυβινυλοχλωρίδιο μπορεί να προστεθεί στα υφάσματα και στο χαρτί για την δημιουργία αδιαβρόχων και υλικών για ταπετσαρία. Πληθώρα των υδραυλικών σωληνώσεων είναι από PVC. Τέλος πρέπει να τονιστεί ότι κατά την καύση του PVC, έχουμε εκπομπή επικίνδυνων και ρυπογόνων ενώσεων χλωρίου [5].



Σχήμα 1.11: Υλικό από PVC

Το **πολυπροπυλένιο** είναι πλαστικό που διακρίνεται για το πόσο ελαφρύ είναι, μιας και έχει μικρότερη πυκνότητα από το ύδωρ και αποτελεί πολυμερές του προπυλενίου. Είναι ανθεκτικό στην υγρασία, το πετρέλαιο και τους διαλύτες. Έχει σημείο τήξης τους $250^{\circ} F$, πράγμα που το καθιστά ιδανικό για την κατασκευή υλικών που πρέπει να αποστειρώνονται κατά τη διάρκεια της χρήσης τους. Επίσης χρησιμοποιείται για κατασκευή κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων, υλικών συσκευασίας και αποσκευών. Ιδιαίτερα σε χρήσεις που αφορούν κατάδυση προτιμάται αρκετά, ιδιαίτερα για σημαδούρες και για αδιάβροχα κιβώτια εξοπλισμού [5].

Το **πολυαιθυλένιο** είναι ευρέως χρησιμοποιημένο πλαστικό. Είναι πολυμερές του αιθυλενίου ($H_2C=CH_2$), με μοριακό τύπο το $(-CH_2-CH_2-)_n$, και παράγεται με εφαρμογή υψηλών θερμοκρασιών και πίεσης και παρουσία καταλύτη, ανάλογα με τις ιδιότητες που θέλουμε να έχει το τελικό προϊόν. Είναι ανθεκτικό στο νερό, τα οξέα, τα αλκάλια και τους περισσότερους διαλύτες. Κάποιες από τις χρήσεις του περιλαμβάνουν φύλλα συσκευασίας, κουρτίνες του ντους, άθραυστα μπουκάλια, σωλήνες, κάδοι και δοχεία, μόνωση για καλώδια και σύρματα. Τα προϊόντα του πολυαιθυλενίου ονομάζονται LDPE ή HDPE, τα οποία αντιστοιχούν σε πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (Low Density PolyEthylene) ή πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (High Density PolyEthylene) [5].

Τα **πολυουρεθάνια** είναι ομάδα πλαστικών που μπορεί να είναι είτε θερμοσκληρυνόμενα είτε θερμοπλαστικά. Το πολυουρεθάνιο χρησιμοποιείται σαν εύκαμπτο υλικό ευρέως σε έπιπλα και σε τμήματα των αυτοκινήτων, ενώ σαν άκαμπτο το συναντάμε για θερμική μόνωση των ψυγείων και κτιρίων. Κάποια πολυουρεθάνια είναι αρκετά ελαστικά και ανθεκτικά στη χημική διάβρωση και στην τριβή, τα οποία χρησιμοποιούνται στην παρασκευή των ελαστικών αυτοκινήτων, και των τακουινίων παπουτσιών. Ένα είδος πολυουρεθανίου, το οποίο το συναντάμε στα ρούχα είναι η Lycra, το οποίο είναι συνθετική ίνα, γνωστή για την ελαστική της ικανότητα [5].

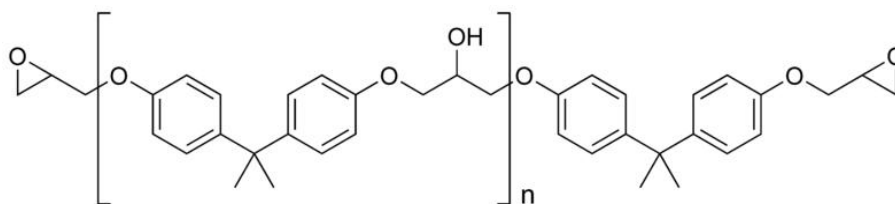


Σχήμα 1.12: Ρούχο από Lycra

Τα **πολυακρυλικά** ανήκουν στην κατηγορία των θερμοπλαστικών, είναι διαφανείς και ιδιαίτερα διακοσμητικά. Τα ακρυλικά πλαστικά είναι πολυμερή σώματα των παραγώγων του ακρυλικού οξέος ($H_2C-CH-COOH$). Το πιο γνωστό πολυακρυλικό είναι το μεθακρυλικό πολυμεθύλιο, γνωστό σαν Plexiglas και Lucite. Είναι διαυγές, άχρωμο, έχει μια έντονη γυαλάδα, και είναι διαφανής στο ορατό και υπεριώδες φως. Μιας και ανήκει στην κατηγορία των θερμοπλαστικών, μπορεί να διαμορφωθεί όταν είναι καυτός, σε διάφορα αντικείμενα, κυρίως στο μπροστινό τζάμι (παρμπρίζ) αεροπλάνων και σε διαφανή διακοσμητικά αντικείμενα. Άλλοι εστέρες του ακρυλικού και μεθυλακρυλικού οξέος, πολυμερίζονται σε θερμοπλαστικά που είναι διαφανή. Το Orlon και το τεχνητό μετάξι (Rayon) είναι ακρυλικά πολυμερή. Το τεχνητό μετάξι είναι από τα παλιότερα πλαστικά σώματα, και χρονολογείται από το 1892. Ήταν η πρώτη τεχνητή ίνα και σήμερα αποτελεί τη βάση πολλών κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων, αλλά και του σελοφάν και της κολλητικής ταινίας [6].

Οι **εποξικές ρητίνες**, είναι ομάδα συνθετικών ρητινών, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πλαστικών και κόλλας. Αξιοσημείωτο των υλικών αυτών είναι η αστάθειά τους αλλά και το υψηλό τους κόστος, με αποτέλεσμα να έχει περιοριστεί η χρήση τους. Η ανθεκτικότητά τους στα χημικά και η μεγάλη διάρκεια και σκληρότητα κατά την κόλληση, έχει καταστήσει τις ρητίνες αυτές πολύτιμες κατά την εφαρμογή τους σε επιστρώσεις. Εξαιτίας της υψηλής τους ηλεκτρικής αντίστασης, της μεγάλης διάρκειας τόσο σε υψηλές όσο και σε χαμηλές θερμοκρασίες και της ευκολίας κατά της χύτευσης χωρίς της ύπαρξης φυσαλίδων, τα πλαστικά αυτά χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστατικά. Οι κόλλες εποξικής ρητίνης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μέταλλα, σε δομικά υλικά και σε άλλες

συνθετικές ρητίνες. Είναι αρκετά ισχυρές και αρκετές φορές αντικαθιστούν τα καρφιά και τις συγκολλήσεις σε ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές [6].



Σχήμα 1.13: Μοριακός Τύπος Εποξικής Ρητίνης

Το **φάιμπεργκλας (Fiberglass)** είναι νήμα που γίνεται από γυαλί. Η παραγωγή του γίνεται διοχετεύοντας λειωμένο γυαλί με δύναμη μέσα από ένα είδος κόσκινου, και εν συνεχεία τυλίγοντας το νήμα αυτό σαν κουβάρι. Το φάιμπεργκλας είναι ισχυρό, ανθεκτικό και αδιαπέραστο από πολλές καυστικές ουσίες ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες. Για τους λόγους αυτούς, οι ίνες αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία. Υφάσματα φάιμπεργκλας μπορούν να παραχθούν και να μοιάζουν με τα αντίστοιχα υφάσματα από μετάξι ή βαμβάκι και να χρησιμοποιούνται σαν κουρτίνες ή σαν ύφασμα γενικότερα. Συνδυασμός του φάιμπεργκλας με πλαστικές ρητίνες χρησιμοποιείται ευρέως και τα υλικά αυτά δεν προσβάλλονται από σκουριά και παράγονται είτε στο επιθυμητό σχήμα απευθείας είτε σε επίπεδα φύλλα. Κάποια τέτοια προϊόντα είναι σκαρί βαρκών ή αυτοκινήτων και σκεπές ή γενικότερα ταβάνια [6].



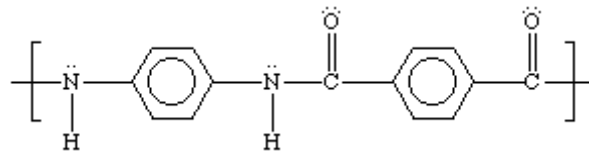
Σχήμα 1.14: Ίνες από Φάιμπεργκλας



Σχήμα 1.15: Μοντέλο Αεροπλάνου F-15 από Φάιμπεργκλας

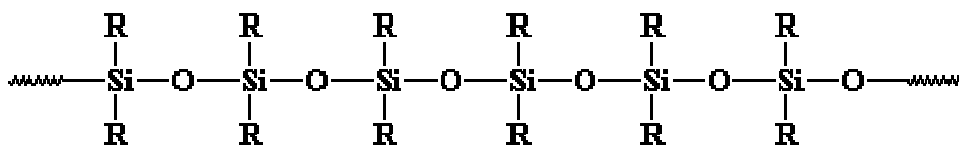
Ο **οξικός εστέρας (acetate)** είναι από τις σημαντικότερες μορφές ινών βασισμένες σε τεχνητή κυτταρίνη. Οι πρώτες προσπάθειες για παραγωγή ινών από κυτταρίνη οξικού εστέρα εμφανίστηκαν στην αρχή του 20^{ου} αιώνα. Κατά τη διάρκεια του Πρώτου Παγκοσμίου Πολέμου, η παραγωγή της ακετυλοκελλουλόζης άρχισε σε βιομηχανική κλίμακα για στρατιωτικούς λόγους. Πλέον σήμερα χρησιμοποιείται στην παραγωγή ευρέων καταναλωτικών αγαθών, όπως τα πουκάμισα, οι μπλούζες, τα εσώρουχα, οι γραβάτες, τα σακάκια, τα πουλόβερ, τα υφάσματα κουστουμιών και τα παλτά [6].

Το **Κέβλαρ (Kevlar)** είναι συνθετική ίνα, παρόμοια με εκείνη του νάυλον, με υψηλή αντοχή. Παρήχθη αρχικά από την εταιρεία DuPont, στις αρχές της δεκαετίας του '60. Το κέβλαρ είναι τρομερά ανθεκτικό και πολύ ελαφρή - συγκριτικά με το βάρος του χάλυβα είναι 5 φορές πιο ανθεκτικό. Είναι αρωματικό πολυμερές του αμιδίου, περιέχει ένα δακτύλιο βενζολίου, το οποίο συνδέεται μέσω ομάδων αμιδίων. Εξαιτίας της μεγάλης αναλογίας των ατόμων άνθρακα με εκείνα του υδρογόνου, το κέβλαρ απαιτεί υψηλές συγκεντρώσεις σε οξυγόνο για να ξεκινήσει να καίγεται. Κατά τον πολυμερισμό, οι επίπεδοι αρωματικοί δακτύλιοι πολυμερίζονται σε άκαμπτες αλυσίδες, και οι δεσμοί του υδρογόνου – μεταξύ των ατόμων υδρογόνων μιας αλυσίδας και του οξυγόνου άλλης – οδηγεί σε μια ισχυρή επίπεδη δομή φύλλων. Εν συνεχεία τα επίπεδα φύλλα περιστρέφονται 360° γύρω από τον άξονα των ινών και διαμορφώνεται έτσι η κυλινδρική μορφή ινών. Το κέβλαρ χρησιμοποιείται για κατασκευή αλεξίσφαιρων γιλέκων και σε τύπους ελαφριών τεθωρακισμένων οχημάτων [6].



Σχήμα 1.16: Μοριακός Τύπος του Kevlar

Η **σιλικόνη (Polysiloxane)** είναι ένα ανόργανο πολυμερές σώμα, στο οποίο τα άτομα του πυριτίου και του οξυγόνου εναλλάσσονται μεταξύ τους και διάφορες οργανικές ενώσεις ενώνονται στα άτομα του πυριτίου, όπως το μεθύλιο CH₃. Οι σιλικόνες είναι ασυνήθιστα σταθερές σε ακραίες θερμοκρασίες (είτε υψηλές είναι χαμηλές) και μπορούν να εμφανιστούν ως υγρά, λάστιχα, ρητίνες ή λίπη. Παρασκευάζεται κατά την αποσύνθεση των αλογονιδίων των οργανικών ενώσεων πυριτίου. Εκτός της χρήσης της σε προϊόντα που προκύπτουν από χύτευση, χρησιμοποιείται σαν εύκαμπτη κόλλα σε υλικά όπως το γυαλί, το μέταλλο και το λάστιχο. Οι αφροί σιλικόνης χρησιμοποιούνται για την πυρόσβεση. Έχει χρήση ακόμα λιπαντικού, ορισμένων χειρουργικών σωληνώσεων (αν και τα περισσότερα κατασκευάζονται από λάτεξ), σε εξαρτήματα κατάδυσης, όπως το επιστόμιο για την εισπνοή του δύτη και τέλος το συναντάμε σαν επίστρωση στο κάτω μέρος των διαστημοπλοίων που βοηθά στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την είσοδο στην ατμόσφαιρα της γης [6].



Σχήμα 1.17: Μοριακός Τύπος της σιλικόνης

iv) Άλλες κατηγορίες Πολυμερών

Λόγω της εξαιρετικά μεγάλης σημασίας τους θα αναφερθούμε και σε δύο άλλες κατηγορίες πολυμερών: τα μίγματα πολυμερών και τα αφρώδη πολυμερή. Θα μπορούσαμε να τα κατατάξουμε σε κάποια από τις πιο πάνω κατηγορίες, ωστόσο οι ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν επιβάλλουν μια διαφορετική προσέγγιση.

ο Μίγματα πολυμερών

- Κατά τον συμπολυμερισμό μίγματος βουταδιένιου (B) και στυρένιου (S) παράγεται μίγμα μακρομορίων πολυστυρένιου (PS) και ελαστομερούς συμπολυμερούς στυρένιου και βουταδιένιου (BS). Κατά την απότομη ψύξη το ελαστομερές συμπολυμερές κατακρημνίζεται στη μάζα του υαλώδους-ψαθυρού θερμοπλαστικού (PS). Η ομοιόμορφη διασπορά λεπτών σωματιδίων του ελαστομερούς στην άμορφη μήτρα του πολυστυρένιου, παίζει το ρόλο ενισχυτικής φάσης, η οποία εμποδίζει τη διάδοση των ρωγμών. Η ενίσχυση μπορεί να έχει τη μορφή σωματιδίων, τριχιτών ή φυλλιδίων.

- Με συμπολυμερισμό παράγεται άλλο ένα πολύ γνωστό σύνθετο αυτής της κατηγορίας: το ABS. Πρόκειται για το προϊόν του συμπολυμερισμού ακρυλονιτρίλιου, βουταδιένιου και στυρένιου. Το ρόλο της μήτρας του συνθέτου παίζει το συμπολυμερές στυρένιου-ακρυλονι-τρίλιου (SAN). Το συμπολυμερές στυρένιου- βουταδιένιου (BS) αποτελεί και πάλι την ενισχυτική.

ο Αφρώδη πολυμερή υλικά

Τα **αφρώδη πολυμερή** (cellular solids ή foams) μπορούν να θεωρηθούν ως σύνθετα υλικά στα οποία η ενισχυτική φάση βρίσκεται σε αέρια κατάσταση. Συνήθως πρόκειται για έναν κυψελοειδή σκελετό πολυμερούς, στον οποίο βρίσκονται εγκλωβισμένες φυσαλίδες αερίου (κυρίως CO₂). Τα αφρώδη πολυμερή έχουν σπογγώδη μορφή και συναντώνται άφθονα και στη φύση π.χ. ξύλο, φελλός, κοράλι. Τόσο τα φυσικά όσο και τα τεχνητά αφρώδη, χρησιμοποιούνται ως μονωτικά υλικά. Ελαστομερή αφρώδη χρησιμοποιούνται ως υλικά συσκευασίας ευαίσθητων οργάνων και για οικιακό εξοπλισμό (μαξιλάρια, στρώματα, κλπ). Αφρώδη πολυμερή πολυουρεθάνης χρησιμοποιούνται για την κατασκευή προφυλακτήρων αυτοκινήτων. [7]

1.3. Πολυμερισμός (Polymerization)

Τα πολυμερή λαμβάνονται μέσω χημικών διαμοριακών αντιδράσεων μεταξύ των μορίων των μονομερών. Ανάλογα με το είδος των αντιδρώντων μονομερών, το παραγόμενο μπορεί να είναι ομοπολυμερές ή συμπολυμερές και η χημική αντίδραση καλείται πολυμερισμός ή συμπολυμερισμός αντίστοιχα.

Κατά τον **πολυμερισμό** λαμβάνουν χώρα είτε αντιδράσεις συμπυκνώσεως, είτε αντιδράσεις προσθήκης. Με βάση την κινητική των αντιδράσεων ο πολυμερισμός διακρίνεται σε:

- ✓ Σταδιακό, όταν όλες οι αντιδράσεις οδεύουν κατά βαθμίδες. Πρόκειται για ένα είδος αντιδράσεων συμπυκνώσεως.
- ✓ Αλυσιδωτό, όταν οι αντιδράσεις οδεύουν με διαδοχικές προσθήκες ενός μονομερούς κάθε φορά και πρόκειται για ταχύτερες αντιδράσεις προσθήκης.

Κατά τον συμπολυμερισμό (copolymerization) δύο ή και περισσότερα μονομερή πολυμερίζονται ταυτόχρονα και σχηματίζουν συμπολυμερή των οποίων η μοριακή αλυσίδα αποτελείται από όλα τα χρησιμοποιηθέντα είδη μονομερών. Συμπολυμερή λαμβάνονται τόσο με αντιδράσεις *συμπολυμερισμού*, όσο και με χημικές αντιδράσεις μεταξύ ομοπολυμερών. Οι συνηθέστερες αντιδράσεις συμπολυμερισμού είναι αλυσιδωτές.

Οι τεχνικές διεξαγωγής του πολυμερισμού, με κριτήριο τη μορφή και την κατάσταση του αντιδρώντος μονομερούς, διακρίνονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες:

- (α) Πολυμερισμός μάζας.** Η αντίδραση, σταδιακή ή αλυσιδωτή, πραγματοποιείται σε μάζα καθαρού μονομερούς σε υγρή κατάσταση. Είναι η παλαιότερη μέθοδος πολυμερισμού, με μικρές απαιτήσεις εγκαταστάσεων.
- (β) Πολυμερισμός διαλύματος.** Η αντίδραση πραγματοποιείται σε ομοιογενές μίγμα μονομερούς-διαλύτη. Εφαρμόζεται ευρέως στην περίπτωση σταδιακών αντιδράσεων, με χαρακτηριστικότερες εκείνες της παραγωγής ρητινών φαινόλης-φορμαλδεΐδης, ουρίας- φορμαλδεΐδης και μελαμίνης-φορμαλδεΐδης. Στην περίπτωση αλυσιδωτών αντιδράσεων, προσοχή πρέπει να δίνεται στην επιλογή του κατάλληλου διαλύτη.
- (γ) Πολυμερισμός αιωρήματος.** Η αντίδραση λαμβάνει χώρα σε διφασικό σύστημα υγρών. Το μονομερές είναι η διάσπαρτη φάση και φέρεται, υπό μορφή σταγονιδίων, σε νερό ή υδατικό διάλυμα. Το πολυμερές λαμβάνεται ως στερεή διάσπαρτη φάση.
- (δ) Πολυμερισμός γαλακτώματος.** Ο πολυμερισμός διεξάγεται σε διφασικό σύστημα, στο οποίο το μονομερές βρίσκεται υπό τη μορφή γαλακτώματος σε υδατική φάση. Μετά το πέρας της αντιδράσεως, το πολυμερές προϊόν παραλαμβάνεται επίσης υπό μορφή γαλακτώματος. [8]

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1⁰⁰ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1. J. L. Throne, “Thermomorfing : From Baby Rattles to Bed Springs and Beyond” Proc. Annual Technical Conference, Society of Plastic Engineers, 2002.
2. Thermomorfing User’s Guide, “Introduction”, http://www.scudc.scu.edu/cmodc/tf_doc/bm_intro.html (current Oct. 28th, 2003).
3. R. W. Ogden, Non-Linear Elastic Deformations, Dover, New York, 1997, Chapt. "7".
4. G. Gruenwald, Thermomorfing: A Plastics Processing Guide, Technomic Publishing CO., Lancaster, 1987.
5. M.L. Berins, SPI Plastics Engineering Handbook, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991.
6. P. J. Mooney, Understanding the Industrial Thermoforming Business, Plastics Custom Research Services, Advance, N.C., 2001, pp. 7–12.
7. M. J. Stevenson, Thermoforming Quarterly, Society of Plastic Engineers, Thermoforming Division, Brookfield Center, Conn., Vol. 17, No. 4 (4th Quarter 1998), pp. 9–17.
8. A. Buckel, Thermoforming Tooling, McConnell Co., Inc., Fort Worth, Tex., 2000, pp. 8–12.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Τεχνικές Μορφοποίησης Πολυμερών Υλικών

2.1. Εισαγωγή

Η χρησιμοποίηση των πολυμερών σε διάφορες εφαρμογές προϋποθέτει, σχεδόν πάντοτε, την προσθήκη διαφόρων ουσιών.

Πρόσθετα (additives) είναι οι ουσίες εκείνες οι οποίες διασπείρονται στη μάζα του πολυμερούς, χωρίς να επιφέρουν την αλλοίωση της χημικής του δομής, και στοχεύουν στη βελτίωση της συμπεριφοράς του κάτω από ορισμένες συνθήκες λειτουργίας.

Ανάλογα με τη λειτουργία που επιτελούν, τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται κατά τη μορφοποίηση των πολυμερών κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

- (α) Πρόσθετα που διευκολύνουν την επεξεργασία
- Θερμικοί σταθεροποιητές
 - Λιπαντικά
 - Διευκολυντικά ροής
 - Θιξοτροπικά μέσα
- (β) Πρόσθετα που τροποποιούν τις μηχανικές ιδιότητες
- Πλαστικοποιητές
 - Μέσα ενίσχυσης
- (γ) Πρόσθετα που μειώνουν το κόστος
- Πληρωτικά υλικά
 - Αραιωτικά
- (δ) Μέσα τροποποίησης των οπτικών ιδιοτήτων
- Χρωστικές
 - Μέσα πυρηνοποίησης
- (ε) Πρόσθετα κατά της γήρανσης
- Αντιοξειδωτικά
 - Σταθεροποιητές υπεριώδους ακτινοβολίας
 - Μυκητοκτόνα
- (στ) Πρόσθετα που τροποποιούν τις επιφανειακές ιδιότητες
- Αντιστατικά
 - Ολισθητικά
 - Αντικολλητικά
 - Αντιτριβικά
 - Μέσα αύξησης της πρόσφυσης

(ζ) Διογκωτικά

(η) Αντιπυρικά

Τέσσερις είναι οι κύριες μέθοδοι μορφοποίησης πολυμερών:

- Χύτευση (moulding)
- Εκβολή (extrusion)
- Κατασκευή λεπτών φύλλων (polymer foil manufacturing)
- Ινοποίηση (fiber manufacturing ή spinning)

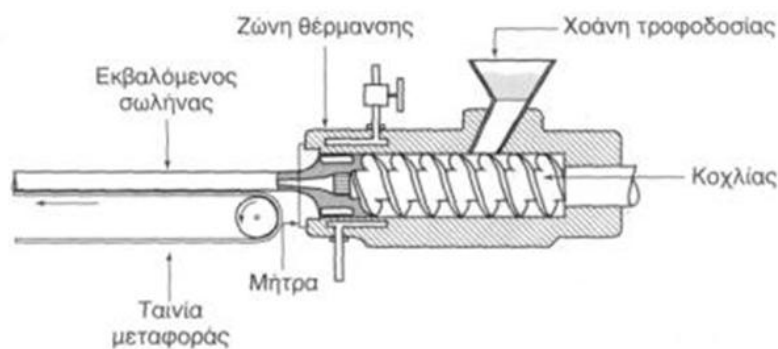
Οι παραλλαγές των μεθόδων αυτών οδηγούν σε πληθώρα διαφορετικών τεχνικών μορφοποίησης.

2.2. Μορφοποίηση Θερμοπλαστικών Πολυμερών

Οι κύριες μέθοδοι μορφοποίησης που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση των θερμοπλαστικών πολυμερών αναλύονται στη συνέχεια:

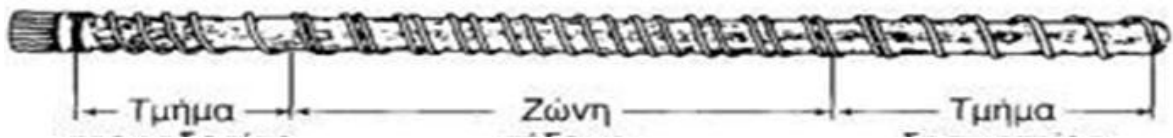
i) Εκβολή (extrusion)

Η μέθοδος της εκβολής εφαρμόζεται κυρίως για την κατασκευή κυλινδρικής γεωμετρίας και επιπέδων προϊόντων από θερμοπλαστικό πολυμερές. Σφαιρίδια του πολυμερούς τροφοδοτούνται μέσω μιας χοάνης, στο σύστημα εκβολής, όπου με θέρμανση, πραγματοποιείται ιξώδης ροή του πολυμερούς το οποίο, με χρήση δοσιμετρικού κοχλίας, βγαίνει από τη μήτρα πλήρως διαμορφωμένο.



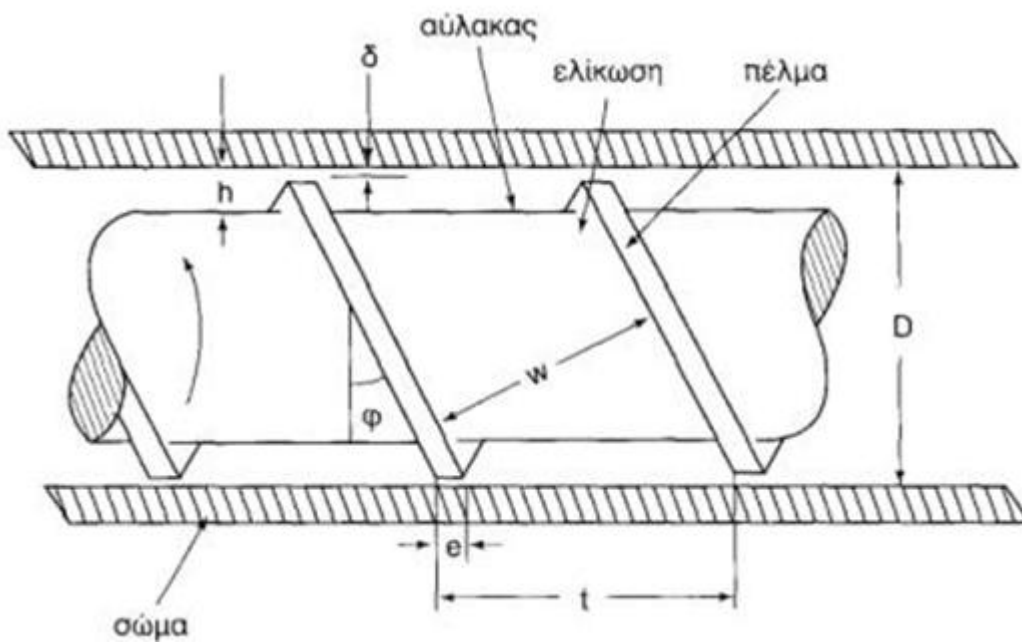
Σχήμα 2.1: Μέθοδος Εκβολής

Ο δοσιμετρικός κοχλίας ενός συστήματος εκβολής είναι ένα εξάρτημα, του οποίου ο σχεδιασμός παίζει σπουδαίο ρόλο στην όλη διαδικασία. Τα βασικά τμήματα του κοχλίας είναι τρία: τμήμα τροφοδοσίας, ζώνη τήξεως και τμήμα δοσιμετρίας.



Σχήμα 2.2: Τμήματα του Κοχλία Εκβολής

Η τροφοδοσία του καθαρού στερεού ρυθμίζεται μόνον από τις πρώτες ελικώσεις του κοχλία. Μετά από κάποιο μήκος του κοχλία, που αντιστοιχεί στο τμήμα τροφοδοσίας, αρχίζει η τήξη του υλικού. Στο σχήμα I.26β φαίνεται λεπτομέρεια του κοχλία εκβολής. Η τριβή ανάμεσα στον κοχλία και στους κόκκους του πολυμερούς βοηθά την ταχεία προώθηση τους, ο δε συντελεστής τριβής μπορεί να ρυθμιστεί από τη γωνία ελίκωσης (φ). Η βέλτιστη γωνία ελίκωσης κυμαίνεται μεταξύ 15-20°. Όταν το πολυμερές φθάνει στο τέλος του τμήματος τροφοδοσίας, η τήξη έχει ολοκληρωθεί και το πολυμερές είναι ένα ομοιογενές τήγμα. Στο τμήμα της δοσιμετρίας, το βάθος της αύλακος του κοχλία (δ) είναι το μικρότερο από κάθε άλλο τμήμα. Για το λόγο αυτό το τμήμα δοσιμετρίας καθορίζει τη συμπεριφορά ολόκληρου του κοχλία και ελέγχει το ρυθμό εξώθησης του υλικού.



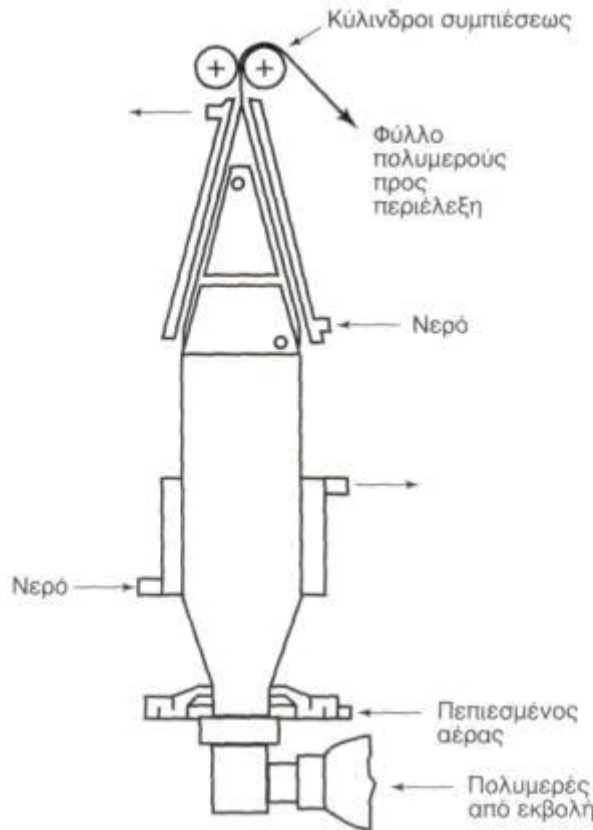
Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστικά Μεγέθη του Κοχλία Εκβολής

Όπως φαίνεται από το σχήμα 2.3, τα μεγέθη του κοχλία εκβολής είναι τα :

- i) D = διάμετρος
- ii) φ = γωνία ελίκωσης
- iii) t = βήμα ελίκωσης
- iv) δ = βάθος αυλάκωσης
- v) e = πλάτος πέλματος
- vi) w = πλάτος αυλάκωσης
- vii) h = διάκενο αυλάκωσης - σώματος

Με αυτή τη μέθοδο παράγονται φύλλα και σωλήνες πολυμερούς με ιδιαίτερα έντονο προσανατολισμό δομής.

Μετά την εκβολή ακολουθούν κατεργασίες περαιτέρω μορφοποίησης όπως εξέλαση ή τανυσμός (drawing) ή έλαση (rolling) με αποτέλεσμα τη δημιουργία έντονου προσανατολισμού δομής και την κρυστάλλωση των άμορφων περιοχών των θερμοπλαστικών πολυμερών. Πιο συγκεκριμένα, για την κατασκευή φύλλων χρησιμοποιείται η διάταξη του σχήματος.

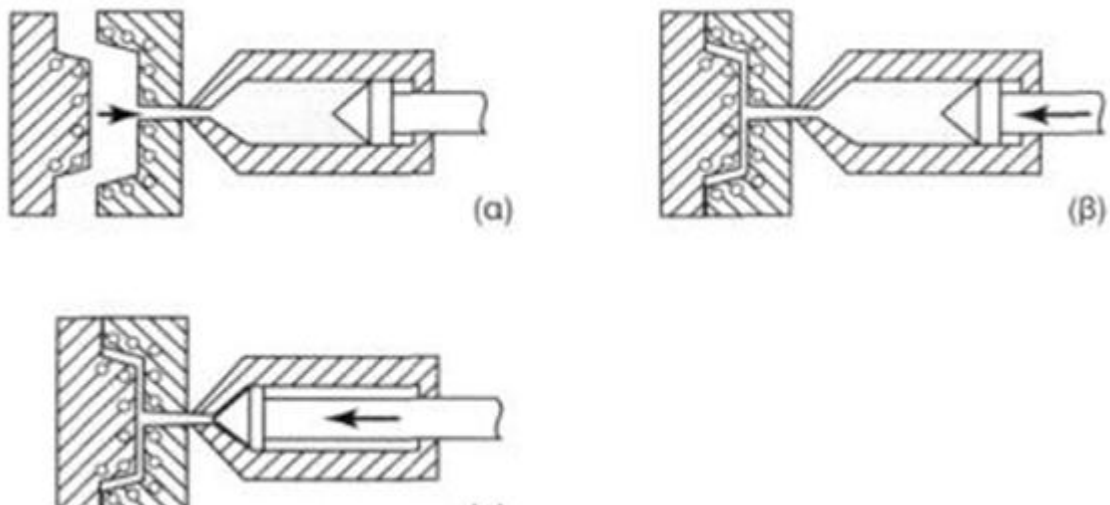


Σχήμα 2.4: Μορφοποίηση φύλλου με συμπίεση

Η αγορά των προϊόντων εκβολής είναι πολύ μεγάλη. Φύλλα πολυμερών με μεγάλο εύρος διατομών (προφίλ) χρησιμοποιούνται σε οικοδομικές εφαρμογές, αλλά και στην τεχνολογία οχημάτων και την κατασκευή μονωτικών επενδύσεων για σύρματα και καλώδια. [1]

ii) Χύτευση με Έγχυση (Injection Moulding)

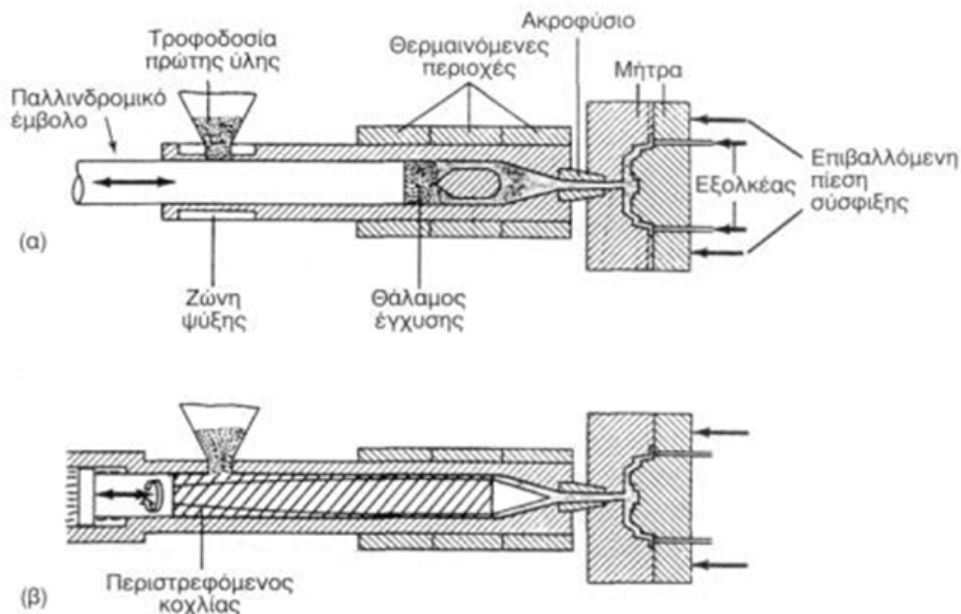
Η χύτευση με έγχυση είναι ίσως η πιο διαδεδομένη κατεργασία μορφοποίησης για τα θερμοπλαστικά πολυμερή και προσφάτως και για ορισμένα θερμοσκληρυνόμενα, όπως π.χ. ρητίνες. Με τη μέθοδο αυτή, κόκκοι πολυμερούς που τροφοδοτούνται από μια χοάνη (hopper) (εικ. 2.5α), συμπιέζονται από ένα έμβολο (ram) ή έναν κοχλία (screw) (εικ. 2.5β) και θερμαίνονται μέχρι την τήξη τους. Το τήγμα αυτό στη συνέχεια ψεκάζεται υπό πίεση (έγχυση) στα ψυχρά τοιχώματα ενός καλουπιού. Εκεί, το πολυμερές αποψύχεται κάτω από τη θερμοκρασία υαλώδους μεταπτώσεως (T_g), η μήτρα ανοίγει και λαμβάνεται το προϊόν (εικ. 2.5γ).



Σχήμα 2.5: Στάδια χύτευσης με μέθοδο της έγχυσης

Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι μεταφοράς του πολυμερούς στη μήτρα:

- ❖ Με τη βοήθεια παλλινδρομικού εμβόλου (reciprocating plunger), μέσω του οποίου αναπτύσσονται πιέσεις 70-180 MPa (εικ. 2.6α).
- ❖ Με τη βοήθεια περιστρεφόμενου κοχλίου (rotating screw), σχήμα (εικ. 2.6β).



Σχήμα 2.6: Τρόποι έγχυσης

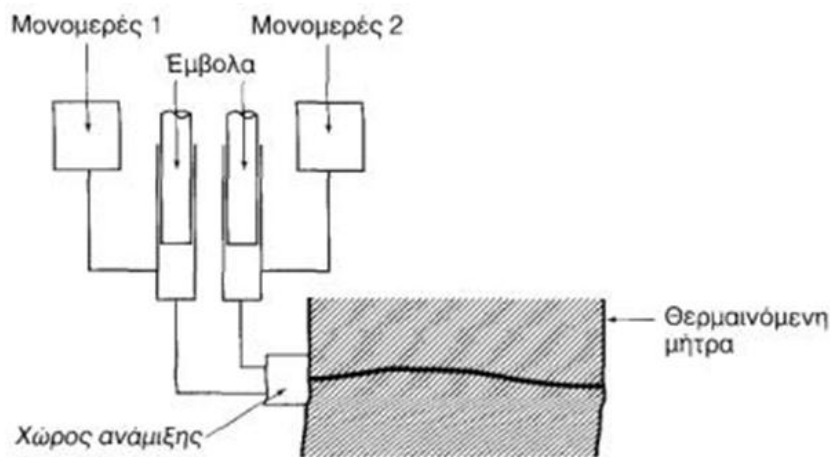
Τα μακρομόρια προσανατολίζονται κατά τη διεύθυνση της ροής του υλικού, προσδίδοντας κατ' αυτήν τη διεύθυνση καλές μηχανικές ιδιότητες, αλλά γενικά,

ανισοτροπία ιδιοτήτων. Η κατεργασία αυτή δίνει χυτά διαστασιακής ακρίβειας, διότι η πίεση εξακολουθεί να ασκείται στο πολυμερές καθώς ψύχεται.

Βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ο σημαντικός χρόνος του κύκλου της κατεργασίας (1-5 λεπτά) και το υψηλό κόστος των καλουπιών. Οι τυπικές θερμοκρασίες χύτευσης για τα θερμοπλαστικά κυμαίνονται μεταξύ 150 και 350 °C ($1,3-1,6T_g$, όπου T_g η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης), ενώ οι απαιτούμενες πιέσεις είναι υψηλές, της τάξεως των 120 MPa. [1]

iii) Χύτευση με Αντίδραση & Έγχυση (Reaction Injection Moulding)

Η μέθοδος αυτή αποτελεί παραλλαγή της προηγούμενης μεθόδου. Κατά τη χύτευση με έγχυση και αντίδραση (RIM), ως πρώτη ύλη χρησιμοποιείται μίγμα δύο μονομερών, τα οποία θερμαίνονται, αναμιγνύονται και αντιδρούν καθώς εισέρχονται στη μήτρα, κάτω από μεγάλη πίεση (εικ. 2.7).



Σχήμα 2.7: Χύτευση με αντίδραση και έγχυση

Η κύρια εφαρμογή της μεθόδου αφορά στη μορφοποίηση πολυουρεθάνης, Nylon και ορισμένων εποξειδικών ρητινών. Μέσα στη μήτρα η πίεση είναι αρκετά χαμηλή (300-700 kPa), με αποτέλεσμα ο σχεδιασμός της μήτρας να είναι απλός και το κόστος κατασκευής χαμηλό.

Εφόσον η διεργασία του πολυμερισμού λαμβάνει χώρα μέσα στη μήτρα, οι αναπτυσσόμενες εσωτερικές τάσεις ελαχιστοποιούνται και, συνεπώς, η κατεργασία αυτή είναι κατάλληλη για εξαρτήματα μεγάλου μεγέθους και πολύπλοκης γεωμετρίας. [1]

iv) Μορφοποίηση με Εμφύσηση (Blow Forming)

Με τη μέθοδο αυτή, τεμάχιο πολυμερούς σε σχήμα σωλήνα τοποθετείται θερμό σε διαρετή μήτρα και, με τη βοήθεια θερμού πεπιεσμένου αέρα, διογκώνεται μέχρι να έρθει σε επαφή με τα τοιχώματα της μήτρας. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάζονται πλαστικές φιάλες και άλλα προϊόντα με κοιλότητες.

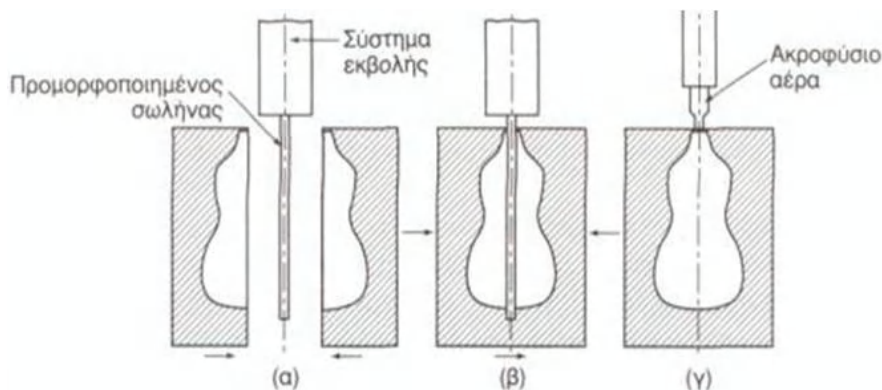
Η μέθοδος της μορφοποίησης με εμφύσηση εμφανίζεται σε τρεις βασικές παραλλαγές:

- Μορφοποίηση με εμφύσηση μετά από έγχυση (injection blow moulding)

Είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την κατασκευή γυάλινων φιαλών με λαιμό. Το προμορφοποιημένο με έγχυση πολυμερές (parison ή preform) μεταφέρεται στη μήτρα εμφύσησης, όπου γίνεται η τελική μορφοποίηση και εξαγωγή του αντικειμένου. Πολλά μπουκάλια από PVC, PET και PP διαφόρων μεγεθών και σχημάτων κατασκευάζονται με αυτήν τη μέθοδο.

- Μορφοποίηση με εμφύσηση μετά από εκβολή (extrusion blow moulding)

Είναι συνεχής διεργασία, κατά την οποία μετά την εκβολή του, ο πλαστικός σωλήνας εισάγεται στη μήτρα εμφύσησης, όπου διογκώνεται με τη βοήθεια θερμού πεπιεσμένου αέρα (εικ. 2.8). Η μέθοδος εμφανίζει τη μεγαλύτερη παραγωγικότητα από τις υπόλοιπες. Συγκεκριμένα, πρωτίστως έχουμε την εκβολή του σωλήνα (α), εν συνεχεία συγκρατούμε το σωλήνα μέσα στη μήτρα εμφύσησης (β) και τέλος πραγματοποιείται η εμφύσηση και διόγκωση του πλαστικού σωλήνα.



Σχήμα 2.8: Στάδια μορφοποίησης με εμφύσηση μετά από εκβολή

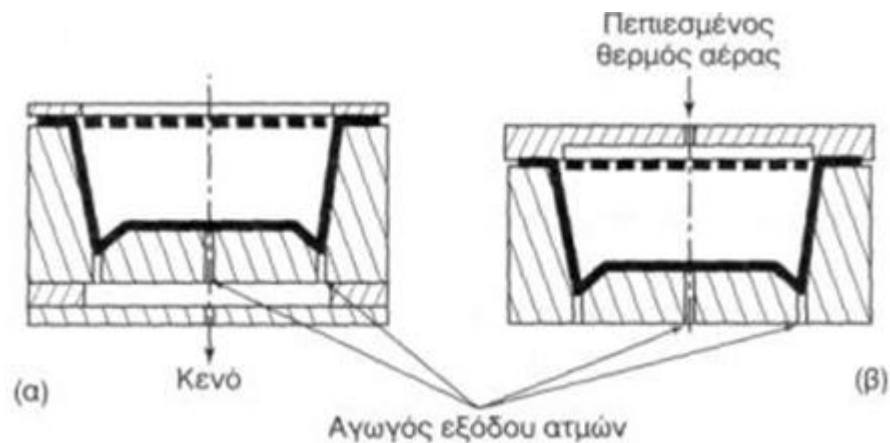
- Διαξονική μορφοποίηση με εμφύσηση (stretch blow moulding).

Ο όρος χρησιμοποιείται στην περίπτωση της ταυτόχρονης αξονικής (με τη χρήση μηχανικών μέσων) και ακτινικής διόγκωσης (λόγω του εμφυσούμενου αέρα) πολυμερούς, προμορφοποιημένου με εκβολή ή με έγχυση. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνεται προσανατολισμένο φιλμ πολυμερούς.

Με τη διαξονική μορφοποίηση με εμφύσηση, πολλές ιδιότητες του υλικού μεταβάλλονται ευνοϊκά: βελτιώνεται η αντοχή του σε κρούση και ερπυσμό, η διαύγεια του, καθώς και η διαπερατότητα του σε αέρια και υδρατμούς. Και αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για την κατασκευή φιαλών από PVC, PET, PP, κλπ. [1]

v) Θερμομόρφωση (Thermoforming)

Η θερμομόρφωση αποτελεί μέθοδο μορφοποίησης λεπτών πλαστικών φύλλων σε προϊόντα πολύπλοκων σχημάτων. Η γενική διαδικασία θερμομόρφωσης περιλαμβάνει τη συγκράτηση του πολυμερούς στη μήτρα, με τη βοήθεια δακτυλίου σύσφιξης, και την εν συνεχεία θέρμανση του πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Ακολουθεί υποχώρηση του πολυμερούς μέσα στη μήτρα, τα τοιχώματα της οποίας ψύχονται, με αποτέλεσμα την επακόλουθη ψύξη και σκλήρυνση του πολυμερούς. Η υποχώρηση του πολυμερούς πραγματοποιείται είτε με την εφαρμογή κενού (σχήμα α), είτε με τη διοχέτευση θερμού αέρα υπό πίεση (σχήμα β). Αντίστοιχα, οι δύο βασικές παραλλαγές της μεθόδου είναι η **θερμομόρφωση υπό κενό** (vacuum forming) και η **θερμομόρφωση υπό πίεση** (hot air pressure forming).

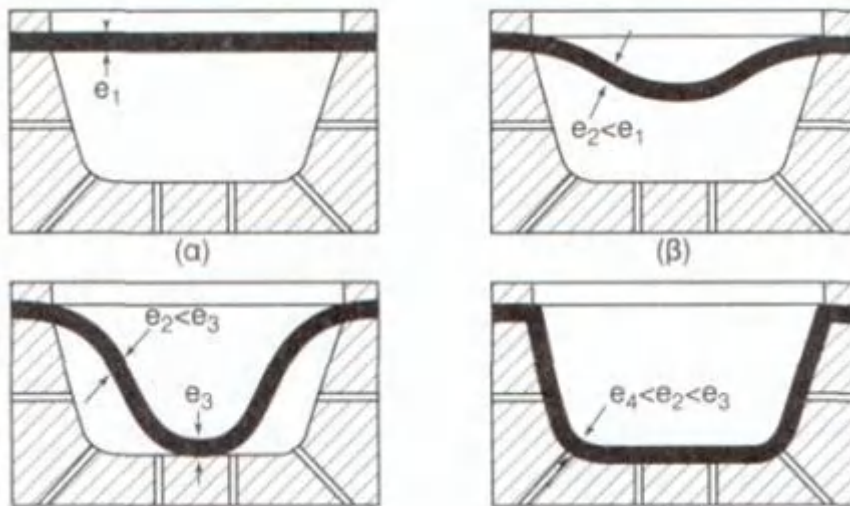


Σχήμα 2.9: Θερμομόρφωση υπό κενό (α) και υπό πίεση (β)

Κατά τη θερμομόρφωση, η επιφάνεια του αρχικού φύλλου πολυμερούς αυξάνεται με ταυτόχρονη μείωση του πάχους του (Σχ. 2.10). Το προϊόν παρουσιάζει διαφορετικό πάχος σε διάφορες χαρακτηριστικές περιοχές του:

- i) Τα ψυχρά μέρη του φύλλου στα σημεία συγκράτησης του, διατηρούν το αρχικό πάχος τους (e_1)
- ii) Ο πυθμένας παρουσιάζει μέγιστο πάχος στο κέντρο του (e_3)
- iii) Στις γωνίες το πάχος των τοιχωμάτων του προϊόντος γίνεται ελάχιστο (e_4)
- iv) Το πάχος των τοιχωμάτων (e_2) παίρνει ενδιάμεσες τιμές ($e_4 < e_2 < e_3$) και μεταβάλλεται καθ' ύψος

Η σχέση μεταξύ του μέγιστου και του ελάχιστου εμφανιζόμενου πάχους εξαρτάται από την ακτίνα καμπυλότητας του αντικειμένου.

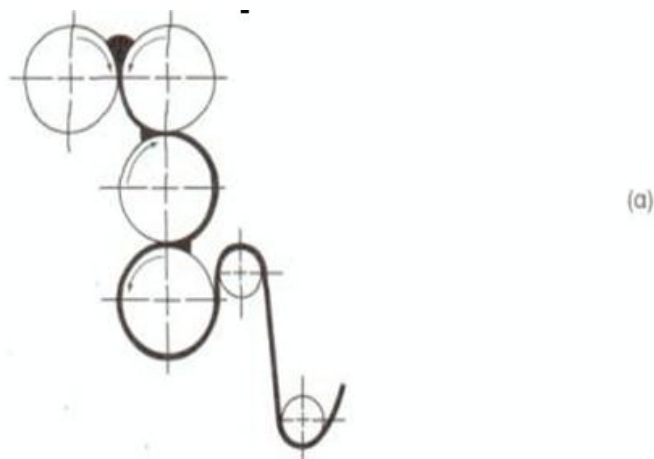


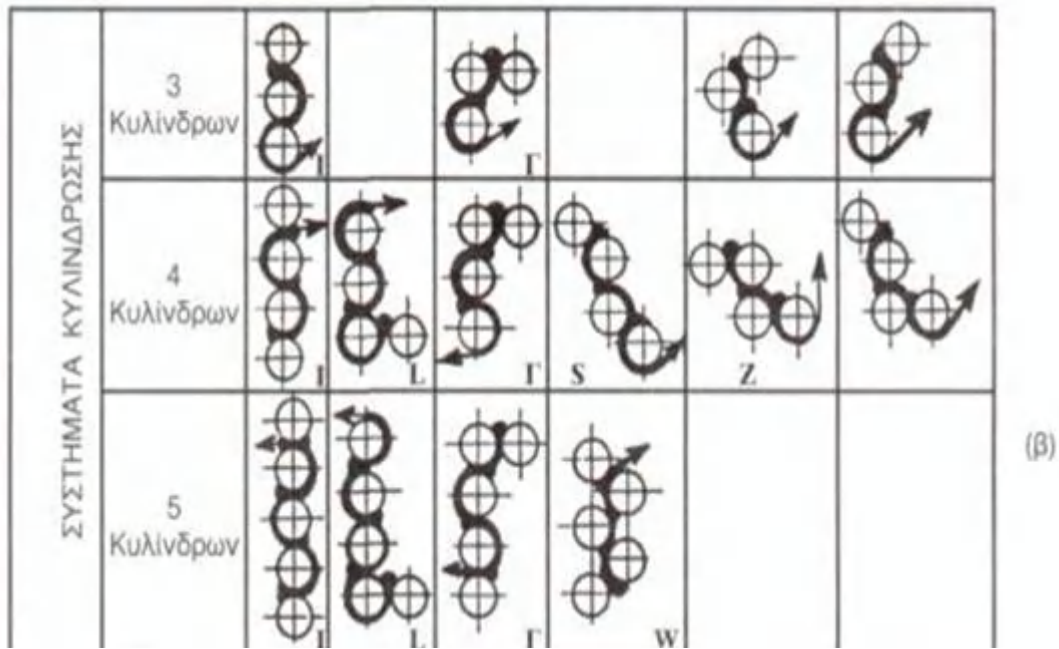
Σχήμα 2.10: Μεταβολή του πάχους του υπό θερμομόρφωση δοκιμίου

Με τη μέθοδο της θερμομόρφωσης κατασκευάζονται πολλά προϊόντα από θερμοπλαστικά πολυμερή (ABS, PP, PS, PVC, PMMA), όπως είναι τα πάνελ οικοδομών, οι σωλήνες μάνιου και τα προϊόντα συσκευασίας. [1]

vi) Κυλίνδρωση (Calendering)

Κατά τη μορφοποίηση με τη μέθοδο της κυλίνδρωσης, μάζα τήγματος πολυμερούς περνά από ένα σύστημα κυλίνδρων μικρού ανοίγματος (σχήμα 2.11(a)), με αποτέλεσμα την παραγωγή λεπτών φύλλων, τα οποία συνήθως υποβάλλονται σε θερμομόρφωση. Η κυλίνδρωση μπορεί να γίνει με σύστημα 2, 3 ή και περισσότερων κυλίνδρων διαφόρων διατάξεων (σχήμα 2.11(β)).



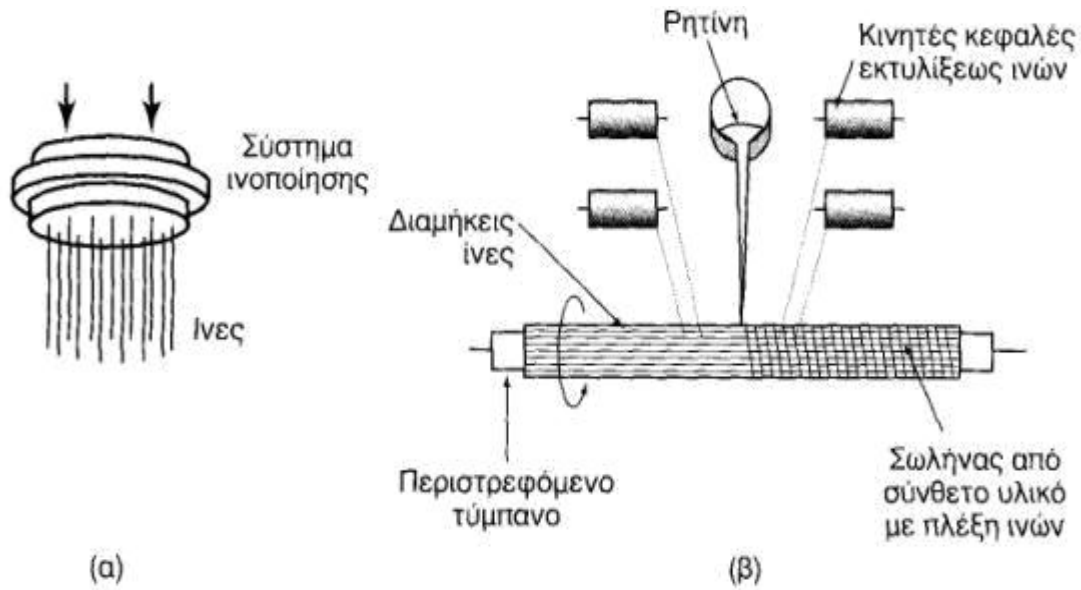


Σχήμα 2.11: Μορφοποίηση πολυμερούς με κυλίνδρους

Η κυλίνδρωση θεωρείται διεργασία υψηλού ρυθμού παραγωγής (100 m/min) και χρησιμοποιείται κυρίως για τη μορφοποίηση PVC και ABS. Με τη μέθοδο αυτή παράγονται πλακίδια πατώματος, κουρτίνες μπάνιου, κλπ. [1]

vii) Ινοποίηση (Fiber Manufacturing ή Spinning)

Ίνες παράγονται με την εξαναγκασμένη διέλευση τήγματος ή διαλύματος του πολυμερούς διαμέσου συστήματος το οποίο φέρει ακροφυσία μικρής διαμέτρου (σχήμα 2.12(α)). Οι ίνες μετά τη διαμόρφωση τους, τυλίγονται σε καρούλια προκειμένου, εν συνεχεία, να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ειδικών προϊόντων (σχήμα 2.12(β)). Για μερικά πολυμερή (π.χ. Nylon) η περιτύλιξη γίνεται υπό τάση, κατά τρόπο ώστε οι αλυσίδες να προσανατολίζονται κατά μήκος του άξονα της ίνας, με αποτέλεσμα την αύξηση της μηχανικής τους αντοχής. Η διάμετρος των παραγομένων ινών είναι πολύ μικρή και κυμαίνεται μεταξύ 2 και 40 μm και, συνήθως, εκφράζεται σε μονάδες denier (βάρος, σε g, ίνας μήκους 9000 m) και σε μονάδες tex (βάρος, σε g, ίνας μήκους 1000 m). Η αντοχή των ινών σε εφελκυσμό ονομάζεται συνεκτικότητα και εκφράζεται σε N/tex. [1]



Σχήμα 2.12: Μορφοποίηση Πολυμερούς με μέθοδο Ινοποίησης

viii) Συμπύεση και Πυροσυσσωμάτωση (Compaction και Sintering)

Σκόνη πολυμερών μπορούν να μορφοποιηθούν στη γεωμετρία του τελικού προϊόντος με συμπύεση, με ή χωρίς θέρμανση, όπως ακριβώς πολλές μεταλλικές και κεραμικές σκόνη. Για το σχηματισμό ράβδου, η σκόνη του πολυμερούς αρχικά συμπιέζεται εν ψυχρώ, με εφαρμογή πίεσεως της τάξης των 350 MPa. Εν συνεχεία, το θερμαίνουμε σε θερμοκρασία 360-380 °C, οπότε έχουμε τήξη στα όρια των κόκκων, ιξώδης ροή του πολυμερούς και, συνεπώς, εξάλειψη μεγάλου μέρους του πορώδους του. Η μέθοδος χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση Teflon (PTFE) και πολυαιθυλενίου υψηλού μοριακού βάρους (UHMWPE). Ο πίνακας 2.1 παρουσιάζει τις μεθόδους μορφοποίησης που χρησιμοποιούνται για τα κυριότερα θερμοπλαστικά πολυμερή.[1]

Μέθοδοι / Υλικά	Εκβολή	Χύτευση Με Έγχυση	Χύτευση Με Εμφύσηση	Θερμομόρφωση	Χύτευση Με Συμπύεση	Χύτευση μεταφοράς
Ακρυλικά	x	x	x	x		
ABS	x	x	x	x		
Οξική Κυτταρίνη	x	x		x	x	
Nylon	x	x	x			
Πολυανθρακικά	x	x	x	x		
Πολυαιθυλένιο	x	x	x	x		
Πολυπροπυλένιο	x	x	x	x		
Πολυστυρένιο	x	x	x	x		
Teflon (PTFE)	x					
Πολυουρεθάνη	x	x				
PVC	x	x	x	x	x	x

Πίνακας 2.1: Κατεργασίες Μορφοποίησης Θερμοπλαστικών Υλικών

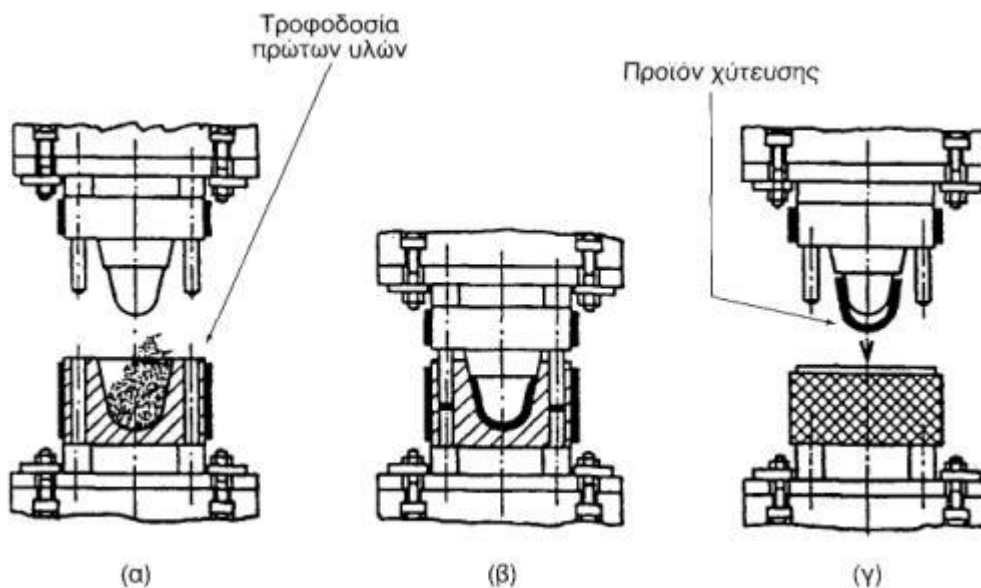
2.3. Μορφοποίηση Θερμοσκληρυνόμενων Πολυμερών και Ελαστομερών

Η μορφοποίηση των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών και των ελαστομερών γίνεται με τεχνικές χύτευσης, και συνήθως, με χύτευση με συμπίεση, χύτευση μεταφοράς και χύτευση με έγχυση. Στη συνέχεια θα αναπτυχθούν οι δύο πρώτες μέθοδοι. Η τελευταία έχει, ήδη, αναπτυχθεί στην παράγραφο μορφοποίησης θερμοπλαστικών πολυμερών.

i) Χύτευση με Συμπίεση

Η μέθοδος χύτευσης με συμπίεση των πολυμερών είναι ανάλογη της σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας, που χρησιμοποιείται στις κατεργασίες μετάλλων.

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται, κυρίως, στην περίπτωση των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών. Το στερεό υλικό, μίγμα ρητίνης και σκληρυντικού, τοποθετείται σε θερμαινόμενη μήτρα, όπου με εφαρμογή υψηλής πίεσης προκαλείται τήξη και πλήρωση του καλουπιού με ταυτόχρονο πολυμερισμό και σκλήρυνση του υλικού (σχήμα 2.13). Ο χρόνος πήξεως κυμαίνεται από 10 sec έως 10 min, ανάλογα με το μέγεθος του τεμαχίου. Οι πιέσεις που ασκούνται κατά τη μέθοδο αυτή, οι οποίες είναι της τάξης των 70 MPa, είναι μικρότερες των αντίστοιχων που αναπτύσσονται κατά τη μέθοδο της χύτευσης με έγχυση.



Σχήμα 2.13: Χύτευση με Συμπίεση

Παραλλαγή της μεθόδου αποτελεί η χύτευση με συμπίεση εν ψυχρώ (cold moulding), κατά την οποία σκόνη του πολυμερούς τροφοδοτείται στη μήτρα συμπίεσης παρουσία κάποιου συνδετικού υλικού (binder). Μετά την εν ψυχρώ συμπίεση του υλικού, το συνδετικό υλικό απομακρύνεται με κατάλληλη θερμική κατεργασία.

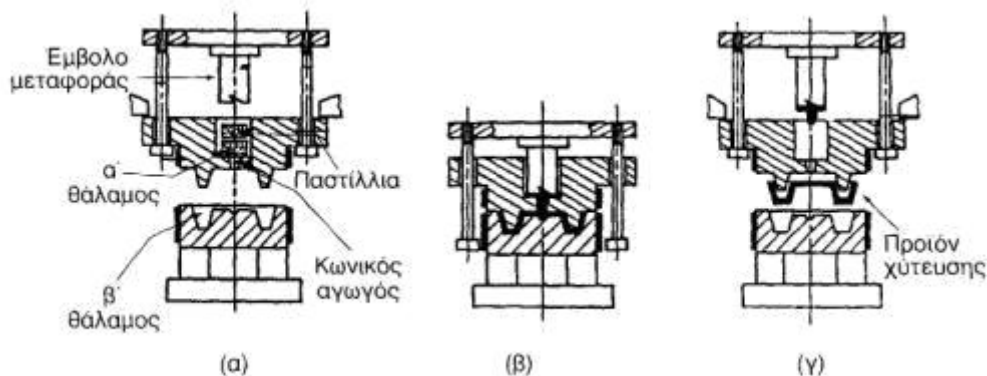
Πλεονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν η ελαχιστοποίηση της φθοράς του υλικού, κατά τη μορφοποίηση, και η ελαχιστοποίηση των παραμενουσών μηχανικών τάσεων στο τελικό προϊόν.

Η μέθοδος αυτή αν και αποτελεί κύρια μέθοδο μορφοποίησης θερμο-σκληρυνόμενων πολυμερών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση θερμοπλαστικών. [1]

ii) Χύτευση Μεταφοράς

Η μορφοποίηση με χύτευση μεταφοράς πραγματοποιείται σε διπλό θάλαμο (όπως δείχνει το σχήμα 2.14):

- Στον πρώτο θάλαμο, τα δύο συστατικά του πολυμερούς (ρητίνη και σκληρυντικό) θερμαίνονται υπό πίεση και τήκονται. Εδώ, πραγματοποιείται η απαραίτητη θερμοκρασιακή ομογενοποίηση της πρώτης ύλης.
- Το τήγμα της πρώτης ύλης ψεκάζεται στο δεύτερο θάλαμο, όπου και γίνεται ο πολυμερισμός της. Η έγχυση γίνεται μέσω θερμαινόμενου κωνικού αγωγού, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η κατάλληλη μείωση του ιξώδους του τήγματος και να δύναται αυτό να πληρώνει επακριβώς τη μήτρα.



Σχήμα 2.14: Χύτευση με Μεταφορά

Η μέθοδος αυτή, συνεπώς, αποτελεί συνδυασμό των μεθόδων χύτευσης με συμπίεση και χύτευσης με έγχυση, αλλά οι πιέσεις που αναπτύσσονται εδώ είναι πολύ μεγαλύτερες: της τάξεως των 300 MPa.

Η μέθοδος ενδείκνυται για την κατασκευή εξαρτημάτων πολύπλοκης γεωμετρίας. Και αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για τη μορφοποίηση ορισμένων θερμοπλαστικών πολυμερών

Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι μέθοδοι μορφοποίησης που χρησιμοποιούνται για τα κυριότερα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή. [1]

Μέθοδοι / Υλικά	Χύτευση Με Συμπίεση	Χύτευση Με Μεταφορά	Χύτευση Με Έγχυση
Αλκυδικά	x	x	x
Πολυαμίνες	x	x	x
Εποξυδικές Ρυτίνες	x		
Φαινολικά	x	x	x
Πολυεστέρες	x		
Πολυιμίδια	x		
Πολυουρεθάνες	x		
Σιλικόνες	x	x	

Πίνακας 2.2: Κατεργασίες Μορφοποίησης Θερμοσκληρυνόμενων Υλικών

2.4. Ελαττώματα Προϊόντων Μορφοποίησης Μέσω Τήγματος

Κατά τη μορφοποίηση πολυμερών με τεχνικές που απαιτούν τήξη της πρώτης ύλης (melt-processing techniques), όπως είναι η εκβολή, η χύτευση με έγχυση και η χύτευση με συμπίεση, πολύ σημαντική παράμετρο για το σχεδιασμό της μήτρας, αποτελεί η ελαστική συμπεριφορά του τήγματος κατά την κατεργασία.

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη χύτευση, σε ορισμένες περιοχές του ρευστού, ο παράγοντας που επηρεάζει κυρίως τη ροή του τήγματος είναι η ελαστική συνιστώσα της τάσης. Για τους μεγάλους ρυθμούς παραγωγής σε βιομηχανική κλίμακα, η ελαστική συμπεριφορά του τήγματος επηρεάζει ακόμα πιο πολύ τις διαστάσεις του προϊόντος, με αποτέλεσμα την όλο και μεγαλύτερη απόκλιση του τελικού προϊόντος από το επιθυμητό σχήμα. Συνέπεια αυτού του φαινομένου είναι η εμφάνιση διαφόρων ελαττωμάτων στο τελικό προϊόν.

Τα συνήθη ελαττώματα που παρουσιάζουν τα πολυμερή που μορφοποιήθηκαν μέσω τήγματος, περιγράφονται παρακάτω:

- ❖ Διόγκωση κατά την έξοδο από τη μήτρα (die swell)

Αναφέρεται στη διόγκωση του πολυμερούς κατά την έξοδο του από τη μήτρα. Αποτελεί το χαρακτηριστικότερο και συνηθέστερο ελάττωμα, κατά τη μορφοποίηση

- ❖ Θραύση τήγματος (melt fracture)

Πρόκειται για τη δημιουργία τοπικών ασυνεχειών μέσα στο τήγμα. Η ανομοιογένεια του τήγματος οδηγεί σε μη συμπαγές τελικό προϊόν

- ❖ "Δέρμα καρχαρία" ("shark-skin")

Η δημιουργία επιφανειακών ρωγμών στο πολυμερές καθιστά τραχεία την επιφάνεια του, η υφή της οποίας είναι γνωστή με τον όρο "δέρμα καρχαρία". [1]

2.5. Παραγωγή Αφρώδων Πολυμερών

Η γενική αρχή που διέπει την παρασκευή αφρώδων πολυμερών (foam polymers) είναι η διόγκωση, δηλαδή η διασπορά στη μάζα του πολυμερούς φυσαλίδων αερίου, οι οποίες προέρχονται από την απελευθέρωση κάποιου μέσου διόγκωσης (blowing agent). Όταν οι κυψελίδες της δομής του πολυμερούς είναι κλειστές, το πολυμερές καλείται αφρώδες, ενώ όταν αυτές επικοινωνούν χρησιμοποιείται ο όρος σπογγώδες πολυμερές.

Οι κυριότερες μέθοδοι παραγωγής αφρώδων πολυμερών είναι:

- Απευθείας διασπορά ενός αερίου στο τήγμα του πολυμερούς με μηχανική ανάδευση.
- Εξάτμιση διαλύτη από τη μάζα του πολυμερούς.
- Παραγωγή αερίου (κυρίως CO₂ και N₂) μέσα στη μάζα του πολυμερούς μετά από χημική αντίδραση προσθέτων. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει ανάμιξη του πολυμερούς με χημικά μέσα, με αποτέλεσμα την έκλυση φυσαλίδων CO₂ μέσα στο τηγμένο πολυμερές ή στη ρητίνη, για τα θερμοσκληρυνόμενα. Πιο συγκεκριμένα, πολυμερές παράγεται σε μορφή λεπτότατων σφαιριδίων, στα οποία περιέχεται το αέριο διόγκωσης, δίνοντας πολυμερές διογκωτικό μέσο. Όταν τα σφαιρίδια διαστέλλονται λόγω της έκλυσης του περιεχόμενου αερίου, παρέχουν μεγάλες σφαίρες με 50πλάσια της αρχικής διάμετρο. Τα σφαιρίδια αυτά συνεγχύονται σε καλούπια με το κύριο πολυμερές υλικό και δημιουργούνται υπερ-ελαφρά προϊόντα, όπως ποτήρια, υλικά συσκευασίας και μονωτικά.
- Με εκτόνωση, ελαττώνοντας την εξωτερική πίεση, κάποιου ήδη διαλελυμένου αερίου υπό μορφή φυσαλίδων.

Ανάλογα με το μηχανισμό διόγκωσης, τα διογκωτικά μέσα ταξινομούνται σε φυσικά και χημικά μέσα, στις περιπτώσεις κατά τις οποίες το αέριο διόγκωσης παράγεται μέσω φυσικής (π.χ. εξάτμιση) ή χημικής διεργασίας (π.χ. χημική αντίδραση), αντίστοιχα.

Η κινητική της διόγκωσης περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια :

- Την πυρηνοποίηση. Στα κρυσταλλικά πολυμερή, κέντρα πυρηνοποίησης αποτελούν τα όρια των κρυσταλλιτών. Το στάδιο της πυρηνοποίησης συναντάται πολύ συχνά στους μετασχηματισμούς φάσεων μεταλλικών και κεραμικών υλικών.
- Την ανάπτυξη, ο ρυθμός της οποίας είναι ανάλογος της παραμορφοσιμότητας των τοιχωμάτων της εκλυόμενης φυσαλίδας.
- Τη σταθεροποίηση, κατά την οποία έχουμε αναστολή της δημιουργίας φυσαλίδων, λόγω της ψύξης του υλικού.

Ακολουθούν χαρακτηριστικά παραδείγματα παραγωγής αφρώδων πολυμερών:

➤ Πολυστυρένιο ή Φελιζόλ

Ενας πτητικός υδρογονάνθρακας, συνήθως πεντάνιο, διασπείρεται, ως μέσο διόγκωσης, στη μάζα των σφαιριδίων του πολυμερούς. Μετά από θέρμανση του υλικού με ατμό, επιτυγχάνεται προ-διόγκωση των σφαιριδίων, τα οποία αποθηκεύονται με στόχο την εξάτμιση της υγρασίας τους. Στη συνέχεια, τα σφαιρίδια εισάγονται στη μήτρα, όπου θερμαίνονται με ατμό μέχρι τελικής διόγκωσης του πολυμερούς. Ακολουθεί ψύξη.

Η τελική πυκνότητα αφρώδους πολυμερούς που προέκυψε από διόγκωση σφαιριδίων μεγάλης διαμέτρου κυμαίνεται μεταξύ 15 και 30 kg/m³. Η χρήση διογκωτικών σφαιριδίων μικρής διαμέτρου δίνει αφρώδες πολυμερές υψηλότερης πυκνότητας (50-65 kg/m³).

➤ Αφρώδη Θερμοπλαστικά Εκβολής (Extruded Thermoplastic Foams)

Πολύ συχνά, το αέριο διόγκωσης τροφοδοτείται στο τήγμα του πολυμερούς μέσα στο θάλαμο εκβολής. Η διόγκωση λαμβάνει χώρα κατά την έξοδο του πλαστικού φύλλου από τη μήτρα. Προκειμένου να ρυθμιστεί το μέγεθος της κυψελίδας του αφρώδους, η πρώτη ύλη αναμιγνύεται με λεπτόκοκκη, ξηρή σκόνη, συνήθως TiO₂, η οποία παίζει το ρόλο του καταλύτη της πυρηνοποίησης, αφού οι φυσαλίδες δημιουργούνται επιλεκτικά στις επιφάνειες της σκόνης.

Οι κύριες εφαρμογές αυτής της κατηγορίας αφορούν σε υλικά συσκευασίας από πολυστυρένιο και πολυαιθυλένιο, με πυκνότητες μεταξύ 30 και 150 kg/m³.

➤ Δομικά Αφρώδη Πολυμερή (Structural Foams)

Οι επιφάνειες αφρώδων υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται για κατασκευές, θα πρέπει να έχουν στιβαρότητα. Για τέτοιου είδους χρήσεις, το πολυμερές χυτεύεται σε καλούπι με ψυχρά τοιχώματα, όπου το τήγμα στερεοποιείται ταχύτατα δίνοντας στιβαρή "επιδερμίδα". Η καρδιά του χυτού ψύχεται με βραδύτερους ρυθμούς, σχηματίζοντας αφρώδες υλικό.

Όλα τα θερμοπλαστικά, όπως π.χ. το ABS, μπορούν να μορφοποιηθούν με τη μέθοδο της χύτευσης με έγχυση, με μεγάλες ταχύτητες, έτσι ώστε η πυκνότητα τους να φτάσει το 60-90% της θεωρητικής τιμής για το συμπαγές υλικό.

Τα προϊόντα που παρασκευάζονται με αυτήν τη μέθοδο βρίσκουν εφαρμογές σε πλαίσια και κιβώτια ηλεκτρονικών υπολογιστών, θήκες ηλεκτρικών συσκευών, κλπ.

➤ Αφρώδη Επεξεργασίας Πολυσυστασιακών Υγρών Μιγμάτων (Multicomponent Liquid Foam Processing)

Μίγμα μονομερών ψεκάζεται ή εγχέεται σε μήτρες, με σκοπό τον in-situ σχηματισμό αφρώδων θερμοσκληρυνόμενων υλικών. Επίσης, η παραγωγή αφρώδων πολυμερών μπορεί να συνδυαστεί με την τεχνική χύτευσης με έγχυση και χημική αντίδραση.

Η τεχνική βρίσκει εφαρμογή στην παραγωγή και τη μορφοποίηση αφρώδους πολυουρεθάνης, η αποκτώμενη πυκνότητα της οποίας μπορεί να φτάσει ως 500 kg/m³. Τα πλαίσια θυρών και επίπλων αποτελούν τα κυριότερα προϊόντα που κατασκευάζονται με αυτήν την τεχνική. [1]

2.6. Τεχνικές Σύνδεσης Πολυμερών

Η σύνδεση των πολυμερών (joining of polymers) γίνεται με τις ακόλουθες τεχνικές:

a) Μηχανική Σύνδεση (*Mechanical Fastening*)

Πραγματοποιείται κυρίως με τη χρήση κοχλιών.

b) Θερμική Σύνδεση (*Thermal Bonding*)

Αναφέρεται στη σύνδεση θερμοπλαστικών πολυμερών με θέρμανση και εφαρμογή πίεσης. Προκειμένου να δημιουργηθεί υγιής σύνδεση, απαιτείται σχολαστική καθαριότητα των επιφανειών συγκολλησεως. Χρησιμοποιούνται διάφορες παραλλαγές:

- (α) Συγκόλληση με θερμαινόμενα εργαλεία ή ράουλα (heated tooling ή rollers). Είναι κατάλληλη για συγκολλήσεις λεπτών πλαστικών φύλλων, π.χ. PE/PTFE.
- (β) Σύνδεση με τριβή (friction joining). Τα προς συγκόλληση τεμάχια έρχονται σε επαφή και μετά από περιστροφή ή από δόνηση, εκλύεται θερμότητα στη διεπιφάνεια, με αποτέλεσμα την τοπική τήξη και συγκόλληση.
- (γ) Συγκόλληση θερμού σύρματος (hot wire welding). Μεταλλικό σύρμα ενσωματώνεται στην επιφάνεια επαφής των δύο πλαστικών τεμαχίων. Κατά τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του σύρματος, απελευθερώνεται θερμότητα, μέσω του φαινομένου Joule, και αφού τακούν τοπικά τα πολυμερή, εφαρμόζεται πίεση, η οποία οδηγεί στη συγκόλληση των τεμαχίων.
- (δ) Σύνδεση με διηλεκτρική θέρμανση (dielectric heating). Λαμβάνει χώρα όταν τα προς σύνδεση τεμάχια εισέλθουν σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Η συχνότητα του πεδίου κυμαίνεται από 1 έως 200 MHz. Η τεχνική ενδείκνυται για συνδέσεις πολυμερών πολωμένων μακρομορίων, όπως π.χ. το PVC.
- (ε) Ηλεκτρομαγνητική ή μαγνητική σύνδεση (electromagnetic bonding ή magnetic heat sealing). Λεπτά μαγνητικά σωματίδια, με διάμετρο περίπου 1 μm, εγκιβωτίζονται στη μάζα του πολυμερούς και τα προς σύνδεση τεμάχια εισάγονται σε μαγνητικό πεδίο υψηλής συχνότητας. Η θέρμανση των μαγνητικών σωματιδίων έχει ως αποτέλεσμα την τήξη και τη σύνδεση των πλαστικών.
- (στ) Συγκόλληση θερμού αερίου (hot-gas welding). Πηγή θερμότητας είναι είτε θερμός αέρας, είτε θερμό αδρανές αέριο. Είναι απαραίτητη η χρήση κυλίνδρου πληρωτικού υλικού, από το ίδιο θερμοπλαστικό, προκειμένου να αναπληρωθεί το υλικό στη ραφή.

c) Συνένωση με Χρήση Συνδετικού Υλικού (*Adhesive Bonding*)

Αποτελεί την ευκολότερη και την πιο διαδεδομένη απ' όλες τις τεχνικές σύνδεσης πολυμερών, πολυμερών/ μετάλλων και πολλών άλλων συνδυασμών υλικών. Το συνδετικό υλικό μπορεί να είναι είτε ένα μονομερές, όπως π.χ. στη σύνδεση PMMA, είτε ένα ελαστομερές, είτε ένα θερμοσκληρυνόμενο, π.χ. εποξυδική ρητίνη, υλικό, ευρισκόμενο μέσα σε κατάλληλο οργανικό πτητικό διαλύτη. Η χρήση του διαλύτη αυτού, οδηγεί στη χαλάρωση των δεσμών συνάφειας στις προς σύνδεση επιφάνειες, τα μόρια των οποίων δύνανται να ενωθούν μεταξύ τους. Η συνένωση των δύο επιφανειών επιτυγχάνεται, μετά την εξάτμιση του διαλύτη. [1]

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1. Δημ. Ι. Παντελής : Μη μεταλλικά Τεχνικά Υλικά, 1996

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

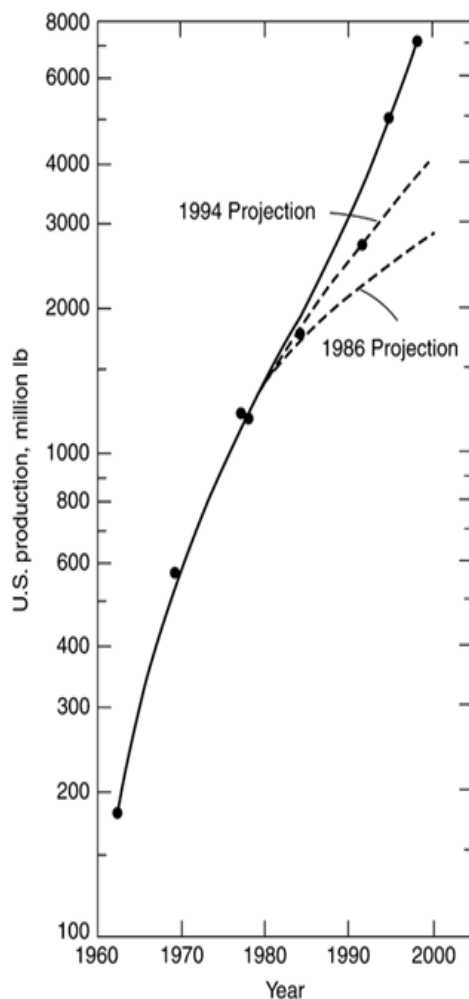
Ιστορία - Στάδια Θερμομόρφωσης

3.1. Εισαγωγή

Η θερμομόρφωση είναι η τεχνική και η επιστήμη της διαμόρφωσης των εμπορικών προϊόντων με το να μετατρέπουμε το πλαστικό φύλλο σε ένα μαλακό, εύκαμπτο προϊόν μέσω της θέρμανσης, να αποκτά το διαμορφωμένο υλικό το σχήμα του μέχρι να γίνει άκαμπτο και να απομονώσουμε το σχηματισμένο μέρος από το σκελετό που το περιβάλλει.

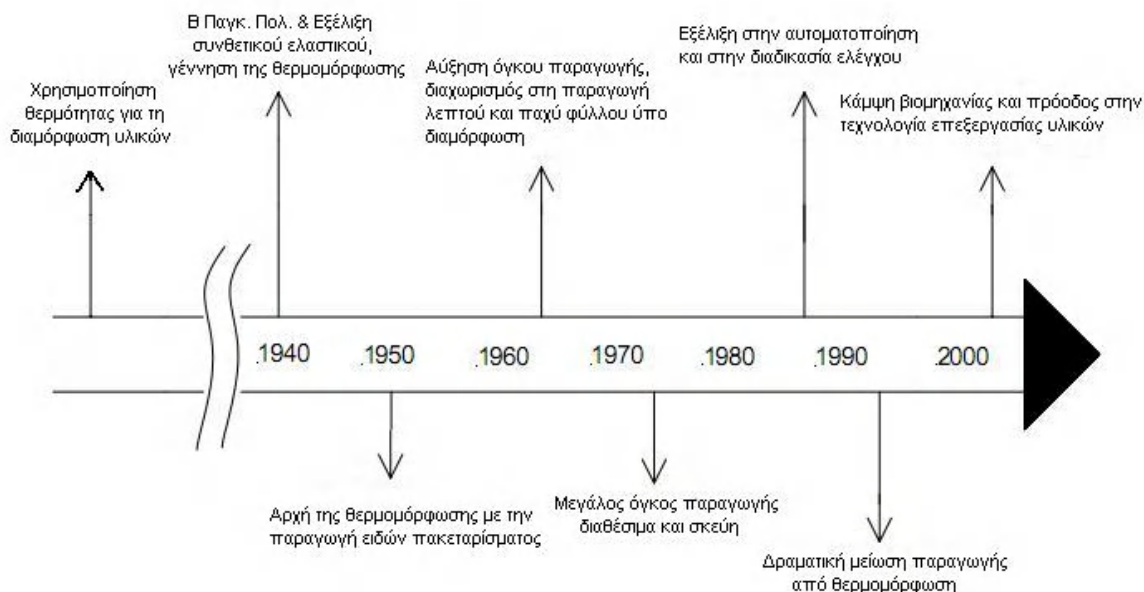
Η θερμομόρφωση – ή αλλιώς «κενή διαμόρφωση» – άρχισε να αναπτύσσεται κατά το 1870, όταν το νιτρικό άλας τεμαχίστηκε σε λεπτά φύλλα, αν και υπήρχαν παραδείγματα, όπου Αιγύπτιοι ή Ιθαγενείς του Ειρηνικού, χρησιμοποιώντας φλοιούς δέντρων ή φυσική κυτταρίνη κατασκεύαζαν κύπελλα και βάρκες πολύ πριν από το 1870. Εκείνη τη χρονιά όμως τα φύλλα κυτταρίνης διαμορφώθηκαν χρησιμοποιώντας μεταλλικές φόρμες και τον ατμό ως θερμαντικό μέσο για τη διαδικασία της μορφοποίησης του πολυμερούς. Τα πρώτα προϊόντα παραγωγής ήταν κουδουνίστρες μωρών, παιχνίδια, καθρέπτες και βούρτσες μαλλιών. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, τα πλήκτρα των πιάνων «ντύθηκαν» με την παραπάνω τεχνική πάνω στο ξύλινο πυρήνα. Το 1930, η εταιρεία Fernplas κατοχύρωσε την πατέντα κατασκευής μπουκαλιών χρησιμοποιώντας 2 μισά θερμομορφωμένων υλικών. Την ίδια χρονιά περίπου κατασκευάστηκαν οι πρώτοι γεωγραφικοί χάρτες των Αμερικανικών Ακτών με τη θερμομόρφωση του οξικού άλατος κυτταρίνης. Η πρώτη μηχανή αυτόματης τροφοδοσίας θερμομόρφωσης πουλήθηκε από την Clauss B. Strauch Co. το 1938, για την παραγωγή τσιγάρων και παγοθηκών. Στα τέλη της δεκαετίας του '30, τα μαθήματα της θέρμανσης, κάμψης και διαμόρφωσης των πλαστικών υλικών διδάσκονταν στις βιομηχανικές σχολές.

Ο Δεύτερος Παγκόσμιος Πόλεμος αύξησε το ενδιαφέρον στη τεχνική της θερμομόρφωσης εξαιτίας της απαίτησης για την κατασκευή των παραθύρων των βομβαρδιστικών-μαχητικών και τμημάτων των πολυβόλων όπλων. Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '50, οι συσκευασίες των τροφίμων, που κατασκευάζονταν μέσω της θερμομόρφωσης, βρίσκονταν στα περισσότερα εμπορικά καταστήματα. Το 1962, στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, 77.000 τόνοι πλαστικών περίπου κατασκευάζονταν με την τεχνική της θερμομόρφωσης. Μέχρι το 1998, περίπου 2,9 εκατομμύρια τόνοι πλαστικού είχαν παραχθεί στη Βόρειο Αμερική. Διαπιστώνουμε ότι υπάρχει μια αύξηση περί του 10% κατά τη διάρκεια τεσσάρων δεκαετιών. Πρόσθετα να αναφέρουμε ότι περίπου 4,55 εκατομμύρια τόνοι πολυμερών πλαστικών παράγονται παγκοσμίως χρησιμοποιώντας την θερμομόρφωση, ενώ η αξία τους υπολογίζεται περί τα 35.000 εκατομμύρια \$.



Σχήμα 3.1: Παραγωγή Θερμομορφωτικών Υλικών στις Η.Π.Α.1 million lb = 455,000 t.

Αν και η βιομηχανία έχει εξελιχθεί αρκετά τον τελευταίο μισό αιώνα, όσο αφορά τον κλάδο της θερμομόρφωσης τα πράγματα εκεί είναι πιο «συντηρητικά». Η εφαρμογή καινούριων και καινοτόμων τεχνολογιών γίνεται με αργά βήματα, σε σύγκριση με άλλους τομείς της βιομηχανίας. Η θερμομόρφωση θεωρείται διαδικασία που στηρίζεται στο τεχνικό προσωπικό και στην εμπειρία αυτού, και για το λόγο αυτό θεωρείται ο κλάδος με τη μεγαλύτερη δυναμική ανάπτυξη. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας υλικών και των διαδικασιών ελέγχου – κυρίως στον έλεγχο της θέρμανσης φύλλων – θα μας επιτρέψει την κατασκευή περισσότερων σύνθετων υλικών. Τέλος μιας και το κόστος της θέρμανσης συνεχώς αυξάνεται αναμένουμε αλματώδη βήματα ανάπτυξης όσο αφορά την βελτίωση και την ενεργειακή απόδοση των διαφόρων διαδικασιών θερμομόρφωσης. Ταυτόχρονα, η άνοδος του κόστους στα υλικά θα οδηγήσει στη μείωση του υλικού που αποβάλλεται κατά το τελικό στάδιο της θερμομόρφωσης. Κανένας δε μπορεί να πει με σιγουριά πως θα είναι το μέλλον της θερμομόρφωσης σε 10 χρόνια από τώρα... Το σίγουρο είναι ότι δείχνει αυτό το μέλλον αρκετά ευόιο.



Σχήμα 3.2: Η εξέλιξη της Θερμομόρφωσης

Συγκρινόμενη με άλλες τεχνικές μορφοποίησης, η θερμομόρφωση προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα.

- Υπάρχει μια ευρεία ποικιλία πολυμερών σωμάτων από την οποία μπορούμε να επιλέξουμε.
- Οι μήτρες διαμόρφωσης είναι μιας πλευράς, οπότε λιγότερο ακριβές σε σχέση με τις μήτρες εγχύσεων.
- Ο χρόνος υλοποίησης, από τη στιγμή που «γεννιέται» η ιδέα κατασκευής κάποιου υλικού, μέχρι το τελικό στάδιο είναι αρκετά σύντομος.
- Υπάρχει μια πληθώρα επιλογών για το υλικό κατασκευής των φορμών, αν και επικρατέστερο είναι το αλουμίνιο, επειδή είναι ελαφρύ, έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα, σχετικά φτηνό και εύκολο στη σχηματοποίησή του.
- Οι θερμοκρασίες παραγωγής είναι χαμηλές.
- Οι πιέσεις που αναπτύσσονται κατά την παραγωγή είναι χαμηλές.
- Υπάρχουν πολλές τεχνικές καθαρισμού.

Παρόλα αυτά όμως, η μέθοδος αυτή παρουσιάζει μερικούς σοβαρούς περιορισμούς.

- Υπάρχει περίπτωση το πολυμερές σώμα της αρεσκείας μας να μην μπορεί να εξωθηθεί από την φόρμα ή να χαλαρώσει αρκετά κατά τη διάρκεια της θέρμανσης.
- Υπάρχει συμπληρωματικό κόστος κατά την παραγωγή των πλαστικών φύλλων, των αχρησιμοποίητων μερών του φύλλου – δηλαδή ο σκελετός ή τα κομμάτια που κόβονται κατά τον καθαρισμό. Τα κομμάτια αυτά πρέπει να ανακυκλώνονται για να μειωθεί το κόστος, όπου αυτό είναι εφικτό μιας και ανάλογα με την τελική χρήση του προϊόντος (ιατρική, φαρμακευτική ή για τροφές) η ανακύκλωση καθίσταται αδύνατη ή περιορισμένη.
- Το πάχος των τοιχωμάτων δεν μπορεί να αλλάξει τοπικά ανάλογα του σχεδίου.
- Το σχέδιο της επιφάνειας μπορεί να απαιτηθεί και στις δυο πλευρές του προϊόντος.
- Η ανοχή κάποιων τμημάτων και οι γωνίες του προσχεδίου μπορεί να είναι απαράδεκτα σφιχτές για τη διαδικασία της θερμομόρφωσης.
- Άλλες διαδικασίες, μέθοδοι μπορεί να είναι οικονομικά ελκυστικότερες.

Μια γενική σύγκριση τεσσάρων θερμοπλαστικών διαδικασιών δίνεται στον πίνακα 3.1. [1]

Χαρακτηριστικά	Θερμομόρφωση	Εκβολή Σε Φόρμα	Εκβολή Με Εμφύσηση	Εκβολή Με Περιστροφή
Μορφή Πολυμερούς	Φύλλο	Σφαίρα	Σφαίρα	Σκόνη
Ποικιλία Πολυμερούς	Καλή έως Άριστη	Άριστη	Καλή	Επαρκής έως Περιορισμένη
Κόστος Πρώτων Υλών	Πολυμερές + Εξώθηση Φύλλων	Κανονικό	Κανονικό	Πολυμερές + Λείανση
Ποικιλία Υλικών των Καλουπιών	Αρκετά Μεγάλη	Πολύ Περιορισμένη	Περιορισμένη	Μεγάλη
Κόστος Καλουπιών	Μέτριο έως Χαμηλό	Υψηλότερο	Υψηλό	Μέτριο έως Χαμηλό
Υλικό Καλουπιού	Αλουμίνιο	Ατσάλι	Αλουμίνιο	Αλουμίνιο – Ατσάλι
Θερμικός Κύκλος Χύτευσης	Ευγενικός	Μέτριος	Μέτριος	Σκληρός
Διαδικασία	Λαστιχένιο Στερεό Φύλλο	Βισκοελαστικό Υγρό	Ελαστικό Υγρό	Λιωμένη Σκόνη
Διάρκεια Κύκλου	Μέτρια έως Σύντομη	Πολύ Σύντομη	Μέτρια	Πολύ Μεγάλη
Αλληλεπίδραση Ανθρώπου/Μηχανής	Αρκετά Υψηλή	Χαμηλή έως Μηδαμινή	Χαμηλή	Πολύ Υψηλή
Ομοιομορφία Τοιχωμάτων	Επαρκή έως Φτωχή	Άριστη	Επαρκή έως Φτωχή	Καλή έως άριστη
Σοβαρά Προβλήματα Σχεδιασμού	Γωνίες, ομοιομορφία στο πάχος τοιχωμάτων	Ανοίγματα, γραμμή συγκόλλησης	Αποκοπή, ομοιομορφία τοιχωμάτων	Πορώδες
Σημεία Κατάρρευσης	Λεπτές Γωνίες, μικροραγίσματα	Γραμμή Συγκόλλησης	Λεπτά τοιχώματα	Φτωχή Ελαστικότητα
Πίεση Λειτουργίας, MPa ^b	-0.1 με 0.5	10 με 100	0.5 με 2.5	0 με 0.1
Θερμοκρασία Λειτουργίας, °C	50 με 250	150 με 300	100 με 250	200 με 350
Μέθοδοι Πλήρωσης	Χειροκίνητα ή Αυτόματα	Αυτόματα	Αυτόματα	Χειροκίνητα
Μέθοδοι Απομάκρυνσης Μερών	Χειροκίνητα ή Αυτόματα	Αυτόματα	Αυτόματα	Χειροκίνητα

Λάμψη	Υψηλότατη	Χαμηλή έως Μηδαμινή	Μέτρια έως Υψηλή	Μέτρια Έως Χαμηλή
Εισαγωγή	Δύναται	Κατορθωτό	Κατορθωτό	Σύνηθες
Διατήρηση Πίεσης	Υψηλότατη	Υψηλή	Υψηλή έως Πολύ Υψηλή	Ελάχιστη έως Μηδαμινή
Συρρίκνωση	Μέτρια έως Υψηλή	Ελεγχόμενη	Μέτρια έως Υψηλή	Υψηλή
Πλεονέκτημα Κατασκευαστικών Μερών	Πολύ Λεπτά Τοιχώματα	Μεγάλη Ποικιλία στο πάχος τοιχωμάτων	Κοίλα Μέρη	Πολύ Μεγάλα Κοίλα Μέρη
Χαρακτηριστικά Κομματιών	Ενιαίο Πλαίσιο	Και οι 2 πλευρές τελειωμένες	Ενιαίο Πλαίσιο	Ενιαίο Πλαίσιο
Σύσταση Επιφάνειας	Καλή	Άριστη	Πολύ Καλή	Μέτρια έως Καλή

^b1 MPa ισοδυναμεί περίπου με 10 atm.

Πίνακας 3.1.: Σύγκριση τεσσάρων θερμοπλαστικών διαδικασιών.

3.2. Προϊόντα Θερμομόρφωσης

Αρχικά, η βιομηχανία της θερμομόρφωσης εστίαζε στην παραγωγή υλικών - απλά σε γεωμετρικό σχήμα – που αφορούσαν τη συσκευασία. Σήμερα, ένα μεγάλος αριθμός διάφορων προϊόντων, ποικίλης πολυπλοκότητας, παράγονται μέσω της θερμομόρφωσης. Αρκετά προϊόντα από θερμομόρφωσης που παράγονται σήμερα είναι αντικαταστάτες της αρχικής μορφής του ίδιου προϊόντος, το οποίο παραγόταν από άλλα υλικά και με διαφορετική μέθοδο. Χάρη στη μέθοδο της θερμομόρφωσης λοιπόν, το πλαστικό, για παράδειγμα, είναι πιο σκληρό ή μπορούμε να του προσδώσουμε εκείνα τα υλικά χαρακτηριστικά (θερμικά, χημικά, ηλεκτρικά κ.α.) που επιθυμούμε να είναι βελτιωμένα. Ο πίνακας 3.2 αποτυπώνει την ποικιλία της βιομηχανίας της θερμομόρφωσης [2].

Βιομηχανία	Προϊόντα και Σχόλια
Συσκευασίας	<ul style="list-style-type: none"> - Τα παράγωγα αυτού του είδους χρησιμοποιούνται για λιανική χρήση - Τα προϊόντα αυτά καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο όγκο στα είδη θερμομόρφωσης - Ανήκουν τα πακέτα με «φουσκάλες» (blister packs), τα οποία είναι και τα πιο δημοφιλή της κατηγορίας - Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και οι οθόνες
Έτοιμων Φαγητών (fast food)	<ul style="list-style-type: none"> - Ακόμα γίνεται παραγωγή σκευών για μεταφορά φαγητού, παρόλο που χαρτονένια σκεύη – που αποσυντίθενται – χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο

Αυτοκίνηση και Συγκοινωνία	<ul style="list-style-type: none"> - Παράγονται τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά εξαρτήματα οχημάτων - Οροφή, πόρτες, πίνακας οργάνων, ντεπόζιτο, πάτωμα, καρότσες οχημάτων - Καθίσματα τρένων και λεωφορείων - Στηρίξεις καθισμάτων αεροσκαφών, μπράτσο καρέκλας αεροσκαφών και αρκετά εσωτερικά εξαρτήματα αεροσκαφών
Σήματα	<ul style="list-style-type: none"> - Μεγάλα ακρυλικά κομμάτια χρησιμοποιούνται για την παραγωγή σημάτων με έντονη επιγραφή
Οικιακές Συσκευές	<ul style="list-style-type: none"> - Εσωτερικά εξαρτήματα ψυγείων, πόρτα ψυγείου - Εσωτερική και εξωτερική επένδυση στο πλυντήριο πιάτων, πλυντήριο ρούχων, στεγνωτήριο ρούχων, εξαρτήματα από air-condition, θήκη προσωπικού υπολογιστή, κουβούκλιο και εξαρτήματα ραδιοφώνου, τηλεόρασης, ηχοσυστήματος
Τροφοδοσίες Φαγητών	<ul style="list-style-type: none"> - Δίσκοι μεταφοράς φαγητού και πιάτα μιας χρήσεως
Φάρμακα	<ul style="list-style-type: none"> - Διάφορα ιατρικά σκεύη και εργαλεία που αποθηκεύονται σε αποστειρωμένες συσκευασίας μιας χρήσεως - Δεν είναι αποδεκτή η χρήση υλικών που ανακυκλώνονται, επειδή η ακεραιότητα της συσκευασίας είναι αρκετά σημαντική - Χειρουργικά τραπέζια, οδοντιατρικές καρέκλες
Κηπευτικά Είδη	<ul style="list-style-type: none"> - Διάφορα κηπευτικά εξαρτήματα - Δίσκοι για μεταφορά φυτών
Είδη Διασκέδασης	<ul style="list-style-type: none"> - Σκαρί μικρών σε μέγεθος καραβιών, κανό, ιστιοφόρα, βάρκες κουπιών - Φέρινγκ καραβιών, μοτοσυκλετών, οχημάτων πάγου κ.α. - Παιδικές πισίνες
Κατασκευαστικά Είδη	<ul style="list-style-type: none"> - Φεγγίτης - Μπανιέρα, περίφραξη ντους - Γκαραζόπορτα
Αποσκευές	<ul style="list-style-type: none"> - Σώμα και εσωτερική επένδυση χαρτοφύλακα και βαλίτσας
Φωτογραφική	<ul style="list-style-type: none"> - Δίσκοι εμφάνισης φιλμ
Επεξεργασία Φαγητού	<ul style="list-style-type: none"> - Σωλήνες και κάδοι αποθήκευσης και επεξεργασίας τροφίμων
Είδη Τελετών	<ul style="list-style-type: none"> - Κέλυφος και εξαρτήματα φέρετρου
Ναυτιλιακά Είδη	<ul style="list-style-type: none"> - Ανθεκτικές πλαστικές κουκέτες αντικαθιστούν τις αντίστοιχες ξύλινες
Διάφορα Είδη	<ul style="list-style-type: none"> - Δεξαμενές αερίου, φωτιστικά σώματα, είδη λούνα-παρκ

Πίνακας 3.2.: Κατάλογος Προϊόντων Θερμομόρφωσης.

3.3. Περιγραφή της Θερμομόρφωσης

3.3.1 Χαρακτηριστικά συστατικά κατά τη θερμομόρφωση

A.Υπό διαμόρφωση φύλλο

Το θερμοπλαστικό φύλλο είναι το σημαντικότερο στοιχείο σε όλη τη διαδικασία της θερμομόρφωσης. Ο ρόλος του είναι εμφανής. Κατά τη μορφοποίηση, το φύλλο μετατρέπεται σε χρήσιμο προϊόν. Η μοριακή δομή του φύλλου είναι καθοριστικής σημασίας κατά τη διαδικασία της θερμομόρφωσης αλλά και για την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Το φύλλο που χρησιμοποιείται είναι πολυμερές, δηλαδή αποτελείται από αλυσίδες μορίων υδρογονάνθρακα. Το μήκος και το πόσο «μπερδεμένες» είναι οι αλυσίδες αυτές αποτελούν σημαντικό παράγοντα κατά τη διαδικασία της θερμομόρφωσης. Πολυμερή με μεγάλες μοριακές αλυσίδες έχουν μεγάλο μοριακό βάρος, οπότε θα είναι ανθεκτικότερες σε σχέση με εκείνα μικρότερων αλυσίδων, τα οποία είναι και αρκετά ασταθή. Στην πραγματικότητα, ένας καθοριστικός παράγοντας για το υπό διαμόρφωση φύλλο είναι να έχει υψηλό σημείο τήξης (μεγάλο μοριακό βάρος), ώστε κατά τη διαδικασία της θέρμανσης για να αποκτήσει το επιθυμητό σχήμα, να μπορεί το υλικό να αντέξει το βάρος του.

Τα θερμοπλαστικά υλικά μπορούν να είναι είτε άμορφα είτε μερικώς κρυσταλλικά. Όπως και το μοριακό βάρος έτσι και ο βαθμός κρυσταλλικότητας είναι σημαντικός παράγοντας κατά τη διαδικασία θερμομόρφωσης. Γενικά, ένα υλικό με ψηλό βαθμό κρυσταλλικής δομής απαιτούν υψηλότερη θερμοκρασία μορφοποίησης σε σχέση με το άμορφο. Από την άλλη πλευρά άμορφα υλικά είναι συνήθως καθαρά από κρυσταλλική δομή, το οποίο μπορεί να αποδειχθεί σοβαρό θέμα ανάλογα με το μηχανισμό θέρμανσης που θα χρησιμοποιηθεί.

Σε αυτό το σημείο θα αναφερθούμε στους τρόπους με τους οποίους παρασκευάζεται το φύλλο υπό διαμόρφωση. Συγκεκριμένα στις μέρες μας προτιμούνται 3 μέθοδοι.

i) Κυλινδροποίηση (Calendaring)

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι παρόμοια με εκείνη παραγωγής χαρτιού. Αρχικά οι μικροί σβώλοι τροφοδοτούνται σε μεγάλους κυλίνδρους, οι οποίοι πολτοποιούν τους σβώλους και δημιουργούν μια μεγάλη λεπτή επιφάνεια, καθώς το πέρασμα γίνεται σε διαδοχικές ομάδες κυλίνδρων. Ο τρόπος αυτός παραγωγής δε δημιουργεί μοριακό προσανατολισμό στην επιφάνεια του φύλλου, το οποίο δημιουργεί πρόβλημα μιας και κατά τη διάρκεια της θέρμανσης το φύλλο μπορεί να παρουσιάσει βαθούλωμα, μιας και δεν είναι αρκετά σκληρό. Ένα άλλο φαινόμενο που μπορεί να παρουσιαστεί σε αυτή τη μέθοδο είναι η ύπαρξη μικρών οπών στην επιφάνεια, οι οποίες δημιουργούνται λόγω της μη σωστής τροφοδοσίας των σβώλων στο σύστημα των κυλίνδρων. Δημιουργούνται θύλακες αέρος, οι οποίοι εν συνεχεία, με το πέρασμα στους κυλίνδρους ανοίγουν και εμφανίζονται οι μικροσκοπικές οπές. Οι οπές αυτές επιτρέπουν τον αέρα να διαφύγει από το φύλλο, το οποίο είναι καταστροφικό και αρκετές φορές το φύλλο που παράγεται είναι άχρηστο για περαιτέρω μορφοποίηση.

ii) Χύτευση (Casting)

Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, λιωμένο πλαστικό χύνεται μέσα σε καλούπι και εν συνεχεία αφήνεται εκεί για να κρυώσει και να σκληρύνει ώστε να σχηματοποιηθεί το συμπαγές πλαστικό φύλλο. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, η χύτευση οδηγεί σε δημιουργία φύλλου το οποίο δεν έχει κάποιο μοριακό προσανατολισμό. Από την άλλη πλευρά όμως δεν δημιουργείται εδώ το φαινόμενο των μικροσκοπικών οπών. Επίσης δεν υπάρχουν παραμένουσες τάσεις στο υλικό και η ανθεκτικότητα του φύλλου παραμένει σταθερή σε όλη την επιφάνεια τους. Με τη μέθοδο αυτή σε κάποια εσωτερικά σημεία του φύλλου υπάρχει όμως η πιθανότητα να εμφανιστούν μικρές φυσαλίδες παγιδευμένου αέρα, με αποτέλεσμα να επηρεάζει την περαιτέρω επεξεργασία του φύλλου.

iii) Εξώθηση (Extruding)

Η μέθοδος αυτή είναι και η πιο διαδομένη όσο αφορά την παραγωγή φύλλων για θερμομόρφωση. Οι κόκκοι εισέρχονται στο βαρέλι εξώθησης και εν συνεχεία οδηγούνται στο χωνί τροφοδοσίας. Κατόπιν λιώνουν και το υγρό υλικό συμπιέζεται μέσα από την κατάληξη του χωνιού για να σχηματιστεί το φύλλο. Μετέπειτα οδηγείται σε μια σειρά κυλίνδρων, οι οποίοι προσδί-δουν το επιθυμητό πάχος στο φύλλο. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες 2 μεθόδους, η εξώθηση παράγει φύλλο το οποίο έχει διαξονικό προσανατολισμό. Αυτός ο προσανατολισμός συμβάλει στην μεγαλύτερη στιβαρότητα και ανθεκτικότητα του φύλλου στο να μη παρουσιάσει «κοιλία», κρέμασμα κατά τη διαδικασία της θερμομόρφωσης, όταν ζεσταίνεται [3].

B. Μεγέθη Φύλλων Υπό Διαμόρφωση και Υλικά Κατασκευής αυτών

Κάθε μια από τις παραπάνω μεθόδους είναι ικανή να παράγει μια μεγάλη γκάμα όσο αφορά το μέγεθος των φύλλων. Η κυλινδροποίηση και η εξώθηση παράγουν φύλλα με ενδεχόμενο ελάττωμα σε κάποιο σημείο αυτού, το πάχος αυτών είναι περιορισμένο. Η χύτευση απεναντίας μπορεί να παράγει φύλλα με μεγαλύτερο πάχος. Συνήθως το πάχος ποικίλλει από 0.05mm μέχρι 15mm και σε μερικές περιπτώσεις για αφρώδη πολυμερή φτάνει μέχρι και τα 60mm. Και όσο αφορά την επιφάνεια του φύλλου έχουμε διακύμανση, από φύλλα επιφάνειας μικρότερη των 30cm² μέχρι και φύλλα της τάξεως των 3m x 3m ή και μεγαλύτερα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι διαστάσεις του φύλλου περιορίζονται μόνο από το μέγεθος της μηχανής που θα τα διαμορφώσει, έχοντας υπόψη ότι όσο μεγαλύτερο σε επιφάνεια είναι το φύλλο, τόσο μεγαλύτερη είναι και η δύναμη που πρέπει να ασκηθεί κατά τη διαμόρφωση αυτού.

Κατά τη θερμομόρφωση γίνεται χρήση ποικίλων υλικών. Το κάθε ένα από αυτά κατέχει τις δικές του ιδιαιτερότητες και συμπεριφέρεται διαφορετικά κατά τη διαδικασία της θερμομόρφωσης. Η επιλογή των υλικών που θα χρησιμοποιήσουμε κατά τη θερμομόρφωση εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, με αποτέλεσμα και μόνο η επιλογή του υλικού αυτού να αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά στάδια κατά τη διάρκεια της μορφοποίησης. Μερικά από τα πιο κοινά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι τα :

- Πολυστυρένιο (PS)
- Πολυστυρένιο μεγάλης σκληρότητας (HIPS)
- Πολυμερές ABS
- Χαμηλής και Υψηλής Πυκνότητας Πολυαιθυλένιο (LDPE & HDPE)
- Πολυπροπυλένιο (PP) και
- Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) [3].

Γ. Ιδιότητες Υλικών και πως αυτές σχετίζονται με τη Θερμομόρφωση

Όπως αναφέρθηκε οι ιδιότητες των υλικών έχουν σημαντικό ρόλο κατά τη διαμόρφωση του φύλλου όσο και στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Στο σημείο αυτό θα αναφερθούμε σε κάποιες σημαντικές ιδιότητες και στο πως επηρεάζουν αυτές το τελικό προϊόν.

☞ Απορρόφηση Υγρασίας

Ορισμένα θερμοπλαστικά υλικά είναι υδρόφιλα, δηλ. έχουν την ικανότητα να απορροφούν την υγρασία. Όταν στο υπό διαμόρφωση φύλλο επικρατεί υγρασία στην επιφάνεια του και αυτό ζεσταίνεται, σχηματίζονται μικρές φουσκάλες στην επιφάνεια. Επίσης, η επικρατούσα υγρασία επηρεάζει το χρόνο μορφοποίησης των υλικών, καθώς επιδρά αρνητικά στη θέρμανση. Σε αρκετές περιπτώσεις η υγρασία μπορεί να καταστρέψει το προϊόν ή ακόμα και να επηρεάσει τις δομικές ιδιότητες αυτού. Στις περιπτώσεις αυτές το κομμάτι απορρίπτεται ως ελαττωματικό. Για το λόγο αυτό, σε ορισμένες εφαρμογές, το φύλλο υπόκειται σε διαδικασίες ξήρανσης.

☞ Συντελεστής Τριβής

Ο συντελεστής αυτός μας ενδιαφέρει κυρίως όταν εφαρμόζονται τεχνικές στις οποίες γίνεται χρήση εμβόλων, κυρίως για να επιμηκύνουμε ορισμένες περιοχές του υπό διαμόρφωση φύλλου. Αν ο συντελεστής τριβής είναι αρκετά μικρός, τότε το έμβολο έχει την τάση να σπρώξει απευθείας στο φύλλο, με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος «τραυματισμού» του φύλλου ή να δημιουργηθεί κάποια περιοχή με ανομοιόμορφη κατανομή πάχους. Από την άλλη μεριά, μεγάλος συντελεστής τριβής συντελεί στο να «κολλήσει» το έμβολο πάνω στην επιφάνεια κατά την επαφή αυτών, με αποτέλεσμα πάλι να έχουμε κίνδυνο να εμφανιστεί περιοχή με ανομοιόμορφη κατανομή πάχους. Είναι περίπλοκη η διαδικασία ώστε να αποκτήσει το φύλλο το σωστό συντελεστή τριβής. Ελάχιστες αλλαγές τόσο στην επιφάνεια της μηχανής που παράγει φύλλα ή στα εργαλεία που χρησιμοποιούνται καθώς και στην θερμοκρασία του φύλλου απαιτούνται ώστε να παραχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

☞ Συρρίκνωση

Η συρρίκνωση των πολυμερών υλικών έχει ιδιαίτερο ρόλο κατά την επεξεργασία αυτών, διότι επηρεάζεται άμεσα η ακεραιότητα του τελικού προϊόντος. Σε αρκετές περιπτώσεις το τελικό προϊόν απορρίπτεται λόγω της συρρίκνωσης. Στη θερμομόρφωση η συρρίκνωση επηρεάζει τις τελικές διαδικασίες, κυρίως το καθαρισμό του κομματιού από εσοχές και άλλες ατέλειες. Η συρρίκνωση έως κάποιου βαθμού είναι αναπόφευκτη κατά τη μορφοποίηση και για αυτό το λόγο θεωρείται σε αρκετές περιπτώσεις τμήμα της παραγωγής.

☞ Μοριακός Προσανατολισμός

Όπως αναφέρθηκε, ο μοριακός προσανατολισμός επηρεάζει τη δομή του υλικού και κυρίως την αντοχή αυτού. Ο βαθμός προσανατολισμού καθορίζεται από το υλικό και από τον τρόπο που αυτό παράχθηκε. Εάν ένα υλικό επιμηκυνθεί κατά μια διεύθυνση, το υλικό γενικά γίνεται πιο ανθεκτικό προς την διεύθυνση αυτή και πιο εύθραυστο προς την αντίθετη κατεύθυνση. Η μορφοποίηση επιμηκύνει το υλικό και αυτό προκαλεί ένα βαθμό προσανατολισμού ο οποίος επηρεάζει την αντοχή του τελικού προϊόντος. Όλα αυτά πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν στο σχεδιασμό.

☞ Στατική Φόρτιση

Τα θερμοπλαστικά φύλλα φορτίζονται ηλεκτροστατικά κατά τη διάρκεια των διάφορων διαδικασιών, με συνέπεια μικρά κομμάτια, όπως μικρά πριονωτά θραύσματα πλαστικών, προσκολλούνται στην επιφάνεια και διαδοχικά ενσωματώνονται στην επιφάνεια του φύλλου. Ως επακόλουθο αυτού το τελικό προϊόν έχει άσχημη αισθητική ποιότητα. Για αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού, πρέπει να δίνεται προσοχή για να μην δημιουργούνται ηλεκτροστατικές φορτίσεις στο χώρο παραγωγής [4].

Δ. Είδη Φύλλων υπό διαμόρφωση και υλικά για Θερμομόρφωση

Ένα πλεονέκτημα της θερμομόρφωσης, όπως αναφέρθηκε, είναι ότι μπορεί να γίνει χρήση ενός μεγάλου πλήθους φύλλων. Ο πίνακας 3.3 αναφέρεται σε κάποια είδη φύλλων προς θερμομόρφωση [4].

Είδος Φύλλου για Θερμομόρφωση	Σχόλια
Φυσικό (Natural)	<ul style="list-style-type: none"> - Παράγονται από ρητίνες, χωρίς τη προσθήκη κάποιου υλικού πληρώσεως - Συνήθως χωρίς κρυσταλλική δομή - Εκπέμπουν θερμική ενέργεια μέσω ακτινοβολίας
Προσανατολισμένο (Oriented)	<ul style="list-style-type: none"> - Πολύ ευαίσθητο κατά τη θέρμανση - Απαιτεί ακριβή και γρήγορη θέρμανση
Με αποχρώσεις βαφής (Tinted)	<ul style="list-style-type: none"> - Φύλλα με προσθήκη βαφής - Σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρείται ελαφρά βελτίωση στην απορρόφηση θερμότητας
Προσθήκη βαφής (Pigmented)	<ul style="list-style-type: none"> - Φύλλα με ομοιόμορφη βαφή
Αφρώδη (Foamed)	<ul style="list-style-type: none"> - Αρκετά ελαφρύτερο υλικό - Σε περίπτωση βαφής μόνο ανοιχτά χρώματα επιτρέπονται
Χαρακτηριστικής Υφής (Textured)	<ul style="list-style-type: none"> - Για μοτίβο χρησιμοποιούνται ειδικοί κύλινδροι
Πολυστρωματικό (Laminated)	<ul style="list-style-type: none"> - Χρήση αυτών για μείωση κόστους
Με εξώθηση (Co-extruded)	<ul style="list-style-type: none"> - Πολυστρωματικά φύλλα - Συνήθως εύκολη και γρήγορη παραγωγή

Τυπωμένο (Printed)	- Φύλλα που είναι πριν τη διεργασία τυπωμένα με εικόνες ή κείμενο
Μάλλινης Υφής (Flocked)	- Φύλλα με απαλή σα βελούδινη υφή, μόνο στη μια πλευρά
Μεταλλικής Υφής (Metallic)	- Φύλλα με μεταλλική επίστρωση παράγονται αλλά δεν είναι δημοφιλή
Ειδικευμένα (Speciality)	- Είναι πιθανή η παραγωγή φύλλων ειδικευμένα σε διάφορα θέματα

Πίνακας 3.3: Είδη Φύλλων Θερμομόρφωσης.

E. Διαδικασία Θέρμανσης

Η διαδικασία θέρμανσης του φύλλου αποτελεί σημαντικό στάδιο κατά τη θερμομόρφωση. Ανεξαρτήτως της πηγής θερμότητας, η θέρμανση πρέπει να έχει ακρίβεια και να είναι επαναλαμβανόμενη ώστε να έχουμε τα επιθυμητά ανά κύκλους αποτελέσματα. Το όλο σύστημα της θέρμανσης πρέπει να μελετάτε, κυρίως για οικονομικούς λόγους, μιας και η θερμομόρφωση απαιτεί τεράστια ποσά ενέργειας και μόνο η θέρμανση χρησιμοποιεί το 80% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης. Οι βασικές ενεργειακές πηγές για έκλυση θερμότητας είναι δύο : το αέριο και ο ηλεκτρισμός. Το αέριο είναι πιο φτηνό από τον ηλεκτρισμό αλλά το δεύτερο μας προσφέρει καλύτερο έλεγχο της θερμοκρασίας. Αν και υπάρχει μια πληθώρα μεθόδων θέρμανσης και θερμοαντήρων, κυρίως χρησιμοποιούνται τρεις μέθοδοι θέρμανσης.

Η πρώτη μέθοδος είναι με χρήση συμβατικών φούρνων με αέριο. Συνήθως αυτοί οι φούρνοι είναι αρκετά μεγάλοι ώστε να στεγάζουν ογκώδη και με μεγάλο πάχος φύλλα. Οι κύκλοι εργασίας των φούρνων αυτών τείνουν να μετριούνται σε ώρες, οπότε διαπιστώνουμε ότι θέρμανση με ηλεκτρισμό δεν είναι εφικτή οικονομικώς. Μέσω τεράστιων φυσητήρων, καυτός αέρας διοχετεύεται προς την επιφάνεια του φύλλου, με αποτέλεσμα αυτό να θερμαίνεται. Οι τεράστιοι αυτοί φούρνοι δεν προσφέρουν ευκολία στον έλεγχο της θερμοκρασίας, το οποίο δεν αποτελεί πρόβλημα, διότι έλεγχος της θερμοκρασίας δεν είναι απαραίτητος, εξαιτίας του μεγέθους και όγκου των φύλλων.

Η δεύτερη μέθοδος συντελείται με μεταφορά θερμότητας με επαφή. Κατά τη μέθοδο αυτή έχουμε θερμαινόμενες μεταλλικές πλάκες, οι οποίες έρχονται σε άμεση επαφή με το φύλλο. Οι πλάκες αυτές μπορούν να θερμομανθούν είτε με φλόγα αερίου είτε με θερμαντικό στοιχείο μέσω ηλεκτρισμού, το οποίο ενσωματώνεται στο φύλλο ή εφάπτεται στις απέναντι επιφάνειες της πλάκας. Με τη μέθοδο αυτή είναι σημαντικό να έχουμε την κατάλληλη επαφή του φύλλου με τις πλάκες. Μη σωστή επαφή μπορεί να παγιδεύσει τον αέρα μεταξύ του φύλλου και της πλάκας και να προκαλέσει ανομοιόμορφη θέρμανση. Ο τρόπος αυτός κρίνεται κατάλληλος για θέρμανση λεπτών φύλλων και επειδή είναι αρκετά αργή, συνήθως το φύλλο προθερμαίνεται με άλλους τρόπους, για αύξηση της ταχύτητας παραγωγής.

Ο τελευταίος τρόπος είναι θέρμανση μέσω ακτινοβολίας, ο οποίος είναι και ο πιο συνηθισμένος. Δε είναι απαραίτητη κάποια επαφή κατά τη μέθοδο αυτή. Η επιφάνεια του φύλλου απορροφά την ακτινοβολούμενη θερμότητα μέσω των θερμοαντήρων και εν συνεχεία αυτή μεταφέρεται μέσω επαφής στο εσωτερικό του φύλλου. Μερικές φορές χρησιμοποιούνται ακτινοβολούμενοι θερμοαντήρες με αέριο αλλά είναι

συνηθέστεροι αυτοί που χρησιμοποιούν ηλεκτρισμό. Οι ακτινοβολούμενοι ηλεκτρικοί θερμαντήρες λειτουργούν σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασίας, ωστόσο η καλύτερη μετατροπή, από πλευράς απόδοσης, ηλεκτρισμού σε ακτινοβολούμενη θερμότητα, συμβαίνει όταν οι θερμαντήρες λειτουργούν σε θερμοκρασία που παράγουν υπέρυθρες ακτινοβολίες μήκους κύματος μεταξύ 3 – 3,5 μm. Μιας και αυτού του είδους θερμαντήρες χρησιμοποιούνται περισσότερο, παραθέτουμε τον παρακάτω πίνακα 3.4, που περιγράφει τα διάφορα είδη ηλεκτρικών θερμαντήρων [5].

Κυλινδρικοί ή ραβδωτοί (tubular or rod)	<ul style="list-style-type: none"> - Πανομοιότυποι με τα θερμαντικά στοιχεία που βρίσκουμε σε ηλεκτρικούς φούρνους - Χαμηλού Κόστους - Άνιση κατανομή θερμότητας - Χρήση ανακλαστήρων μιας και η ενέργεια ακτινοβολείται προς όλες τις κατευθύνσεις.
Επίπεδη Πλάκα (flat strip)	<ul style="list-style-type: none"> - Παρόμοια με ραβδωτό θερμαντήρα αλλά σε μορφή επίπεδης πλάκας - Μπορεί να τοποθετηθεί σε διάφορες μορφές - Χαμηλή απόδοση λόγω της απώλειας θερμότητας μέσω της υποστήριξης
Κεραμικό Υλικό (ceramic)	<ul style="list-style-type: none"> - Αποτελείται από καλώδια τα οποία βρίσκονται ενσωματωμένα σε κεραμικό υλικό - Αρκετά σύνηθες - Μεγάλο κόστος αλλά καλός έλεγχος θερμοκρασίας - Ίδια κατανομή θερμοκρασίας στην επιφάνεια του φύλλου - Απαιτείται περιοδικός καθαρισμός του κεραμικού υλικού - Τα φαινόμενα δυναμικής εμφανίζονται σταδιακά
Pyrex Υλικό	<ul style="list-style-type: none"> - Ηλεκτρικά αγωγίμο υλικό το οποίο καλύπτεται από γυάλινο Pyrex - Συνήθως τοποθετείται με τη μορφή πλαισίου - Υψηλής απόδοσης - Παρέχει ομοιόμορφη θέρμανση σε ολόκληρη την επιφάνεια - Σταδιακά φαινόμενα δυναμικής και εύθραυστο υλικό
Χαλαζίας	<ul style="list-style-type: none"> - Αποτελείται από αγωγίμο υλικό καλυπτόμενο από χαλαζία - Μπορεί να βρεθεί σε επίπεδη μορφή πλαισίου ή κυλινδρικής μορφής - Γρήγορη εμφάνιση δυναμικής μιας και ο χαλαζίας εκπέμπει εύκολα υπέρυθρη ακτινοβολία - Απαιτούνται ανακλαστήρες, οι οποίοι μπορεί να είναι ενσωματωμένοι

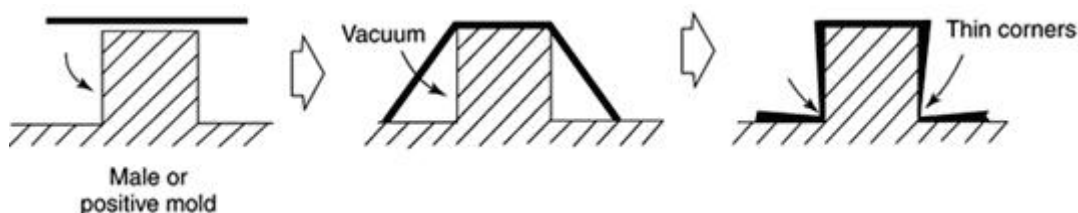
Επίπεδο Πλαίσιο (flat panel)	<ul style="list-style-type: none"> - Θερμαντήρες με επίπεδο πλαίσιο, οι οποίοι καλύπτονται με διάφορα υλικά - Ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας στην επιφάνεια του φύλλου
Θερμαντική Λάμπα (heat lamp)	<ul style="list-style-type: none"> - Σπάνια χρήση σε εφαρμογές θερμομόρφωσης

Πίνακας 3.4: Είδη Ηλεκτρικών Θερμαντήρων Ακτινοβολίας

ΣΤ. Μήτρες, καλούπια θερμομόρφωσης

Η θερμομόρφωση είναι μια από τις πολλές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή πλαστικών ρητινών σε τελικά προϊόντα. Η θερμομόρφωση έχει αρκετές παραλλαγές διαμόρφωσης κατά τη χύτευση, είτε με πίεση, είτε με κενό, είτε με καλούπι. Το πρώτο υλικό όλων των μεθόδων έχει το σχήμα φύλλου ή ταινίας. Το υλικό αυτό θερμαίνεται, έως ότου γίνει μαλακό, και εν συνεχεία του ασκείται πίεση σε καλούπι, πιο ψυχρό από αυτό. Το φύλλο με εφαρμογή πίεσης μένει σταθερό στο καλούπι, μέχρι να γίνει άκαμπτο. Το σχηματισμένο μέρος τότε απομακρύνεται από το καλούπι και ξεχωρίζεται από το πλαστικό που το περιβάλλει. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται ποικίλει από έναν απλό φούρνο μέχρι μια περίπλοκη και αυτοματοποιημένη μηχανή, η οποία μετατρέπει σφαίρες θερμοπλαστικής ρητίνης σε σχηματοποιημένα προϊόντα.

Η μέθοδος της διαμόρφωσης με καλούπι (αρσενική ή θετική διαμόρφωση)



Σχήμα 3.3: Διαμόρφωση με αρσενικό ή θετικό καλούπι

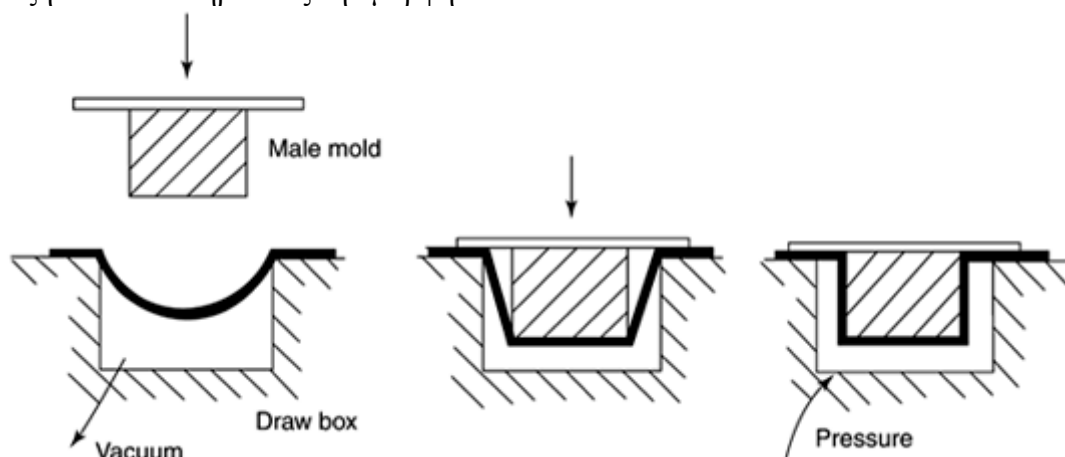
ή της διαμόρφωση με κενό (θηλυκή ή αρνητική διαμόρφωση)



Σχήμα 3.4: Διαμόρφωση με θηλυκό ή αρνητικό καλούπι

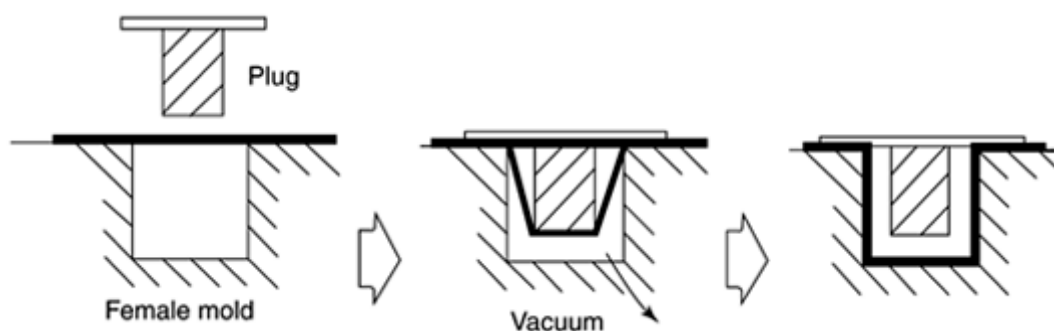
είναι οι απλούστερες και οι πρώτες μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν. Και οι δυο μέθοδοι παράγουν σώματα με αναμοιόμορφα πάχη τοιχωμάτων. Από την άλλη η ελεύθερη διαμόρφωση (με κύμα ή φυσαλίδα αέρος) δεν χρησιμοποιεί κάποιο

καλούπι, αλλά έχουμε τέντωμα του φύλλου στην επιθυμητή έκταση και εν συνεχεία ψύξη αυτού διατηρώντας την μορφή.



Σχήμα 3.4: Παράδειγμα διαμόρφωσης με αρσενικό καλούπι

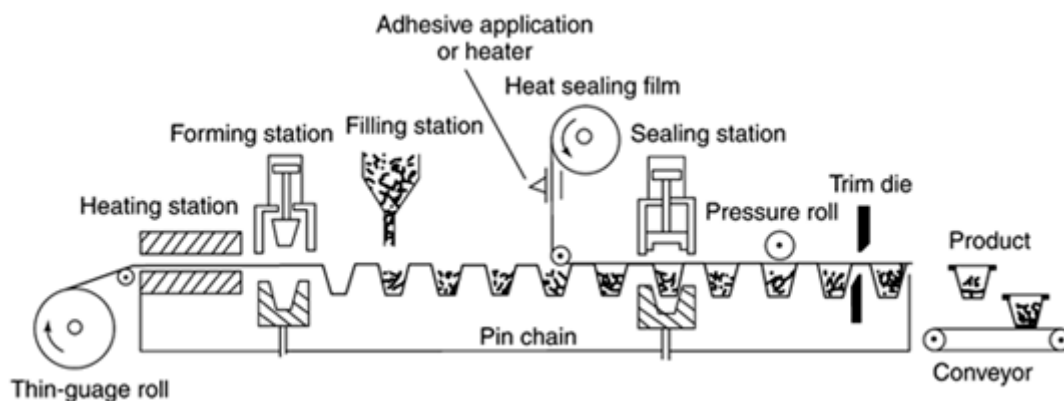
Όταν το φύλλο τεντωθεί και φτάσει κοντά στο κατώτατο σημείο της κοιλότητας των καλουπιών, χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός κενού και συμπιεσμένου αέρα, για τον εξαναγκασμό του φύλλου να απομακρυνθεί από την επιφάνεια των καλουπιών και του εμβόλου.



Σχήμα 3.6: Παράδειγμα διαμόρφωσης με έμβολο

Η διαμόρφωση με εφαρμογή πίεσης χρησιμοποιείται όταν το πλαστικό είναι αρκετά δύσκαμπτο – στην περιοχή της θερμοκρασίας διαμόρφωσης – όπως είναι το πολυστυρένιο, όταν το προς διαμόρφωση κομμάτι απαιτείται να έχει αρκετά καλή λεπτομέρεια στην επιφάνειά του ή όταν τα τμήματα του πλαστικού φύλλου τοποθετούνται σε βαθιές κοιλότητες. Και η διαμόρφωση με ταιριαστά καλούπια χρησιμοποιείται όταν το πλαστικό είναι αρκετά δύσκαμπτο κοντά στη θερμοκρασία διαμόρφωσης, όπως συμβαίνει με τα ενισχυμένα πολυμερή. Η διαμόρφωση με ολίσθηση χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που δεν μπορούμε να ασκήσουμε μεγάλες τάσεις στο φύλλο, όπως στα ενισχυμένα γυάλινα πολυμερή. Κατά της διάρκεια της μορφοποίησης, το θερμαινόμενο φύλλο επιτρέπεται να γλιστρίσει πάνω στο πλαίσιο στερέωσης. Διαφράγματα χρησιμοποιούνται κατά τη διαμόρφωση, κυρίως ένα ανθεκτικό στη θερμότητα νεοπρένιο ή μια μεμβράνη ή μια κύστη σιλικόνης, για την μεταφορά των ζεστών φύλλων στην κοιλότητα των καλουπιών. Τα διαφράγματα συνήθως είναι διογκωμένα με καυτό πετρέλαιο. Η διαμόρφωση διδύμων φύλλων παράγει κοίλα ή ημικόιλα τμήματα. Και τα δύο μισά ενός κομματιού σχηματίζονται σε θηλυκά καλούπια και εν συνεχεία πιέζονται μαζί για τη δημιουργία περιφερειακής «σφραγίδας».

Η διαμόρφωση με επαφή ή η διαμόρφωση των «παγιδευμένων» φύλλων χρησιμοποιείται πρωτίστως με τα μηχανήματα FFS. Το φύλλο προς διαμόρφωση ζεσταίνεται στη μια ή και στις δυο πλευρές μέσω επαφής στη θερμαινόμενη επιφάνεια μετάλλων. Εν συνεχεία το καυτό φύλλο σύρεται στα καλούπια. Από το σημείο αυτό, τα διαμορφωμένα τμήματα του φύλλου τραβιούνται μηχανικά στην πλήρωση (filling station), στην σφράγιση (sealing station) και στην αφαίρεση περιττών τμημάτων (trimming die). Το πλαστικό φύλλο διαμορφώνεται μηχανικά και εν συνεχεία τοπικά ζεσταίνεται και σχηματοποιείται στο τελικό προϊόν, στου οποίου οι ανοικτές ραφές είναι κολλημένες.



Σχήμα 3.7: Μηχανή FFS

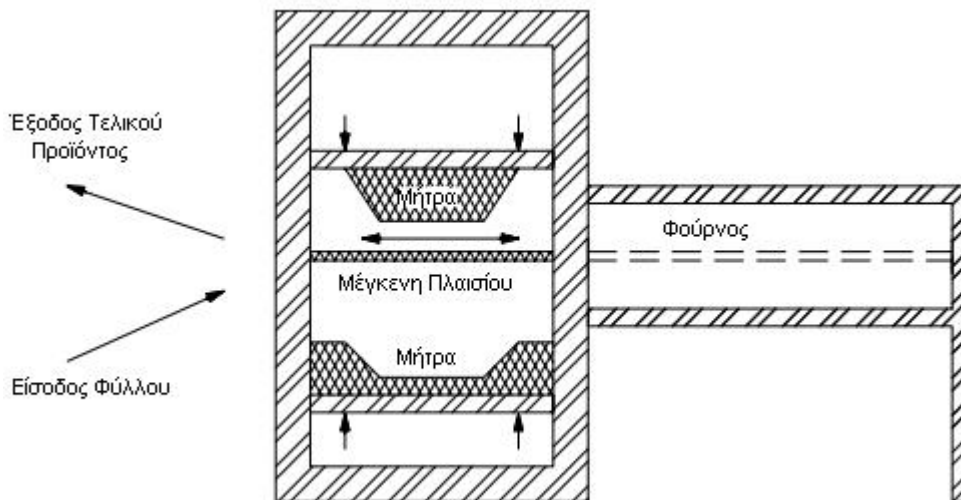
Υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους σχηματοποίησης, όπως η εκβολή και η εκβολή με εμφύσηση. Λόγω των χαμηλών πιέσεων που αναπτύσσονται κατά τη διαδικασία της θερμομόρφωσης, το κόστος εξαρτημάτων και μηχανών είναι σημαντικά μικρότερο. Μεγάλη ποικιλία υλικών μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη θερμομόρφωση. Εντούτοις υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα, όπως το υψηλό κόστος των πρώτων υλών. Η πρώτη ύλη πρέπει να έχει την μορφή φύλλου ή ταινίας, το οποίο ανεβάζει το κόστος. Κατά τον καθαρισμό του τελικού προϊόντος παράγονται απορρίμματα τα οποία δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσω της ανακύκλωσης, το οποίο συντελεί στην αύξηση του κόστους [6].

Z. Μηχανές Θερμομόρφωσης

Οι μηχανές που χρησιμοποιούνται κατά τη θερμομόρφωση έχουν μεγάλη ποικιλία σε μέγεθος και σχήμα. Συνήθως σχεδιάζονται για παραγωγή συγκεκριμένου προϊόντος. Μερικές χρησιμοποιούνται για γενικευμένη παραγωγή, αλλά αυτές οι μηχανές δεν έχουν την υψηλή ταχύτητα παραγωγής άλλων που παράγουν συγκεκριμένα μόνο αυτό το προϊόν. Οι μηχανές αυτές είναι δυο βασικών ειδών : τροφοδοσίας φύλλου και γενικής τροφοδοσίας. Και τα δυο είδη μηχανών είναι αρκετά αυτοματοποιημένες. Το μέγεθος μιας μηχανής γενικά μετριέται ανάλογα με το μέγεθος του καλουπιού που μπορεί να προσαρμοστεί και το μέγεθος της δύναμης μορφοποίησης που ασκείται.

(α) Οι μηχανές τροφοδοσίας φύλλου γενικά μπορούν να εφοδιάσουν μόνο ένα φύλλο κάθε φορά, εκτός από τις μηχανές διπλού φύλλου, οι οποίες επεξεργάζονται δύο φύλλα ταυτόχρονα. Η πιο απλή μηχανή αυτού του είδους είναι μόνιμη μηχανή, η οποία θερμαίνει και μορφοποιεί στην ίδια εγκατάσταση, θέση. Οι πιο κοινές είναι οι μηχανές μικρής διαδρομής (shuttle machine), η οποία φαίνεται στο σχ. 3.8. Το βασικό

χαρακτηριστικό της μηχανής αυτής είναι ότι το φύλλο υπό διαμόρφωση, με ειδικούς σφιγκτήρες, τροφοδοτείται εντός και απομακρύνεται από την περιοχή θέρμανσης. Υπάρχουν αρκετές παραλλαγές σε αυτό το είδος μηχανών, αλλά η βασική αρχή παραμένει η ίδια. Μια παραλλαγή που πρέπει να αναφερθεί είναι η περιστροφική μηχανή μικρής διαδρομής (rotary shuttle machine). Στη μηχανή αυτή, το υπό διαμόρφωση φύλλο προχωράει από σταθμό παραγωγής σε σταθμό, αλλά οι σταθμοί είναι τοποθετημένοι σε πλήρη κυκλική διάταξη, η οποία αυξάνει την ταχύτητα και την απόδοση.



Σχήμα 3.8: Μηχανή Τροφοδοσίας Φύλλου μικρής διαδρομής

(β) Οι μηχανές γενικής τροφοδοσίας είναι μεγάλες σε όγκο και ενσωματώνονται στη γενική διαδικασία παραγωγής, οι οποίες τραβούν ή σπρώχνουν το θερμοπλαστικό υλικό μέσω μεγάλων κυλίνδρων. Η διαδικασία είναι αρκετά αποδοτική μιας και δεν απαιτείται η συνεχόμενη φόρτωση – εκφόρτωση του υλικού μέσα και έξω στη μηχανή. Είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι οι μηχανές αυτές δουλεύουν μόνο με υλικά μικρών διαστάσεων, μιας και δεν είναι δυνατό να περιστρέψουν υλικά με μεγάλο πάχος και διαστάσεις μέσω των κυλίνδρων. Υπάρχει πληθώρα τέτοιων μηχανών τροφοδοσίας, είτε που ασχολούνται με τη διαδικασία καθαρισμού του τελικού προϊόντος, είτε με εισαγωγή του υπό διαμόρφωση υλικού στα διάφορα στάδια παραγωγής, με αποτέλεσμα αυτού του είδους οι μηχανές να χρησιμοποιούνται σε όλο το στάδιο παραγωγής [7].

3.3.2 Στάδια θερμομόρφωσης

Η θερμομόρφωση μπορεί να διαιρεθεί σε τέσσερα βήματα

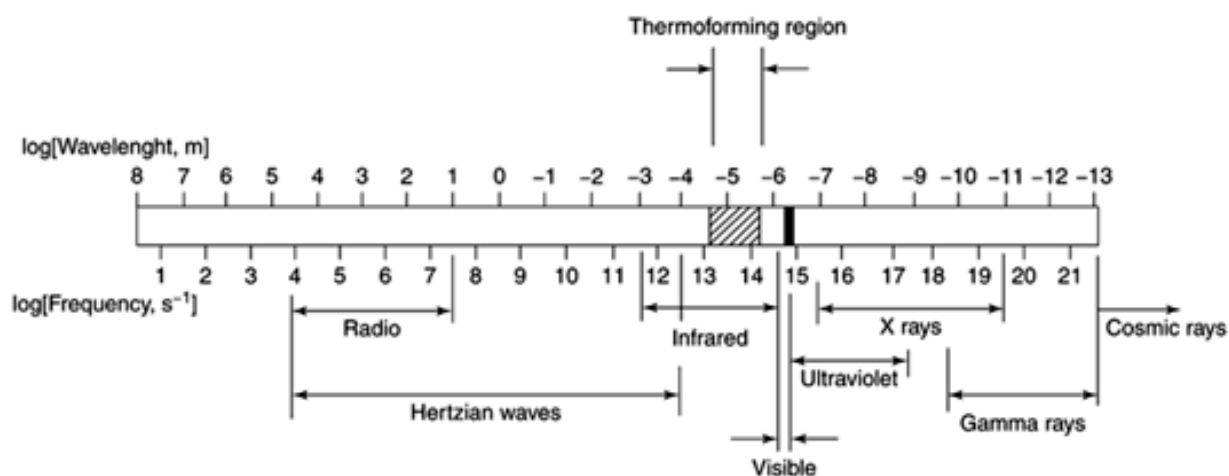
- Θέρμανση του φύλλου στη θερμοκρασία διαμόρφωσης
- Διαμόρφωσης του φύλλου
- Ψύξη φύλλου
- Καθαρισμός τελικού προϊόντος.

ι) Θέρμανση του Φύλλου

Η επιθυμητή θερμοκρασία διαμόρφωσης του πλαστικού φύλλου επιτυγχάνεται με τρεις τρόπους, με επαφή, αγωγή ή ακτινοβολία. Η μεταφορά θερμότητας λόγω επαφής επιτυγχάνεται από την άμεση επαφή μεταξύ του φύλλου και μιας πηγής θερμότητας. Η μεταφορά θερμότητας με αυτό τον τρόπο χρησιμοποιείται όταν το πλαστικό φύλλο είναι πολύ λεπτό. Οι μηχανές FFS χρησιμοποιούν συχνά αυτή τη μέθοδο, στις οποίες ο σταθμός διαμόρφωσης είναι αναπόσπαστο τμήμα με το τμήμα θέρμανσης. Η πυκνότητα του πολυμερούς, ειδική θερμότητα (ενθαλπία ή θερμική πυκνότητα) και η θερμική αγωγιμότητα έχουν σημαντικό ρόλο στη θερμότητα δια επαφής. Σε σχέση με τα μέταλλα, τα πολυμερή υλικά είναι θερμοκοί μονωτές. Η μεταφορά θερμότητας από την επιφάνεια των πλαστικών φύλλων στο εσωτερικό τους, είναι ελεγχόμενη, στην περίπτωση φύλλων με μεγάλο πάχος.

Η μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής επιτυγχάνεται μεταξύ της κίνησης των μορίων του αέρα στην πλαστική επιφάνεια των φύλλων. Ο τρόπος αυτός μεταφοράς θερμότητας συναντιέται παντού, αν η θερμαινόμενη επιφάνεια περιβάλλεται από αέρα όπως και η αντίστοιχη διαμορφωμένη επιφάνεια. Οι φούρνοι που χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο, θερμαίνουν φύλλα μεγάλου πάχους.

Για τις περισσότερες διαδικασίες θερμομόρφωσης, το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας έχει μήκος κύματος στο υπέρυθρο τμήμα, περίπου από το 2.5μm μέχρι και 15μm.



Σχήμα 3.9: Ηλεκτρομαγνητικές περιοχές

Η απόδοση της μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας εξαρτάται από την βαθμό απορρόφησης και εκπομπής καθώς και από τις διαστάσεις και την απόσταση μεταξύ της πηγής θερμότητας και του πολυμερούς υλικού. Κατά τη διαδικασία της θερμομόρφωσης, η θερμότητα δια ακτινοβολίας είναι η παραγωγικότερη και γρηγορότερη μέθοδος για τροποποίηση φύλλων. Η ενέργεια που παράγεται από θερμαντήρες μέσω ακτινοβολίας είναι της τάξης των 30-60KW/m² και φτάνουν σε θερμοκρασίες των 150-900^o C. Οι κοινές πηγές θέρμανσης είναι οι ακόλουθες :

- Καντός Αέρας
- Καντό Ύδωρ – Ατμός
- Λαμπτήρες Ήλιων

- Σπειροειδές Καλώδιο Nichrome
- Θερμαντήρες Ράβδων Χάλυβα
- Ταινία Χάλυβα ή Nichrome
- Θερμαντήρες Σωλήνων Χαλαζία (Καλώδιο Nichrome ή βολφραμίου)
- Θερμαντήρες Αλογόνου (Σωλήνες χαλαζία, γεμισμένοι με αλογονοαέριο, με καλώδιο ή ταινία βολφραμίου)
- Χαλύβδινα Πιάτα με ενσωματωμένο καλώδιο αντίστασης
- Κεραμικά Πιάτα με ενσωματωμένο καλώδιο αντίστασης
- Κεραμικά Τούβλα με ενσωματωμένο καλώδιο αντίστασης
- Θερμαντήρες Υφασμάτων Χαλαζία τα οποία περιέχουν καλώδιο νικελίου – χρωμίου
- Χαλύβδινα Πιάτα τα οποία επανακτινοβολούν την ενέργεια καύσης από τη φλόγα αερίου
- Κεραμικά Πιάτα τα οποία επανακτινοβολούν την ενέργεια καύσης από τη φλόγα αερίου
- Έμμεση καύση αερίου στις καταλυτικές κλίνες
- Άμεση καύση αερίου

Μόνο ένα ποσοστό από εκείνο που εκπέμπεται από την πηγή θερμότητας φτάνει τελικά στο φύλλο. Η επιλογή του κατάλληλου θερμαντήρα επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες:

- Καθημερινές τρέχουσες δαπάνες. Το ενεργειακό κόστος για θερμαντήρες καύσης αερίου έχουν το ¼ του κόστους από τους αντίστοιχους ηλεκτρικούς θερμαντήρες
- Δαπάνες Συντήρησης. Οι θερμαντήρες σωλήνων χαλαζία είναι εύθραυστες και πρέπει να καθαρίζονται προσεκτικά. Οι θερμαντήρες ράβδων είναι τραχιές αλλά μπορούν να χάσουν γρήγορα την αποδοτικότητά τους.
- Αρχικό κόστος εγκαταστάσεων. Οι θερμαντήρες πιάτων και ο πίνακας οργάνων απαιτούν τις λιγότερες ηλεκτρικές συνδέσεις από τους αντίστοιχους κεραμικών τούβλων. Οι θερμαντήρες καταλυτικής καύσης απαιτούν και αέριο και ηλεκτρικές συνδέσεις.
- Η πολλαπλή χρήση θερμαντήρων. Οι θερμαντήρες αλογόνου και χαλαζία θερμαίνουν πολύ γρήγορα, έναντι των θερμαντήρων καταλυτικής καύσης. Οι θερμαντήρες κεραμικών τούβλων προσφέρουν ευχέρεια στην θέρμανση κατά ζωνών.
- Χαρακτηριστικά Πολυμερών. Το πάχος των φύλλων και ο βαθμός απορρόφησης της υπέρυθρης ακτινοβολίας επηρεάζουν σημαντικά τη μέθοδο θέρμανσης. Πολυμερή με υψηλά επίπεδα εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας θερμαίνονται πιο αργά σε σχέση με εκείνα με χαμηλά επίπεδα. Τα λεπτά πολυμερή φύλλα ζεσταίνονται πιο αργά σε σχέση με τα παχιά. Τα κρυσταλλικά πολυμερή, όπως το πολυαιθυλένιο και πολυπροπυλένιο απαιτούν περισσότερη ενέργεια για να φτάσουν σε θερμοκρασία διαμόρφωσης, σε σχέση με τα άμορφα πολυμερή, όπως το πολυστυρόλιο και το πολυβινυλοχλωρίδιο. Τα κρυσταλλικά πολυμερή ωφελούνται περισσότερο αν υπάρχει προθέρμανση.

Οι περισσότεροι σύγχρονοι φούρνοι διαμόρφωσης, θερμαίνουν τα φύλλα και από τις δύο πλευρές. Ο βαθμός απόδοσης των φούρνων εξαρτάται και από την απόσταση των θερμαντικών επιφανειών με την επιφάνεια του φύλλου, από το αν είναι κλειστός ή ανοιχτός φούρνος, το μέγεθος και την ανακλαστική φύση των μη-θερμαινόμενων επιφανειών, τη θερμική προστασία των συσκευών στερέωσης των φύλλων, την περιοχή του θερμαντήρα – φύλλου και από τον αριθμό των μικρών αυλών του φούρνου.

ii) Διαμόρφωση Φύλλου

Μόλις το φύλλο φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία διαμόρφωσης είναι έτοιμο να τεντωθεί και να διαμορφωθεί. Για να τεντωθεί το καυτό και εύκαμπτο φύλλο και να προχωρήσει στην διαμόρφωση του περιγράμματος και των γωνιών του καλουπιού χρειάζεται η εφαρμογή κάποιας πίεσης, δύναμης. Η δύναμη αυτή καθίσταται μέσω χρήσης κενού, συμπιεσμένου αέρα, μηχανικών ενισχύσεων (όπως έμβολα ή λαστιχένια διαφράγματα) ή συνδυασμό των παραπάνω. Ο τύπος της δύναμης που θα ασκηθεί εξαρτάται από το μέγεθος του προϊόντος, τον αριθμό των κομματιών που θα παραχθούν, τον χρόνο των κύκλων, το υλικό του καλουπιού και τον εξοπλισμό της θερμομόρφωσης. Μόλις το φύλλο ακουμπήσει την επιφάνεια του καλουπιού κατά τη διαδικασία του τεντώματος, τότε σταματά το τέντωμα. Σαν αποτέλεσμα, το κομμάτι είναι πιο παχύ στις περιοχές που το φύλλο ακούμπησε το τοίχωμα του καλουπιού πρώτα και πιο λεπτό στις περιοχές που ακούμπησε στο τέλος. Το πάχος του τοιχώματος μπορεί να προβλεφθεί αρκετά με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Το φυσικό φύλλο αντικαθίσταται με ένα δισδιάστατο πλέγμα τριγωνικών στοιχείων και κόμβων, στο οποίο πλέον εφαρμόζουμε αυξανόμενο φορτίο. Το μοντέλου του Odgen είναι το πιο διαδομένο στον υπολογισμό του εφαρμοσμένου φορτίου. Στις περιπτώσεις που ο βαθμός στον οποίο το φύλλο τεντώνεται είναι μικρός, απλούστερες μέθοδοι διαμόρφωσης, όπως με κενό μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Σε εφαρμογές όμως, που ο βαθμός είναι μεγάλος, διεργασία τεντώματος του φύλλου απαιτείται, πριν την εφαρμογή της πίεσης διαμόρφωσης. Οι μέθοδοι διαμόρφωσης μπορούν να χωριστούν σε 2 τύπους :

- Ενός βήματος διαμόρφωση
- Πολλών βημάτων διαμόρφωση

iii) Ψύξη Φύλλου

Η ψύξη του φύλλου αρχίζει μόλις βγει από το φούρνο θέρμανσης. Το φύλλο χάνει θερμότητα μέσω επαφής, απαγωγής και ακτινοβολίας, κατά τη διάρκεια των σταδίων του τεντώματος και της διαμόρφωσης. Η ψύξη είναι εντονότερη κατά το τέλος του σταδίου διαμόρφωσης, όταν έρχεται σε επαφή το φύλλο με το καλούπι. Ο χρόνος ψύξης εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες :

- Τον τύπο του πολυμερούς
- Το πάχος του υλικού μετά το τέντωμα
- Τη θερμοκρασία διαμόρφωσης
- Τη θερμοκρασία μετά τη διαμόρφωση
- Το υλικό του καλουπιού
- Τη θερμοκρασία του καλουπιού και

-- Την επαφή μεταξύ του διαμορφωμένου μέρους και του καλουπιού.

Τα διαφορετικά πλαστικά υλικά έχουν διαφορετικές θερμικές ιδιότητες. Πλαστικά με συγκεκριμένη υψηλή θερμότητα και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα θέλουν αρκετή ώρα για να ψυχθούν. Ο χρόνος ψύξης είναι ανάλογος με το πάχος των τοιχωμάτων. Το υλικό μπορεί να απομακρυνθεί από την φόρμα μόνο όταν θα έχει ψυχθεί η περιοχή με την παχύτερη διατομή. Όσο ψηλότερη είναι η θερμοκρασία διαμόρφωσης, τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται για πέσει η θερμοκρασία στο σημείο εκείνο ώστε το κομμάτι να μπορεί να βγει από το καλούπι. Ο χρόνος ψύξης εξαρτάται από το υλικό των καλουπιών, για το λόγο αυτό φόρμες με υψηλή θερμική αγωγιμότητα, όπως το αλουμίνιο, έχουν σύντομο χρόνο ψύξης. Απαιτείται όμως και καλή επαφή μεταξύ του φύλλου και της μηχανής για να επιτευχθεί καλή και γρήγορη ψύξη. Μη καλή επαφή έχουμε στην περίπτωση που υπάρχει παγιδευμένος αέρας μεταξύ φύλλου και καλουπιού.

iv) Καθαρισμός Τελικού Προϊόντος

Ο καθαρισμός επιτυγχάνεται με μηχανική κοπή ή σπάσιμο των περιττών κομματιών του κρύου πλέον φύλλου. Κατά τον τεμαχισμό περιττών εξογκωμάτων με συμπίεση (compression cutting), έχουμε τη συμπίεση μηχανικώς, μιας αιχμηρής άκρης μετάλλων, έναντι στο πλαστικό μέρος του φύλλου, το οποίο θέλουμε να καθαρίσουμε από τα περιττά εξογκώματα και τμήματα. Συνήθως η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για κοπή πλαστικού λιγότερου από 1,5 χιλ. σε πάχος ή για κοπή πλαστικού χαμηλής πυκνότητας ανεξαρτήτου πάχους. Η αιχμηρή άκρη μετάλλου, συνήθως χάλυβα μορφής κύβου, ασκείται συνήθως ενάντια σε αμόνι [8].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1. The industrial Thermomorfing Business: Review and Outlook, Plastics Custom Research Services, Advance NC,2004.
2. P. J. Mooney, Understanding the Thermoforming Packaging Business, Plastics Custom Research Services, Advance, N.C., 2002.
3. J.L. Throne, Understanding Thermomorfing, Hanser Gardner Publications, Inc., Cincinnati OH, 1999.
4. Wm. K. McConnell Jr., Ten Fundamentals of Thermoforming: Companion Volume, Society of Plastic Engineers, Brookfield, Conn., 2001.
5. J.L. Throne, Technology of Thermomorfing, Hanser Verlag, Munich, 1996.
6. J. L. Throne, Plastics Process Engineering, Marcel Dekker, New York, 1979, pp. 850–859.
7. K. J. Susnjara, Three Dimensional Trimming & Machining: The Five Axis CNC Router, Thermwood Corp., Dale, Ind., 1999.
8. J. L. Throne, Advances in Thermoforming, Rapra Review Report, Vol. 8, No. 9, London, 1997.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

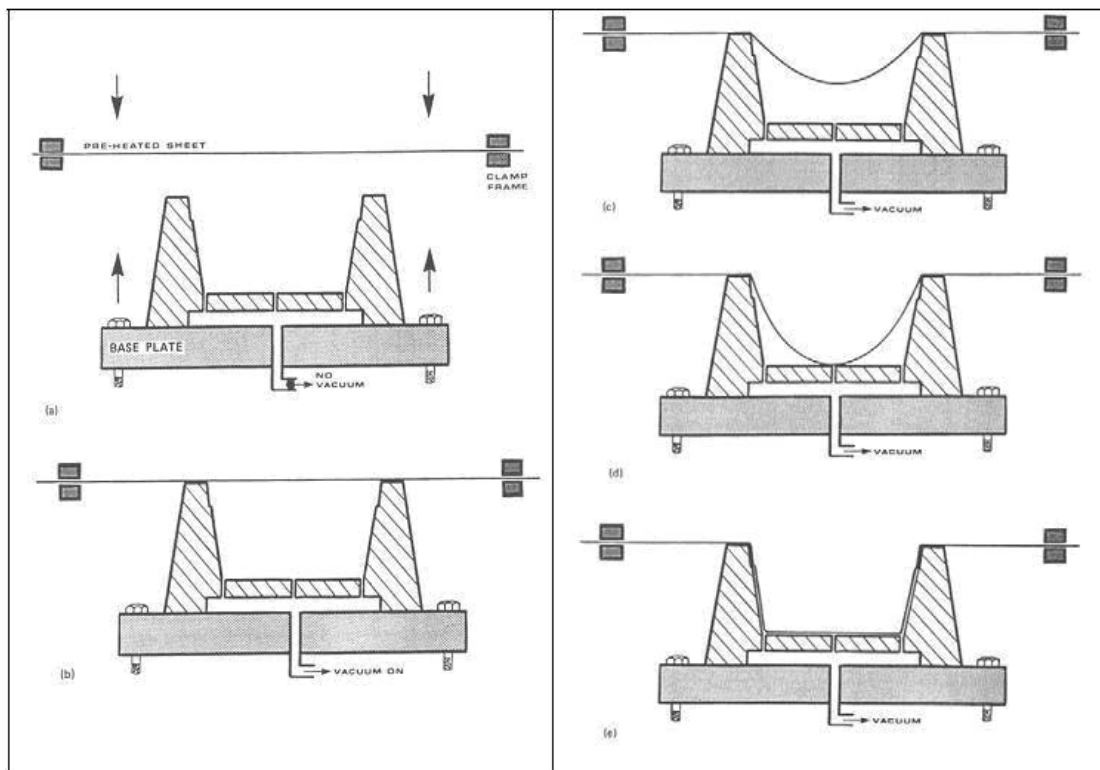
Τεχνικές Θερμομόρφωσης

4.1 Εισαγωγή

Έχουμε αρκετές παραλλαγές της βασικής μεθόδου θερμομόρφωσης, οι οποίες αναπτύχθηκαν είτε για να βελτιώσουν τη τεχνική διαμόρφωσης είτε για να βελτιώσουν το τελικό προϊόν. Κάποιες τεχνικές αναπτύχθηκαν για να διαμορφωθούν υλικά τα οποία ήταν αδύνατα να διαμορφωθούν μέσω συμβατικών τεχνικών. Ο κύριος σκοπός στην ανάπτυξη μιας νέας τεχνικής είναι για να έχουμε καλύτερη κατανομή υλικού στο τελικό προϊόν και καλύτερη διόγκωση του υλικού στην τελική του μορφή. Κάποιες τεχνικές διαμόρφωσης αναπτύσσονται παρακάτω [1]

4.2 Διαμόρφωση σε Κενό (Vacuum Forming)

Κατά τη διαμόρφωση σε κενό έχουμε χρήση ενός κοίλου καλούπιού και την απομάκρυνση του αέρα ανάμεσα στο καλούπι και στο φύλλο όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.1: Διαδοχική Σειρά Θερμομόρφωσης Υπό Κενό

Καθώς ο αέρας εκκενώνεται μεταξύ της μήτρας και του φύλλου, η ατμοσφαιρική πίεση αναγκάζει το καυτό εύκαμπτο φύλλο να πάρει την μορφή της μήτρας. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για τελικά προϊόντα που είναι ρηχά, μιας και το φύλλο αραιώνει στο εσωτερικό του και δημιουργεί βαθιά κοίλα μέρη. Με τη μέθοδο αυτή παράγονται τμήματα των οποίων τα πλευρικά τοιχώματα είναι παχιά και τα κατώτατα σημεία λεπτά. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την μέθοδο αυτή είναι οι :

- Η επαρκής σφράγιση μεταξύ του φύλλου και της φόρμας,
- ο όγκος ο οποίος εκκενώνεται και
- η δύναμη που απαιτείται για τη διαμόρφωση του προϊόντος.

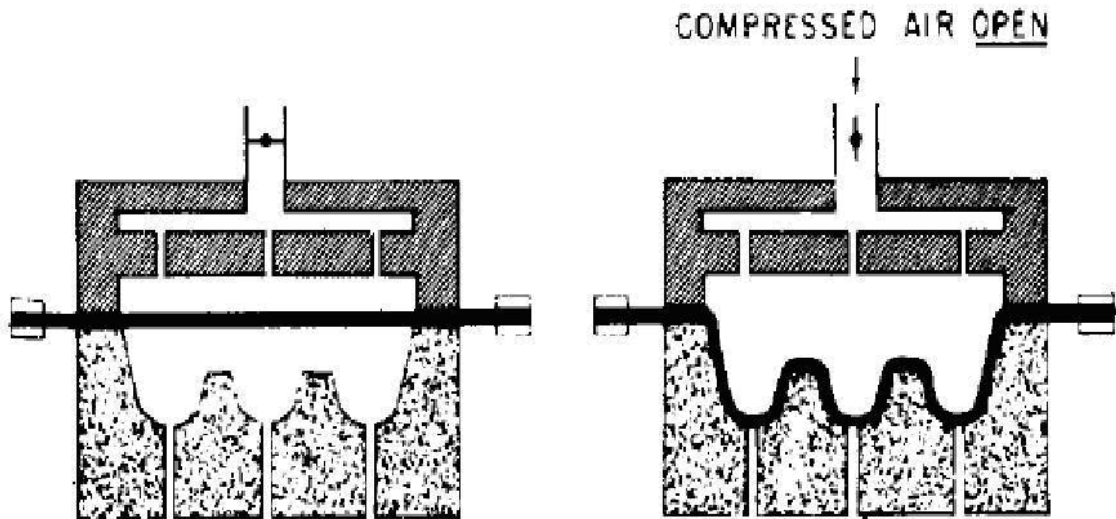
Η ύπαρξη καλού σφραγίσματος μεταξύ του καλουπιού και του φύλλου είναι απαραίτητη μιας και οποιαδήποτε διαρροή συμβάλλει στην πτώση της δύναμης που δημιουργείται από το κενό, με αποτέλεσμα να παράγονται προϊόντα με φτωχή ποιότητα. Η χωρητικότητα των αντλιών κενού πρέπει πάντα να ταιριάζει με τον όγκο του προϊόντος, ώστε να γίνει σωστή η εκκένωση. Για την ανάπτυξη υψηλών δυνάμεων μέσω κενού πρέπει να γίνει χρήση δεξαμενών (surge tanks). Οι δεξαμενές αυτές είναι πηγή κενού, στις οποίες εκκενώνεται ο αέρας μέσω μικρών αντλιών κενού. Το κενό στις δεξαμενές αυτές συνεχώς ανανεώνεται μέσω της αντλίας. [2]

4.3 Διαμόρφωση υπό Πίεση (Pressure Forming)

Στη μέθοδο της διαμόρφωσης υπό κενό, η μέγιστη δύναμη η οποία είναι διαθέσιμη είναι η ατμοσφαιρική πίεση. Προκειμένου να παραχθούν κομμάτια με μεγαλύτερη λεπτομέρεια και ταχύτητα παραγωγής, η μέγιστη δύναμη, δηλαδή η πίεση πρέπει να αυξηθεί. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη μέθοδο της διαμόρφωσης υπό πίεση, στην οποία η μέγιστη δύναμη – πίεση διαμόρφωσης των προϊόντων κυμαίνεται από 0,2 έως 0,7 MPa. Παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν κατά τη μέθοδο αυτή είναι οι εξής :

- Το υλικό κατασκευής της μήτρας, καλουπιού,
- Ο εξαερισμός της μήτρας,
- Το σφράγισμα μεταξύ του καλουπιού και του κιβωτίου πίεσης και
- Η δύναμη πίεσης που απαιτείται.

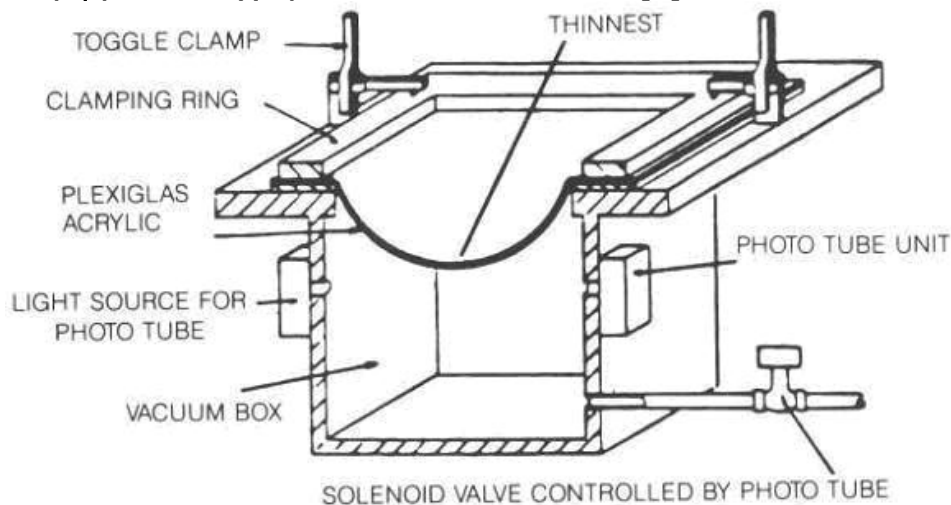
Το καλούπι πρέπει να αντέξει στις δυνάμεις διαμόρφωσης που επρόκειτο να αναπτυχθούν. Έτσι σαν υλικό, για τις μήτρες, υπάρχει προτίμηση στο χυτό αλουμίνιο και στα μέταλλα επεξεργασμένα σε εργαλειομηχανές. Η ύπαρξη διαρροής μεταξύ του κιβωτίου πίεσης και του καλουπιού προκαλεί μείωση στην πίεση διαμόρφωσης, με αποτέλεσμα το περίγραμμα του τελικού προϊόντος να είναι φτωχό σε σαφήνεια. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, το καυτό φύλλο ενεργεί σαν σφράγισμα, αλλά και κάποια υλικά στεγανοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μερικές περιπτώσεις. Τα υλικά όμως αυτά στεγανοποίησης πρέπει να είναι ικανά στο να αντέχουν τις δυνάμεις πίεσης που αναπτύσσονται κατά τη διαμόρφωση. Ο εξαερισμός – ο οποίος πρέπει να βρίσκεται στο κατώτατο σημείο της κοιλότητας της μήτρας – πρέπει να επιτρέπει την άμεση και γρήγορη εκκένωση του καλουπιού όταν η πίεση εφαρμόζεται. Εάν το μέγεθος των οπών εξαερισμού είναι πολύ μικρό ή ο αριθμός των οπών είναι ανεπαρκής ή η τοποθέτηση αυτών δεν είναι σωστή, μπορεί να υπάρξει παγιδευμένος αέρας. Ο παγιδευμένος αυτός αέρας δεν θα επιτρέψει το καυτό φύλλο να προσαρμοστεί πάνω στο περίγραμμα του καλουπιού, με αποτέλεσμα να έχουμε διαστρέβλωση κάποιων τμημάτων του τελικού προϊόντος. Η πίεση που αναπτύσσεται κατά τη διαμόρφωση αυτή είναι αρκετά κρίσιμη. Αν η τιμή της είναι αρκετά χαμηλή θα έχουμε τμήματα του τελικού προϊόντος με φτωχή σαφήνεια περιγράμματος, ενώ υψηλές τιμές πίεσης μπορεί να προκαλέσουν διαστρέβλωση κάποιων τμημάτων, μιας και δεν υπάρχει αρκετός χρόνος για την εκκένωση της μήτρας. Οι υψηλές πιέσεις μπορούν να οδηγήσουν ακόμα και σε διαχωρισμό των 2 πλακών πίεσης και να υπάρξει κατόπιν διαρροή. [2]



Σχήμα 4.2: Διαδοχική Σειρά Θερμομόρφωσης Υπό Πίεση

4.4 Ελεύθερη Διαμόρφωση, μέσω Κύματος ή Φυσαλίδων (Free, Billow or Bubble Forming)

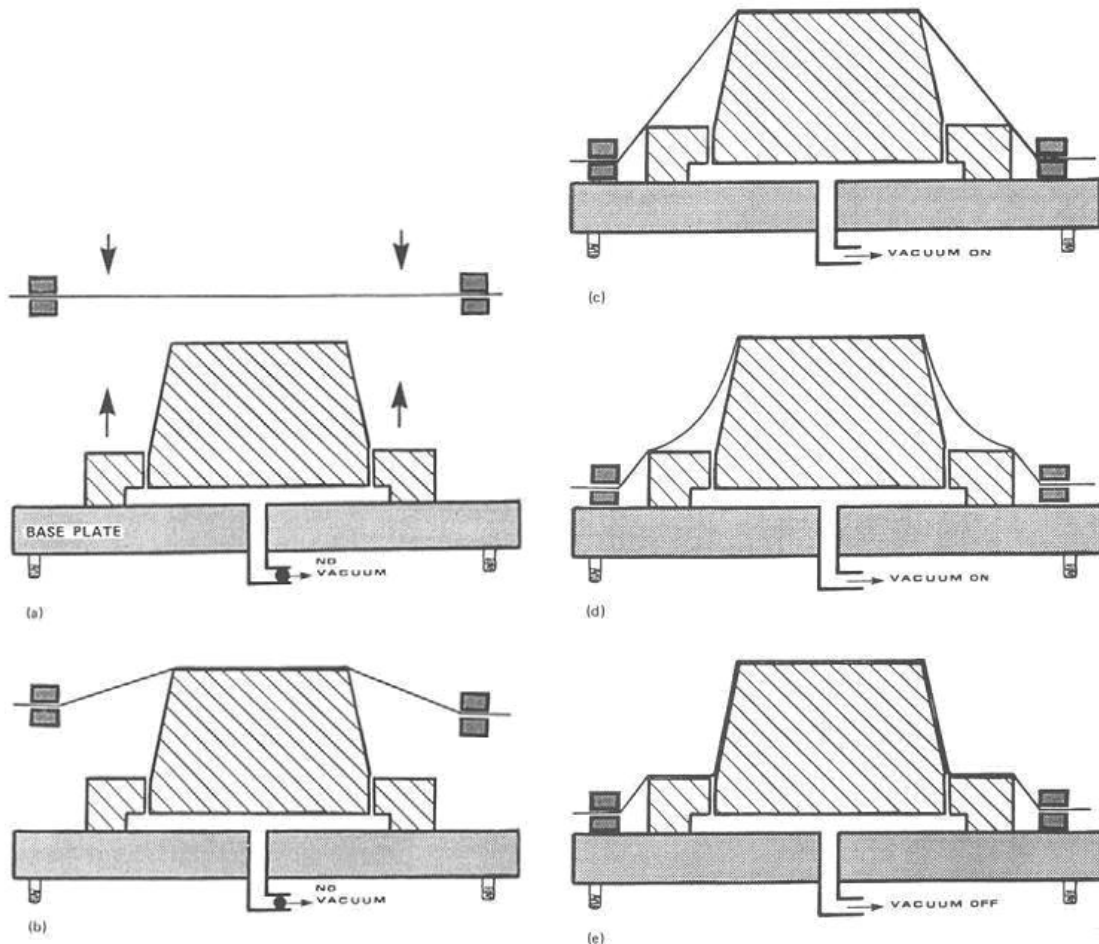
Σε αυτήν τη μέθοδο, το καυτό φύλλο σφραγίζεται έναντι σε ένα κουτί υπό κενό, και το κενό εξάγεται όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχέδιο. Η διαφορά πίεσης αναγκάζει το φύλλο να διογκωθεί προς το εσωτερικό του κουτιού. Το κενό πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά και περιοδικά, ώστε να έχει συνεχόμενη και καλή μορφή το τελικό προϊόν. Μόνο το βάθος και η περίμετρος μπορούν να ποικίλλουν με αυτή τη μέθοδο διαμόρφωσης. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για παραγωγή διαφανών προϊόντων, όπως φωταγωγοί, δεδομένου ότι το φύλλο δεν έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματα του καλουπιού. [2]



Σχήμα 4.3: Ελεύθερης Διαμόρφωσης σε κενό

4.5 Διαμόρφωση υπό Σκεπάσματος (Drape Forming)

Σε αυτήν τη μέθοδο (σχήμα 4.4), το θερμαινόμενο φύλλο διαμορφώνεται έναντι μιας αρσενικής μήτρας. Σε αντίθεση με την μέθοδο διαμόρφωσης με διαδοχικές κοιλότητες (straight cavity forming), η μέθοδος αυτή δίνει προϊόντα με παχύ τοίχωμα στο κατώτατο σημείο και λεπταίνει στην περιοχή των φλαντζών. Εσωτερικά του τελικού προϊόντος έχουμε καλό φινίρισμα της επιφάνειας. [2]

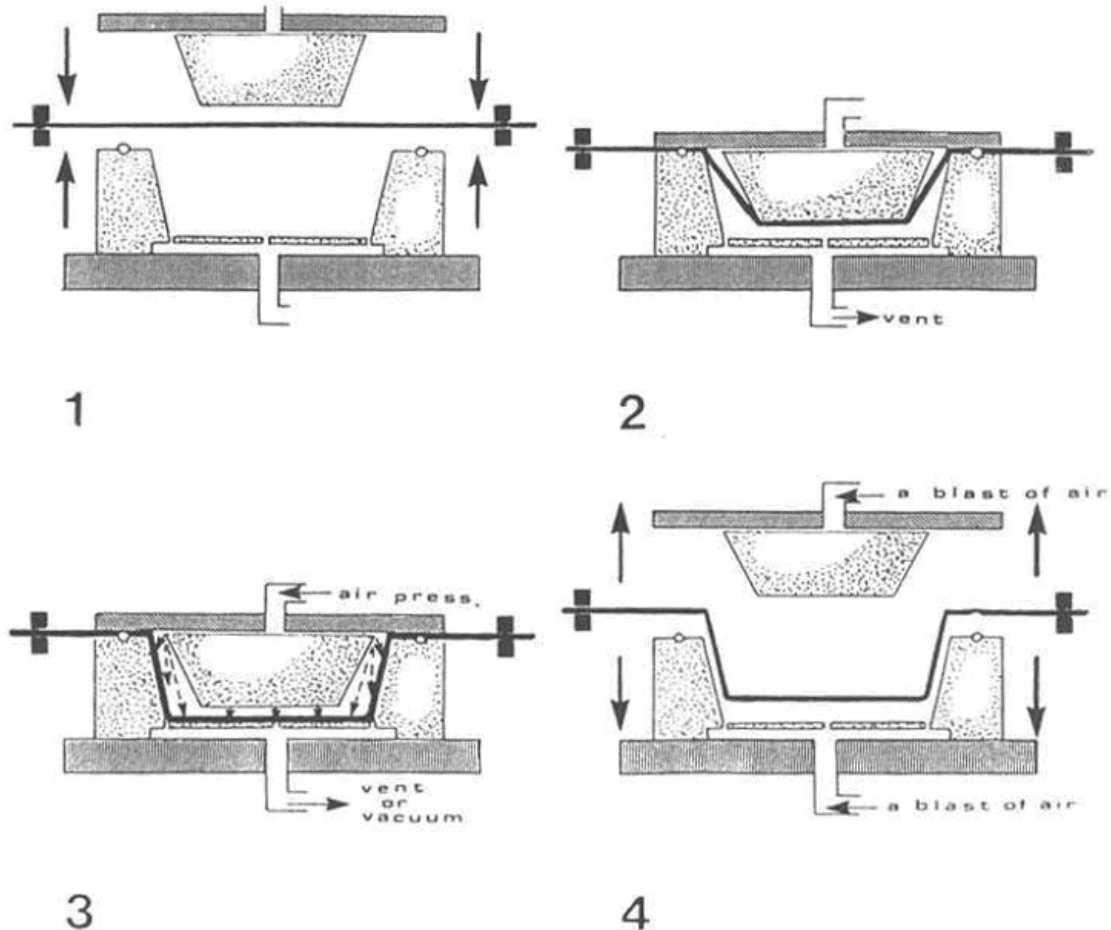


Σχήμα 4.4: Διαδοχική Σειρά μεθόδου Drape Θερμομόρφωσης

4.3 Διαμόρφωση με βοήθεια Εμβόλου (Plug Assist Forming)

Η διαμόρφωση με βοήθεια εμβόλου είναι η τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως στις μέρες μας. Η πλειοψηφία των περισσότερων εμπορικών κιβωτίων παράγονται με τη συγκεκριμένη μέθοδο της θερμομόρφωσης. Κατά τη μέθοδο αυτή, με τη βοήθεια ενός εργαλείου, το θερμαινόμενο πλαστικό φύλλο τεντώνεται και ωθείται πριν αγγίξει τη μήτρα. Αυτό το εργαλείο, ο μηχανικός βοηθός, λέγεται έμβολο. Το έμβολο έρχεται πρώτα σε επαφή με το φύλλο και το τεντώνει έως το έμβολο πλησιάσει το κατώτατο σημείο της κοιλότητας. Εκείνη τη στιγμή ο αέρας μεταξύ του φύλλου και της κοιλότητας εκκενώνεται για να ολοκληρωθεί το τελικό προϊόν. Με την επίδραση του

εμβόλου πάνω στο φύλλο έχουμε περισσότερη κατανομή υλικού στην βάση του υπό διαμόρφωση προϊόντος. Η αναλογία βυθίσματος προσδιορίζεται σαν την αναλογία του βυθίσματος της κοιλότητας προς την ελάχιστη διάσταση στο σύνορο της κοιλότητας. Με αναλογία βυθίσματος περισσότερο από 1:3 στην αρνητική διαμόρφωση, η μέθοδος αυτή διαμόρφωσης με έμβολο είναι απαραίτητη. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διαμόρφωση κατά βήμα, στο οποίο τόσο η πίεση όσο και το κενό εφαρμόζονται για τη διαμόρφωση του προϊόντος. [2]



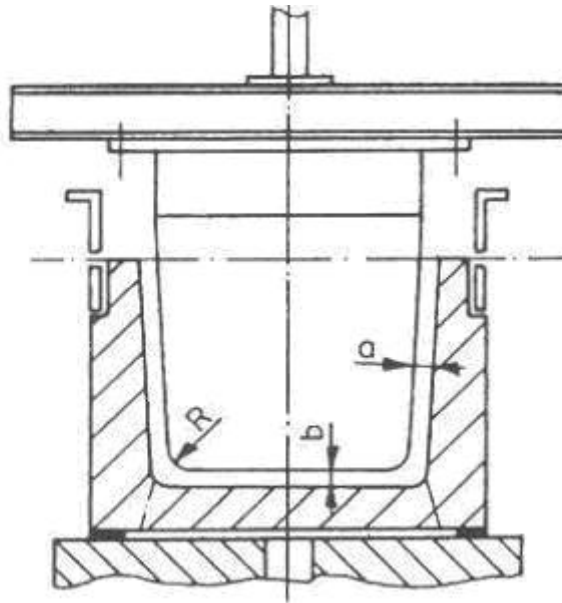
Σχήμα 4.5: Διαδοχική σειρά της μεθόδου Θερμομόρφωσης με έμβολο

Το σχήμα και η μορφή του εμβόλου είναι εφάμιλλο με αυτό της κοιλότητας αλλά είναι κάπως μικρότερο. Το μέγεθος του εμβόλου είναι περίπου επτά όγδοα (7/8) ή τρία τέταρτα (3/4) μικρότερο σε σχέση με το μέγεθος της κοιλότητας. Με τη διαφορά αυτή στο μέγεθος, το έμβολο μοιάζει να βοηθάει τη διαμόρφωση μέσα στη θηλυκή κοιλότητα, και για το λόγο αυτό η μέθοδος αυτή καλείται «Διαμόρφωση με Βοήθεια Εμβόλου». Η χρήση του εμβόλου οδηγεί στο να υπάρχει καλή κατανομή θερμοπλαστικού υλικού στα τελικά τμήματα, με αποτέλεσμα η αναλογία βυθίσματος παραπάνω του 1:1 να είναι δυνατή. Η κατανομή του υλικού είναι τόσο καλή, ώστε δύσκολα μπορεί να παρατηρηθεί διαφορά στο πάχος των τοιχωμάτων του τελικού προϊόντος. Οι μεταβλητές της μεθόδου αυτής είναι απαραίτητες να ληφθούν σοβαρά υπόψη εξαιτίας του μεγάλου ρόλου που διαδραματίζουν στο πάχος των τοιχωμάτων. Υπάρχουν αρκετές μεταβλητές που επηρεάζουν την ποιότητα του προϊόντος, αλλά έχει διαπιστωθεί ότι οι παράμετροι που αφορούν το έμβολο έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στην τελική ποιότητα. Κάποιες από τις παραμέτρους αυτές είναι οι:

- Σχέδιο, μορφή του εμβόλου
- Ταχύτητα και χρονισμός του εμβόλου
- Θερμοκρασία του υλικού
- Θερμοκρασία του εμβόλου
- Υλικό του εμβόλου [3]

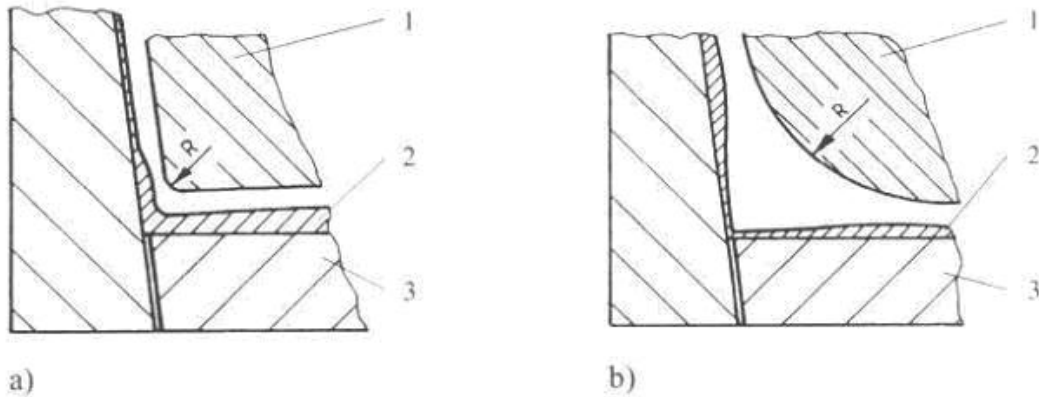
i) Σχέδιο, Μορφή Εμβόλου

Η μορφή και το μέγεθος ενός εμβόλου μπορούν να κάνουν τη διαφορά μεταξύ των ικανοποιητικών και φτωχών αποτελεσμάτων στην ομαλή κατανομή του πάχους των τοιχωμάτων. Επίσης μη ικανοποιητική και πρόχειρη μορφή του εμβόλου μπορεί να οδηγήσει στη μη σωστή μεταφορά των πλήρη στοιχείων από το καλούπι στο τελικό προϊόν. Η εικόνα 4.6 δείχνει τα σημεία που πρέπει να προσέξουμε στη μορφή του εμβόλου.



Σχήμα 4.6: Απεικόνιση εμβόλου

Έμβολα με μικρή ακτίνα R , παράγουν κομμάτια με παχύ τοίχωμα στο κατώτατο σημείο, μιας και περισσότερο υλικό βυθίζεται στη βάση. Καθώς η ακτίνα R αυξάνεται, η βάση λεπταίνει και περισσότερο υλικό κατανέμεται στα πλαϊνά τοιχώματα, όπως παρατηρούμε στην εικόνα 4.7.



Σχήμα 4.7: Επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας R του εμβόλου στην κατανομή του πάχους

Η ακτίνα που θα επιλέξουμε στο έμβολο εξαρτάται από το υλικό το οποίο θέλουμε να διαμορφώσουμε. Μια χαμηλή σε τιμές ακτίνα, της τάξης των 5-6 mm, χρησιμοποιείται για υλικά με χαμηλές τιμές στον συντελεστή τριβής των, όπως το πολυστυρένιο (PS), ισχυρό πολυστυρένιο (HIPS), πολυαιθυλένιο άλας τερεφθαλικού οξέος (PET), πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC). Απεναντίας μεγαλύτερες τιμές ακτίνας, της τάξης των 10-20 mm, επιλέγεται σε υλικά με μεγάλο συντελεστή τριβής, όπως το PP. Καθώς το μέγεθος του εμβόλου αυξάνεται ή καθώς το κενό (α στο παραπάνω σχέδιο) μεταξύ εμβόλου και πλευρικών τοιχωμάτων μικραίνει, περισσότερο υλικό τοποθετείται στην βάση, με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν να έχει λεπτά πλευρικά τοιχώματα και να είναι πιο παχύ στη βάση. Τυπικά η τιμή του (α) για μια ποιοτική κατανομή πάχους δίνεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$\alpha = 1.5 \times (\text{πάχος υλικού}) + (1 - 3 \text{ mm}) \quad [3]$$

ii) Διαδρομή Εμβόλου

Καθώς το βύθισμα του εμβόλου αυξάνει στο καλούπι, το πάχος της βάσης καθώς των γωνιών της βάσης αυξάνει. Σε καμιά περίπτωση το έμβολο δεν πρέπει να εισχωρήσει τόσο βαθιά στην κοιλότητα ώστε να φτάσει τη βάση. Εάν το βύθισμα του εμβόλου είναι τόσο μεγάλο, μπορεί να υπάρξει ανομοιομορφία στο πάχος των πλαϊνών τοιχωμάτων. Η ελάχιστη απόσταση (b του παραπάνω σχεδίου) που προτείνεται μεταξύ του εμβόλου και της βάσης της κοιλότητας δίνεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$b = 1.5 \times (\text{πάχος υλικού}) + (1 - 3 \text{ mm}) \quad [3]$$

iii) Υλικό Εμβόλου

Είναι απαραίτητο να επιλεγεί το κατάλληλο υλικό για το έμβολο σε συνάρτηση με το υλικό του φύλλου υπό διαμόρφωση, για να πετύχουμε σωστή και ποιοτική κατανομή πάχους. Οι απαιτήσεις που έχουμε από το υλικό του εμβόλου είναι οι εξής :

- ❖ Δεν πρέπει να παρατηρηθεί ψύξη της καυτής υπό διαμόρφωσης επιφάνειας του φύλλου κατά την επαφή,

- ❖ Δεν πρέπει να υπάρχει μεγάλη τριβή με το καυτό πλαστικό,
- ❖ Πρέπει να αντέχει στις μηχανικές πιέσεις, δεν πρέπει να υπάρξει απόκλιση κάτω από μεγάλη πίεση και δεν πρέπει να παρατηρηθεί γδάρσιμο κατά την επαφή με το φύλλο
- ❖ Να παράγεται σε ικανοποιητικό κόστος.

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία υλικών για έμβολα για να διαλέξουμε κατά τη θερμομόρφωση κάποιου υλικού. Τα πιο κοινά από αυτά είναι το αλουμίνιο, αφρός (syntactic foam), ακετάλη και πολυτετραφλο-ρυαιθυλένιο (PTFE). Αν χρησιμοποιηθεί κάποιο υλικό με μεγάλο συντελεστή τριβής σε PP υλικά, τότε τα τελικά προϊόντα θα έχουν μεγάλο πάχος βάσης. Από την άλλη μεριά αν έμβολο από PTFE, το οποίο έχει χαμηλό συντελεστή τριβής, χρησιμοποιηθεί για διαμόρφωση PS, τότε θα παραχθούν προϊόντα με μικρό πάχος βάσης. Άλλος παράγοντας επιλογής υλικού για το έμβολο είναι αν θέλουμε η θερμοκρασία του εμβόλου να ελέγχεται ενεργητικά ή παθητικά. Στην περίπτωση που θέλουμε ο έλεγχος θερμοκρασίας να είναι ενεργητικός, τότε το υλικό πρέπει να είναι αγωγίμο, όπως το αλουμίνιο, και ο έλεγχος της θερμοκρασίας πραγματοποιείται μέσω θερμαντικές κασέτες ή με την διάβαση καυτού υγρού μέσα στο έμβολο. Στην άλλη περίπτωση, έχουμε επιλογή κάποιου μονωτικού υλικού, όπως ο συντακτικός αφρός. Σε αυτή τη περίπτωση το μονωτικό υλικό θερμαίνεται κατά τη συνεχόμενη επαφή με το φύλλο, κατά τη διάρκεια του κύκλου, μέχρι να φτάσει στη θερμοκρασία ισορροπίας. Ένα μονωτικό υλικό, με μεγάλη θερμοχωρητικότητα, απαιτεί περισσότερους κύκλους για να φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία, σε σχέση με υλικά μικρότερης θερμοχωρητικότητας. Ως εκ τούτου, τα μονωτικά υλικά με μικρότερη θερμοχωρητικότητα, είναι και τα υλικά τα οποία προτιμώνται κατά κόρον. Ο B. Hegemann μελέτησε την επίδραση του υλικού και της επιφάνειας του εμβόλου στην παραμόρφωση των χαρακτηριστικών του πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας. Διαπίστωσε ότι το υλικό και η επιφάνεια του εμβόλου έχει σημαντικό επίδραση στη δύναμη διαμόρφωσης και στη διανομή του πάχους των τελικών προϊόντων. [3]

iv) Θερμοκρασία Φύλλου Υπό Διαμόρφωση

Η βέλτιστη θερμοκρασία φύλλου είναι η χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία στην οποία επιτυγχάνουμε αποδεκτή σαφήνεια περιγράμματος στο τελικό προϊόν. Εντούτοις, καθώς η θερμοκρασία του φύλλου αυξάνεται, έχουμε αύξηση στον συντελεστή τριβής μεταξύ του φύλλου και του εμβόλου και μείωση στις αναπτυσσόμενες τάσεις στο προϊόν. Οι δυο αυτοί παράγοντες συντελούν στο να οδηγηθεί περισσότερο υλικό στη βάση του προϊόντος, με αποτέλεσμα εκεί το τοίχωμα να είναι περισσότερο παχύ από το επιθυμητό. [3]

v) Θερμοκρασία Εμβόλου

Συνήθως η θερμοκρασία του εμβόλου είναι χαμηλότερη από εκείνη του φύλλου. Όταν το κρύο έμβολο έρχεται σε επαφή με το φύλλο κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσης, πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας μεταξύ του φύλλου και του εμβόλου. Η επιφάνεια του φύλλου στην οποία το έμβολο έρχεται σε επαφή, γίνεται πιο κρύα και λιγότερη ελαστική. Η επιφάνεια του φύλλου μεταξύ του εμβόλου και των κρύων επιφανειών της μήτρας, είναι ακόμα καυτή, μιας και δεν υπάρχει επαφή της επιφάνειας με το έμβολο. Ως εκ τούτου, όταν το κρύο έμβολο χρησιμοποιείται, οι

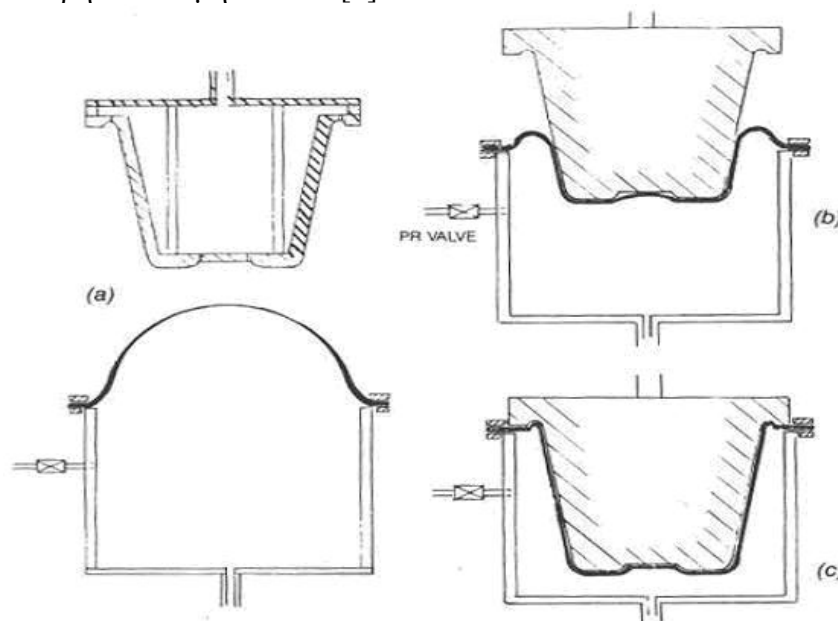
περισσότερες τάσεις αναπτύσσονται μεταξύ των κρύων επιφανειών της μήτρας, με αποτέλεσμα τα τελικά προϊόντα να έχουν παχύ βάση και λεπτά τοιχώματα. Για να εξαλείψουμε την επίδραση της γρήγορης ψύξης του εμβόλου στην επιφάνεια του φύλλου, η θερμοκρασία του εμβόλου πρέπει να αυξηθεί και να φτάσει την θερμοκρασία του φύλλου. Όταν το φύλλο δεν ψυχθεί μέσω της επαφής του με το έμβολο, μπορεί να τεντωθεί καλύτερα και επιτυγχάνουμε καλύτερη κατανομή πάχους στο τελικό προϊόν. [3]

vi) Ταχύτητα και Συγχρονισμός Εμβόλου

Αν η το έμβολο κινηθεί προτού στερεωθεί γερά το φύλλο, έχουμε περισσότερη κατανομή υλικού προς τη μήτρα, με αποτέλεσμα στο τελικό προϊόν να έχουμε πλευρικά τοιχώματα και βάση με πολύ πάχος. Ακόμα σύντομη, γρήγορη μετακίνηση του εμβόλου, μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργία «ψυχρών» σημαδιών και μη σωστή κατανομή πάχους στην περιφέρεια του προϊόντος. Αν από την άλλη εφαρμοστεί πίεση ή κενό προτού το έμβολο φτάσει στην τελική του θέση, το φύλλο θα χωριστεί από το έμβολο πολύ νωρίς, με αποτέλεσμα να έχουμε πολύ λεπτά τοιχώματα στη βάση του προϊόντος. [3]

4.4 Διαμόρφωση με Εφαρμογή Κύματος - Τεχνική Αντίστροφης Εξαγωγής (Billow Drape Forming – Reverse Draw Technique)

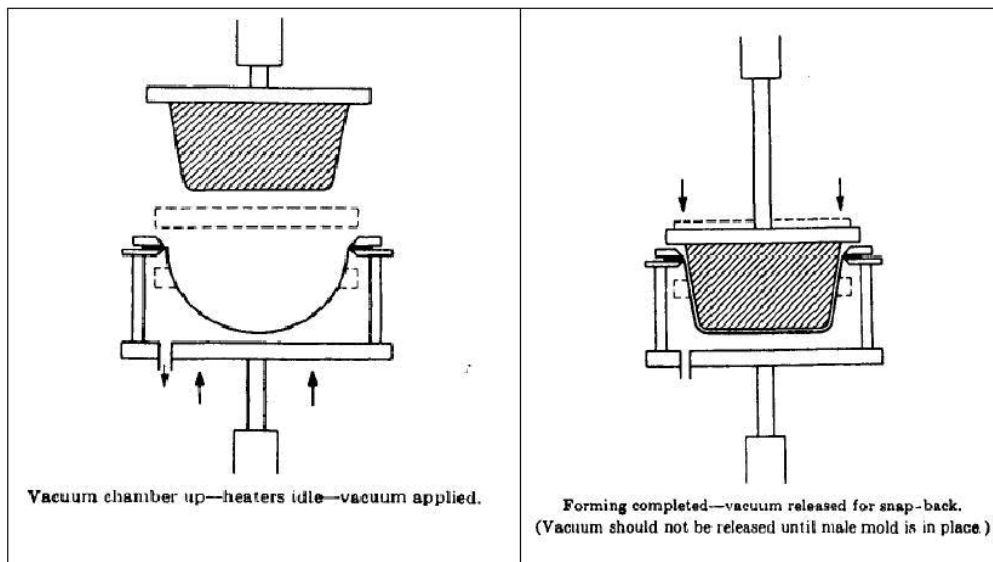
Σε αυτήν την τεχνική, το θερμαινόμενο φύλλο αρχικά σφραγίζεται στο δοχείο υπό πίεση. Έπειτα, με πίεση αέρα, διαμορφώνεται μια «φουσαλίδα», όπως απεικονίζεται στο (a) του 4.8. Κατόπιν η αρσενική μήτρα ωθείται έναντι της «φουσαλίδας», με ταυτόχρονη εκκένωση αέρα από το θάλαμο. Όταν το έμβολο φτάσει στην τελική του θέση, το φύλλο «εφαρμόζει» πλήρως στη μήτρα. Τελική διαμόρφωση επιτυγχάνεται με εφαρμογή κενού αέρος μέσα στην πλευρά του καλουπιού. Με την μέθοδο αυτήν έχουμε καλύτερη κατανομή υλικού. [2]



Σχήμα 4.8: Διαμόρφωση με Εφαρμογή Κύματος

4.5 Διαμόρφωση με Αιφνιδιαστικό Κρότο (Snap Back Forming)

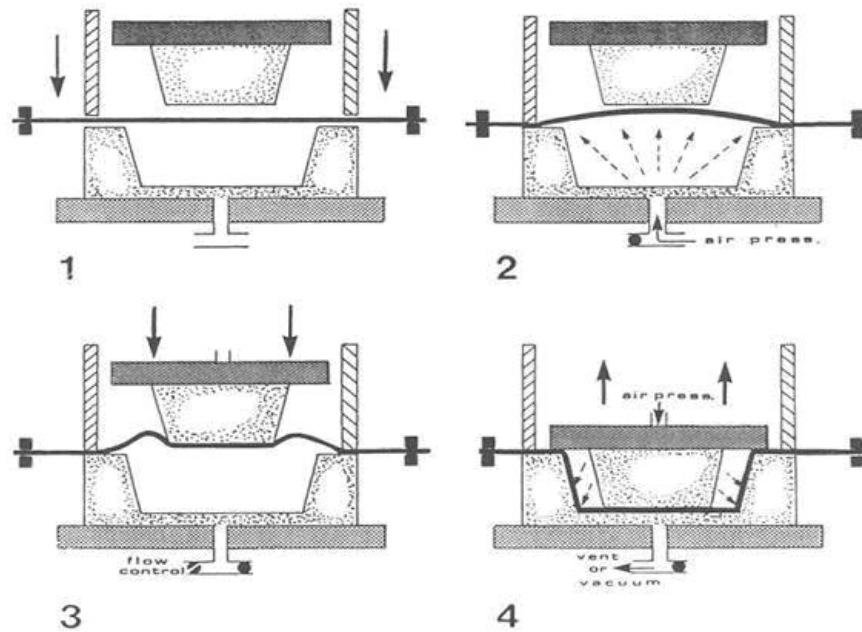
Στη μέθοδο αυτή το θερμαινόμενο φύλλο σφραγίζεται σε θάλαμο πίεσης και έχουμε εκκένωση του αέρα, για δημιουργία κενού, για να διαμορφωθεί η φυσαλίδα, όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα. Η μέθοδος αυτή διαφοροποιείται από την προηγούμενη, στο γεγονός ότι η φυσαλίδα είναι κοίλη – ενώ στην προηγούμενη ήταν κυρτή – και στο ότι η αρσενική μήτρα δεν ωθείται ενάντια στη φυσαλίδα. Καθώς το αρσενικό καλούπι φτάσει στην κατώτερη θέση, έχουμε δημιουργία κενού και το φύλλο αιφνιδιαστικά κινείται στο αρσενικό καλούπι. Δημιουργία κενού έχουμε από την πλευρά της μήτρας για να ολοκληρωθεί η διαμόρφωση. Η μέθοδος αυτή ελαχιστοποιεί την ύπαρξη «ψυχρών» σημαδιών, τα οποία παρατηρούνται κατά την εφαρμογή της προηγούμενης τεχνικής. [2]



Σχήμα 4.9: Διαμόρφωση με Αιφνιδιαστικό Κρότο

4.6 Διαμόρφωση Αντίστροφης Εξαγωγής με βοήθεια Εμβόλου (Reverse Draw with Plug-Assist Forming)

Η τεχνική αυτή είναι μια παραλλαγή της διαμόρφωσης με εφαρμογή κύματος. Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνουμε ακριβή έλεγχο της κατανομής υλικού, με το να διαφοροποιούμε το μέγεθος της φυσαλίδας και να ρυθμίζουμε την διείσδυση και τη θερμοκρασία του εμβόλου. Αρχικά έχουμε δημιουργία φυσαλίδας προς τα πάνω – μέσω αέρα – και εν συνεχεία διαμόρφωση μέσω εμβόλου. Καθώς το έμβολο φτάνει στην καθορισμένο θέση, η πίεση παύει να υφίσταται και εφαρμόζεται κενό. Το σχήμα 4.10 δείχνει τα διαδοχικά στάδια της μεθόδου αυτής. [2]



Σχήμα 4.10: Διαμόρφωσης Αντίστροφης Εξαγωγής με βοήθεια Εμβόλου

4.7 Σχεδιασμός Χυτών Θερμομόρφωσης με χρήση Αντίστροφης Εφαρμοσμένης Μηχανικής

ι) Εισαγωγή

Η μέθοδος της θερμομόρφωσης χρησιμοποιείται συνήθως για την παραγωγή των πλαστικών φύλλων, τα οποία διαμορφώνονται. Τα φύλλα αυτά εν συνεχεία αποτελούν την πρώτη ύλη για την συσκευασία των καταναλωτικών προϊόντων. Η συμβατική μέθοδος, ο σχεδιασμός και η παραγωγή των φορμών της θερμομόρφωσης είναι χρονοβόρα διαδικασία και για το λόγο αυτό συνιστάται μια μέθοδος βασισμένη σε μια «αντίστροφη» προσέγγιση τόσο της εφαρμοσμένης μηχανικής όσο και της κλασσικής διαδικασίας της θερμομόρφωσης. Η μέθοδος περιλαμβάνει τη χρήση μιας αυτοεξελισσόμενης συσκευής, η οποία ψηφιοποιεί την επιφάνεια ενός προϊόντος. Με τα ψηφιακά δεδομένα που αποκτήθηκαν από το στάδιο αυτό, κατασκευάζεται ένα μοντέλο CAD, το οποίο αντιστοιχεί στο χυτό που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη θερμομόρφωση. Η κατασκευή της επιφάνειας του χυτού βασίζεται πάνω στην αρχή των προκαθορισμένων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων των καλουπιών για τη θερμομόρφωση. Εν συνεχεία εφαρμόζεται μια τροποποιημένη Λαπλασιανική (Laplacian) τεχνική λείανσης, για να επεξεργαστεί τα ψηφιοποιημένα δεδομένα, τα οποία θα παράγουν την επιφάνεια του καλουπιού. Παρακάτω δίνονται κάποια παραδείγματα για να εξηγήσουν την βασική αρχή εργασίας και να περιγράψουν την βιωσιμότητα της προτεινόμενης μεθόδου.

Η διαδικασία της θερμομόρφωσης χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία παραγωγής διαμορφωμένων πλαστικών φύλλων, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη συσκευασία καταναλωτικών προϊόντων, που πωλούνται συνήθως σε λιανικά καταστήματα. Η διαδικασία περιλαμβάνει συνήθως την τοποθέτηση πλαστικών φύλλων, τα οποία έχουν μαλακώσει μέσω θερμότητας, πάνω στην επιφάνεια καλουπιών θερμομόρφωσης. Όταν το πλαστικό φύλλο ψυχθεί, αποκτά το σχήμα του

καλουπιού. Αν και οι τεχνικές που βασίζονται στο CAD/CAM, έχουν εφαρμοστεί ευρέως για τη διευκόλυνση της σχεδίασης προϊόντων τα τελευταία χρόνια, αρκετές μικρές και μεσαίες εταιρείες, οι οποίες βρίσκονται στην περιοχή Pearl River Delta (PRD) της νότιας Κίνας, χρησιμοποιούν ακόμα συμβατικές μεθόδους για τον σχεδιασμό και την παραγωγή καλουπιών που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη θερμομόρφωση. Αξίζει να αναφερθεί πως οι συμβατικές μέθοδοι απαιτούν έντονη εργασία, τεχνική ικανότητα και το τελικό προϊόν είναι κατώτερης ποιότητας. Γίνεται αναφορά σε μια μέθοδο βασισμένη σε μια αντίστροφη προσέγγιση της εφαρμοσμένης μηχανικής, η οποία βελτιώνει την κατάσταση. Η γεωμετρία των καλουπιών επανασχεδιάζονται μέσω ενός υπολογιστικού προγράμματος. Οι Hsiao και Chuan [4], επιδείξανε ότι ο επανασχεδιασμός σχήματος από ψηφιοποιημένα τμήματα είναι επιτυχής, όσο αφορά το σχεδιασμό φόρμας του γενικού προϊόντος. Εντούτοις, τα καλούπια για τη θερμομόρφωση, έχουν ειδικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα, τα οποία είναι διαφορετικά από τα γενικά προϊόντα. Ο Thompson [5] πρότεινε ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα, το οποίο βασιζόταν στην μέθοδο της αντίστροφης εφαρμοσμένης μηχανικής, για τα μηχανικά τμήματα. Αυτή η σκέψη υιοθετήθηκε στις ιδιαιτερότητες των καλουπιών για θερμομόρφωση, δηλαδή τα χαρακτηριστικά αυτά μοντελοποιούνται βάση των ψηφιακών δεδομένων. Η επιφάνεια ελεύθερου σχεδιασμού (Freeform surface) συναντιέται αρκετά συχνά στα καλούπια που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία της θερμομόρφωσης. Η ταξινόμηση των γνωρισμάτων του ελεύθερου σχεδιασμού στο καλούπι, διευκολύνει την μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών της θερμομόρφωσης. Ο Poldermann [6] και ο Fontana [7], ταξινόμησαν τα χαρακτηριστικά του ελεύθερου σχεδιασμού σύμφωνα με το γενικό τους σχήμα, παρόλα αυτά όμως ήδη υπάρχουσες ταξινομήσεις στα γνωρίσματα του ελεύθερου σχεδιασμού δεν διευκολύνουν ιδιαίτερα τη διαδικασία μοντελοποίησης. Αυτό διότι οι ιδιαιτερότητες της θερμομόρφωσης δεν μοντελοποιούνται μόνο από άποψη αισθητικής, αλλά και για να επιτύχουμε ορισμένες συγκεκριμένες λειτουργίες.

ii) Συμβατική Μέθοδος Κατασκευής Καλουπιών Θερμομόρφωσης.

Η πιο τυπική διαδικασία σχεδιασμού καλουπιών και παραγωγής αυτών, που χρησιμοποιείται από τις περισσότερες εταιρείες στην περιοχή PRD της Κίνας, αφορά χειρονακτική εργασία και στηρίζεται σε μεγάλο ποσοστό στην χειροτεχνία. Η διαδικασία αρχίζει με την τοποθέτηση του προϊόντος – το οποίο είναι για συσκευασία – πάνω σε ένα κομμάτι χαρτόνι.



Σχήμα 4.11: Πρότυπο τεμάχιο για διαμόρφωση καλουπιού

Εν συνεχεία, γύψος ή πηλός διαμόρφωσης τοποθετείται πάνω στο προϊόν για να δημιουργηθεί ένα κύριο μοντέλο. Πρόσθετα γνωρίσματα, όπως η σχεδίαση ενός απότομου χάσματος μεταξύ του προϊόντος και του υπό διαμόρφωση φύλλου, εισάγονται σε αυτό το στάδιο με τη χρήση περισσότερου υλικού διαμόρφωσης. Η τελική επεξεργασία του πρότυπου μοντέλου γίνεται με το χέρι, με τη βοήθεια μερικών απλών εργαλείων χειρός.



Σχήμα 4.12: Κατασκευή καλουπιού από πηλό

Χρήση ενός χειρωνακτικού τύπου μηχανής με οδοντωτούς τροχούς μπορεί να χρειαστεί εάν επίπεδες επιφάνειες ή σχετικά περίπλοκα χαρακτηριστικά του σχήματος απαιτούνται. Επιπλέον, σταδιακή μείωση γωνιών πρέπει να εισαχθεί στα πλευρικά τοιχώματα, ώστε να διευκολύνεται η απομάκρυνση του υπό διαμόρφωση πλαστικού φύλλου. Η γεωμετρία του μοντέλου συχνά λειαίνεται, περιοχή με περιοχή, μιας και είναι δύσκολο να προσαρμοστεί με μιας ολόκληρο το σχήμα του μοντέλου. Από τη στιγμή που το υπό διαμόρφωση φύλλο χρησιμοποιείται κυρίως για συσκευασία και για επίδειξη, η τελική επιφάνεια του πρότυπου μοντέλου δεν χρειάζεται να ταιριάζει ακριβώς με την επιφάνεια του τελικού προϊόντος.

Το ολοκληρωμένο πλαστικό ή πήλινο μοντέλο χρησιμοποιείται για να σχηματισθεί ένα προκαταρκτικό πλαστικό φύλλο, με τη χρήση μιας μηχανής θερμομόρφωσης. Ο πηλός ή ο γύψος χύνεται τότε στην κοιλότητα του διαμορφωμένου πλαστικού φύλλου, για την παραγωγή καλουπιού. Υπάρχει περίπτωση όμως το καλούπι να χρειάζεται περαιτέρω δουλειά για να επιτύχουμε το τελικό επιθυμητό σχήμα. Στη συνέχεια, η φόρμα καλουπιού θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή αρκετών προϊόντων, τα οποία θα ελεγχθούν για την ποιότητά τους. Στην περίπτωση που απαιτείται τροποποίηση το καλούπι, θα πρέπει να γίνει με το χέρι με προσθήκη ή αφαίρεση πυλού-γύψου από το καλούπι.

Όταν ο πελάτης είναι ικανοποιημένος με το καλούπι και η ποσότητα παραγγελίας δικαιολογεί την παραγωγή ενός πρότυπου καλουπιού, η μήτρα αυτή θα χρησιμοποιηθεί για τη διαμόρφωση ενός πλαστικού φύλλου. Ένα λεπτό στρώμα χαλκού επιμεταλλώνεται με ηλεκτρόλυση στην επιφάνεια του πλαστικού φύλλου. Εν συνεχεία το ηλεκτρολυτικό αυτό φύλλο ενισχύεται με συμπλήρωση των κοιλοτήτων με γύψο. Τέτοια χαλκοκαλυμμένα καλούπια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μαζική παραγωγή προϊόντων.

Με όσα έχουν αναφερθεί μπορούμε να εκτιμήσουμε ότι η παραδοσιακή μέθοδο παραγωγής καλουπιών για διαμόρφωση παρουσιάζουν διάφορα μειονεκτήματα :

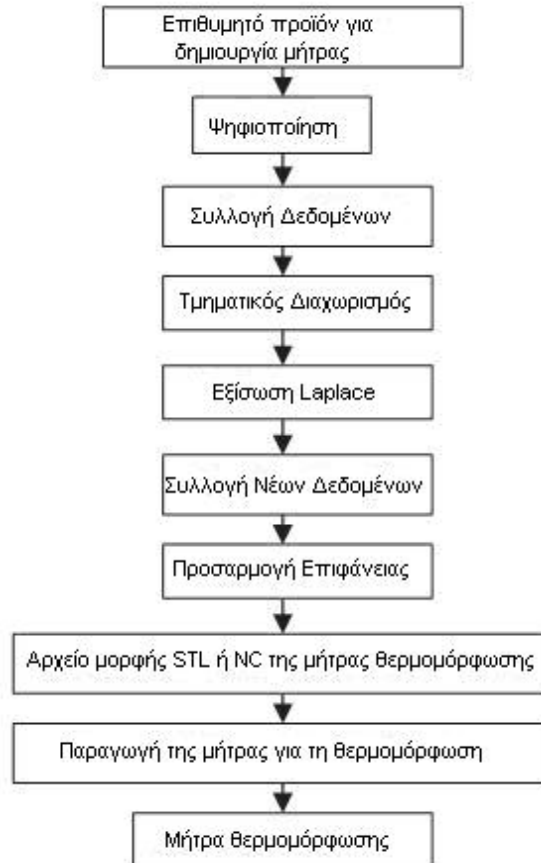
- Βασίζεται αρκετά στην ικανότητα της δεξιοτεχνίας του κατασκευαστή της φόρμας. Οι διαδικασίες μοντελοποίησης και διεκπεραίωσης του τελικού καλουπιού είναι χρονοβόρες και επίμοχθες.
- Η απουσία κάποιων συγκεκριμένων οδηγιών κατεύθυνσης του σχεδιασμού μητρών, όπως εκείνες που υπάρχουν για την διόρθωση κάποιων χασμάτων ή απότομων γωνιών, οδηγούν σε μεγάλους χρόνους εξέτασης της τελικής μήτρας.
- Ο γύψος και ο πηλός δεν είναι κατάλληλα υλικά για κατασκευή καλουπιών θερμομόρφωσης, μιας και αυτά δεν αντέχουν στον χρόνο. [8]

Συγχρόνως, υπάρχουν περιορισμοί, οι οποίοι αποτρέπουν τις μικρές και μεσαίες βιομηχανίες από τη χρησιμοποίηση μεθόδων βασισμένων σε υπολογιστή.

- ❖ Οι πελάτες μπορούν να τους παρέχουν μόνο φυσικά δείγματα του τελικού προϊόντος, επειδή το μοντέλο δεδομένων CAD του προϊόντος δεν μπορεί να δημοσιευθεί.
- ❖ Τα σύγχρονα CAD/CAM λογισμικά αναπτύσσονται κυρίως ώστε να επιτύχουμε πανομοιότυπη επιφάνεια μήτρας με εκείνη του τελικού προϊόντος. Το σχήμα της επιφάνειας του καλουπιού θερμομόρφωσης για την παραγωγή, παρεκκλίνει ουσιαστικά από την μορφή του τελικού προϊόντος. Αυτό αποδίδεται κυρίως στις διαφορετικές αρχές διαμόρφωσης. Για ικανοποίηση πακεταρίσματος και λόγων αισθητικής, μερικά αρχικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος μερικές φορές θα παρεμποδιστούν, σε αντιστοιχία με το πρωτότυπο καλούπι. Για παράδειγμα, όταν ένα προϊόν τοποθετηθεί στο χαρτόνι, οι επιφάνειες που «βλέπουν» την επιφάνεια του χαρτονιού θα αγνοηθούν. Αυτό σημαίνει ότι το σχήμα του υπό διαμόρφωση φύλλου θα επηρεαστεί κυρίως από τις επιφάνειες του προϊόντος που δεν «βλέπουν» στην επιφάνεια του χαρτονιού. Ενώ κάποια χαρακτηριστικά της επιφάνειας χρειάζεται να παραλειφθούν, κάποια άλλα γνωρίσματα, όπως ύπαρξη κάποιου κενού και μεταβολή γωνιών, θα χρειαστεί να προστεθούν στο τελικό καλούπι. Το σχήμα του υπό διαμόρφωση καλουπιού μπορεί να γίνει αρκετά πολύπλοκο όταν πολλαπλά μέρη δημιουργούνται από ένα φύλλο και όταν υπάρχουν περίπλοκα χαρακτηριστικά, όπως κουμπιά ή συσκευές κλειδώματος.
- ❖ Οι ανιχνευτές επιφανειών ή ψηφιοποιητές που κυκλοφορούν στο εμπόριο είναι αρκετά ακριβοί, μιας και αναπτύσσονται για τη καταγραφή προϊόντων στα οποία απαιτείται μεγάλη ακρίβεια [ζ]. Είναι κατάλληλοι για εφαρμογές, όπως επαλήθευση διαστάσεων και αντιγραφή τμημάτων ενός προϊόντος. Εντούτοις, δεν δικαιολογείται η χρήση ακριβούς ψηφιακού εξοπλισμού για παραγωγή φορμών θερμομόρφωσης, μιας και η γεωμετρία της επιφάνειας μιας τέτοιας φόρμας συχνά τροποποιείται και δεν είναι αναγκαία μια τόσο ακριβής μέτρηση της επιφάνειας του εξεταζόμενου δείγματος.

iii) Σχεδιασμός Καλουπιών Θερμομόρφωσης με Αντίστροφη Εφαρμοσμένη Μηχανική

Λαμβάνοντας υπόψη τα μειονεκτήματα και τους περιορισμούς της παραπάνω μεθόδου, μια λύση προτείνεται για να βελτιωθεί η διαδικασία σχεδιάσματος καλουπιών, η οποία είναι βασισμένη στην προσέγγιση της αντίστροφης εφαρμοσμένης μηχανικής, όπως δείχνει και το σχήμα της εικόνας 4.13.



Σχήμα 4.13: Στάδια Αντίστροφης Εφαρμοσμένης Μηχανικής

Η αρχή λειτουργίας της προτεινόμενης μεθόδου βασίζεται στη χρήση ενός αυτό-αναπτυγμένου ψηφιοποιητή, ο οποίος ψηφιοποιεί την επιφάνεια ενός προϊόντος. Τα επιθυμητά σημεία που θα συλλέξουμε σαν δεδομένα, επεξεργάζονται από ειδικά προγράμματα αναδημιουργίας επιφανειών, για να δημιουργήσουμε το επιθυμητό μοντέλο CAD, από το οποίο θα κατασκευαστεί το επιθυμητό καλούπι για τη διαδικασία της θερμομόρφωσης. Παρατηρήθηκε ότι γεωμετρικά γνωρίσματα, απαραίτητα για τη ακριβή απεικόνιση της επιφάνειας του προϊόντος, αποτυπώθηκαν σωστά στο καλούπι. Αυτά τα χαρακτηριστικά αναγνωρίστηκαν, και με τη βοήθεια αυτών, τα επιθυμητά σημεία της επιφάνειας που λήφθηκαν από τον ψηφιοποιητή, χωρίστηκαν τμηματικά και ορίστηκαν εκ νέου, ώστε να διευκολυνθεί η επανακατασκευή του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί σαν καλούπι. Όσο αφορά στην επιλογή πρωτογενούς υλικού για την κατασκευή καλουπιού, υπάρχει πληθώρα, εξαιτίας της μορφοποίησης μέσω μηχανών CNC ή της διαδικασίας γρήγορης διαμόρφωσης πρωτοτύπου (rapid prototyping process).

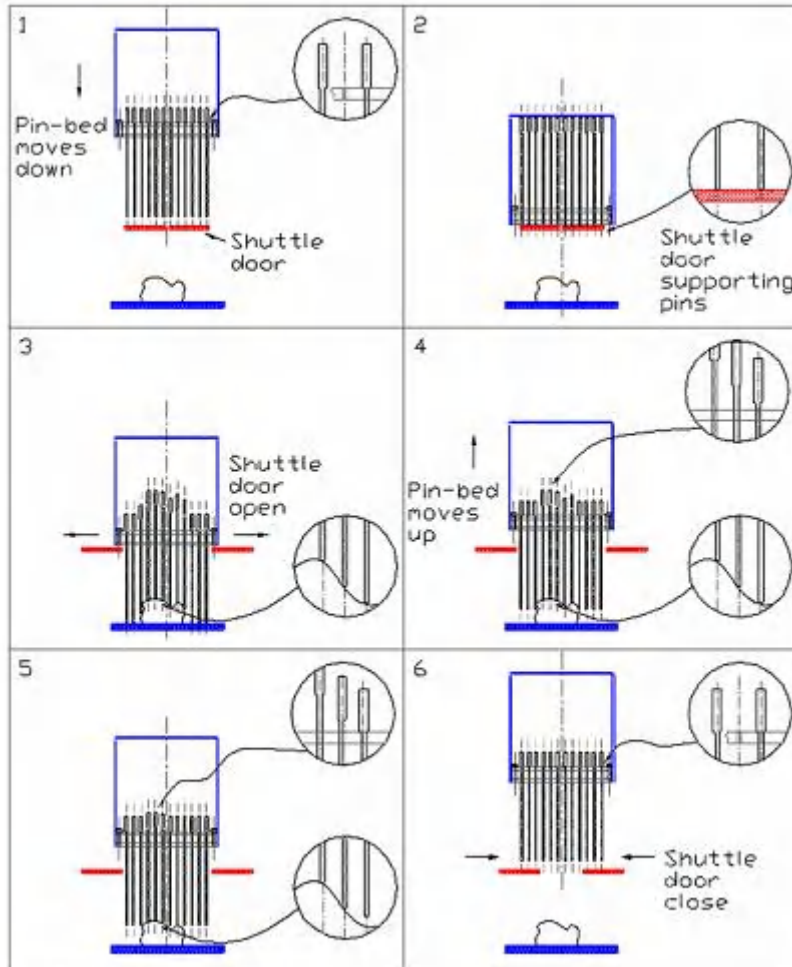
iv) Ψηφιοποιητής με σειρά ακίδων

Η αρχή λειτουργίας και κατασκευής του ψηφιοποιητή αυτού θα αναπτυχθεί παρακάτω. Περισσότερες λεπτομέρειες για την περαιτέρω ανάπτυξη και έρευνα του ψηφιοποιητή αυτού, μπορούν να βρεθούν σε άρθρα των Tam και Chan [9].

Η αρχή λειτουργίας του συγκεκριμένου υπό ανάπτυξη ψηφιοποιητή είναι η χρήση διαταγμένων σειρών ακίδων, οι οποίες ακίδες εξετάζουν και εκτιμούν με ακρίβεια τις αλλαγές, σε κάθετο επίπεδο, της επιφάνειας ενός τεμαχίου. Η συσκευή αποτελείται από μια πλάκα 144 ακίδων. Η πλάκα αυτή υποστηρίζεται σε έναν μηχανισμό τριών αξόνων. Η κοινή επιφάνεια μεταξύ των κεφαλών των ακίδων και της πλάκας σχεδιάστηκε να λειτουργεί σαν διακόπτης επαφής. Μια χαμηλή ηλεκτρική τάση παρέχεται μεταξύ κάθε ακίδας και πλάκας, ώστε όταν μια συγκεκριμένη ακίδα κάνει επαφή με την επιφάνεια της πλάκας, έχουμε ροή ηλεκτρικού ρεύματος, από την κεφαλή της ακίδας στην πλάκα.

Όταν ξεκινάει ο κύκλος ψηφιοποίησης, η πλάκα με τις ακίδες οδηγείται προς τα κάτω, αφήνοντας όλες τις ακίδες να στηριχτούν σε μια πόρτα διαφυγής. Εν συνεχεία η «πόρτα» ανοίγει πλευρικά, με αποτέλεσμα όλες οι ακίδες να πέσουν και να ακουμπήσουν την επιφάνεια του υπό ψηφιοποίηση τεμαχίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κάθετη απόσταση μεταξύ των ακρών των ακίδων και της πλάκας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μέτρο σύγκρισης των κάθετων διακυμάνσεων που βρίσκονται στην επιφάνεια του δοκιμίου.

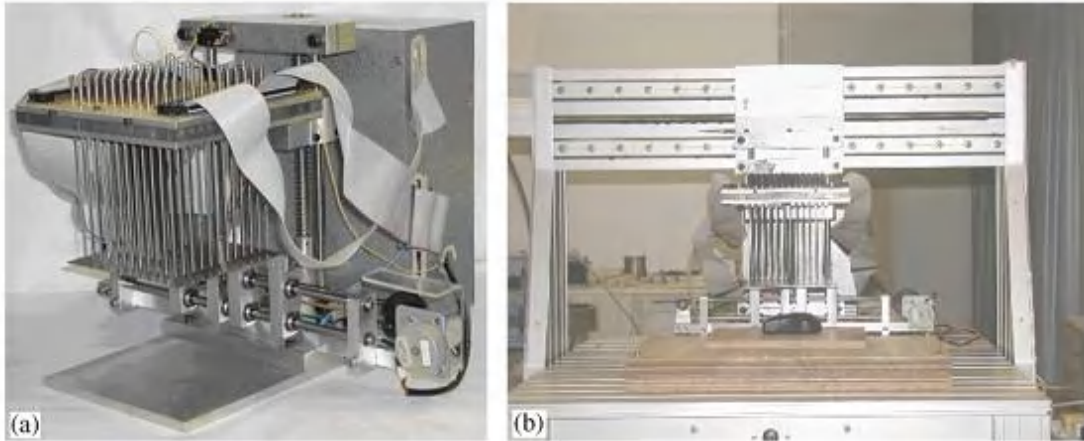
Η πλάκα ακίδων εν συνεχεία οδηγείται προς τα πάνω, με αργό αυξανόμενο ρυθμό, ο οποίος ελέγχεται από έναν βηματικό μηχανισμό, με απώτερο στόχο τη συλλογή όλων των ακίδων στην πλάκα. Κατά τη διάρκεια κάθε βήματος της ανοδικής πορείας, το σύστημα ελέγχου εξετάζει την θέση του σημείου επαφής κάθε ακίδας. Με την καταγραφή των αλλαγών του σημείου επαφής της κάθε ακίδας στον κάθετο άξονα, μπορεί να προσδιοριστεί το ύψος της ακίδας στον άξονα του z. Οι συντεταγμένες στον X και Y άξονα είναι ήδη γνωστές, μιας και είναι γνωστή η μήτρα εξαιτίας των σταθερών συντεταγμένων της κάθε ακίδας πάνω στην πλάκα. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.14: Σύστημα Ψηφιοποίησης με σειρά ακίδων

Το πρωτότυπο σύστημα ψηφιοποίησης των ακίδων σχεδιάστηκε ώστε να υπάρχει μια απόσταση 10mm μεταξύ δυο παρακείμενων ακίδων, προκειμένου να προσαρμοστεί κατάλληλα το κύκλωμα επαφής, όπως φαίνεται στο (a) του σχήματος 4.14. Ο προεπιλεγμένος βηματισμός αύξησης καθορίζεται στα 0.05mm. Ο κύκλος της διαδικασίας ψηφιοποίησης για να εκληφθούν 144 σημεία είναι περίπου 33sec. Το όριο που υπάρχει στο υπό ψηφιοποίηση τεμάχιο είναι 120mmX120mmX100mm (μήκος X πλάτος X ύψος). Η πλάκα ακίδων είναι στερεωμένη πάνω σε έναν XY πίνακα, ο οποίος μπορεί να μετακινείται πλευρικά. Για το λόγο αυτό είναι δυνατή η ψηφιοποίηση περισσότερων σημείων μεταξύ του διάκενου των 10mm που υπάρχει ανάμεσα σε δυο ακίδες, όπως δείχνει το (b) του σχήματος 4.14. Επομένως η πυκνότητα των τμηματικών συνόλων δεδομένων είναι προγραμματιζόμενη. Για παράδειγμα, για να αποκτήσουμε ένα σύνολο δεδομένων με διάκενο 1mm θα χρειαστούμε περίπου 100 διαδικασίες ψηφιοποίησης, ενώ για διάκενο 2mm χρειαζόμαστε μόνο 25.

Τα περισσότερα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται, της ο βηματικός κινητήρας και οι διακόπτες επαφών, είναι τυποποιημένα και εύκολα διαθέσιμα. Το συνολικό κόστος του συστήματος ανέρχεται στα 1000\$. Για της λόγους που αναφέρθηκαν καταλαβαίνουμε ότι το σύστημα αυτό ψηφιοποίησης μπορεί να καλύψει τόσο της τεχνικές όσο και της οικονομικές απαιτήσεις της βιομηχανίας που παράγει προϊόντα με τη μέθοδο της θερμομόρφωσης.



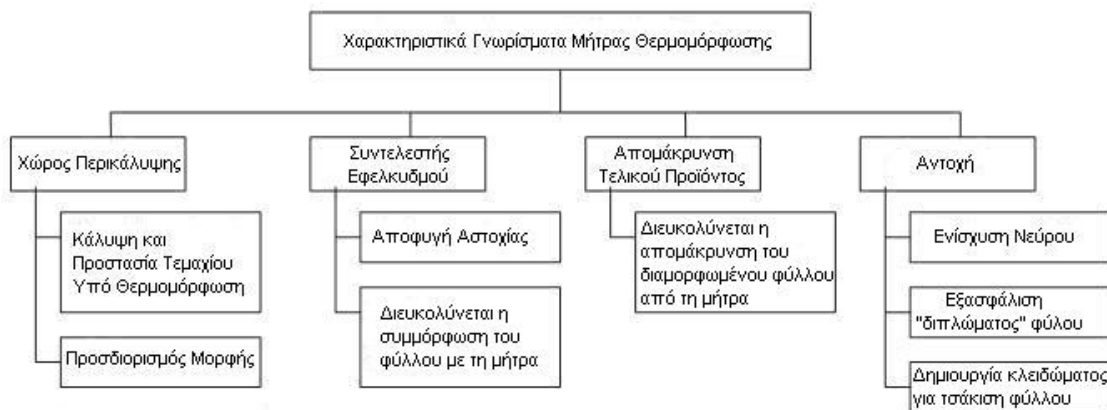
Σχήμα 4.15: Μηχανές ψηφιοποίησης με σειρά ακίδων

ν) Χαρακτηριστικά γνωρίσματα καλουπιών

Εξαιτίας κάποιων χαρακτηριστικών όπως η αντοχή αλλά και η αισθητική, αρκετές φορές το καλούπι που χρησιμοποιείται για τη θερμομόρφωση συχνά παρεκκλίνει από το σχήμα του δοκιμίου που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του. Οι φόρμες για τη θερμομόρφωση μπορούν να περιέχουν τόσο κανονικές όσο και ελεύθερης φόρμας διορθωτικές αλλαγές. Παρατηρήθηκε ότι οι χειρωνακτικοί κατασκευαστές καλουπιών χρησιμοποιούν αυτή την αρχή των αλλαγών ώστε να αναγνωρίσουν και να διαλέξουν περιοχές ενδιαφέροντος, κατά τη διάρκεια που διαχειρίζονται επιδέξια το μοντέλου πηλού. [10]

Βασισμένοι στην αρχή λειτουργίας, σε τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα δίνεται μεγάλη προσοχή κατά τη κατασκευή καλουπιών για τη θερμομόρφωση :

- i) Χώρος Περικάλυψης
- ii) Συντελεστής Εφελκυσμού
- iii) Απομάκρυνση της μήτρας από το τελικό προϊόν
- iv) Αντοχή



Σχήμα 4.16: Ταξινόμηση χαρακτηριστικών γνωρισμάτων μητρών θερμομόρφωσης

a) Χώρος Περικάλυψης

Η βασικότερη λειτουργία του καλουπιού θερμομόρφωσης είναι να ασφαλίσει και να προστατέψει κάποιο συσκευασμένο μέρος. Η λειτουργία αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας επιφάνειας της οποίας το σχήμα περιβάλλει προσεκτικά το σχηματισμένο κομμάτι, ώστε αυτό να συγκρατείται και να προστατεύεται μέσα στο χώρο περικάλυψης. Έτσι οι επιφάνειες αυτές χαρακτηρίζονται σαν αρχικό γνώρισμα, το σχήμα των οποίων μπορεί να εξαχθεί από τις αρχικές επιφάνειες των κομματιών με θετική μετατόπιση αυτών. Το μετατοπισμένο αυτό κενό δημιουργεί μια ουδέτερη ζώνη μεταξύ του υπό διαμόρφωση φύλλου και του τελικού κομματιού, καθώς απομονώνει το τελικό κομμάτι από εξωτερικές δυνάμεις οι οποίες μπορούν να προκληθούν με την ρίψη ή τον σκληρό χειρισμό, με αποτέλεσμα να δημιουργείται αστοχία στο τελικό προϊόν.

b) Συντελεστής Εφελκυσμού

Κατά τη διάρκεια της θερμομόρφωσης, το μαλακωμένο, λόγω θερμότητας, φύλλο τεντώνεται ή εφελκύεται μέσω του καλουπιού, προκειμένου να δημιουργηθεί το επιθυμητό σχήμα. Η διαδικασία του εφελκυσμού προκαλεί μια αύξηση της επιφάνειας αλλά μείωση του πάχους του φύλλου. Γνωρίσματα, όπως αιχμηρές άκρες και απότομες εσοχές, οδηγούν σε μια υψηλή αναλογία εφελκυσμού, το οποίο προσδιορίζεται σαν την αναλογία της περιοχής του φύλλου μετά τη διαμόρφωση με εκείνη που είχε τη διαδικασία μορφοποίησης. Τα χαρακτηριστικά θερμομόρφωσης με χαμηλό συντελεστή εφελκυσμού είναι πιο εύκολα να μορφοποιηθούν. Αυτό εξηγεί γιατί οι κατασκευαστές καλουπιών για θερμομόρφωση στρογγυλεύουν τις απότομες άκρες, προσθέτουν υλικό σε απότομες γωνίες και συμπληρώνουν υλικό σε βαθιές εσοχές για να αποφύγουν το σχηματισμό γνωρισμάτων με υψηλό συντελεστή εφελκυσμού. [11]

c) Απομάκρυνση μήτρας από το τελικό προϊόν

Έχει να κάνει με την διευκόλυνση της απομάκρυνσης του μορφοποιημένου φύλλου από το καλούπι, με τη σταδιακή μείωση του πάχους των πλευρικών τοιχωμάτων. Συνήθως χρησιμοποιούμε γωνίες διαβαθμισμένες ή σειρά γωνιών οι οποίες κυμαίνονται από 31° έως 51°. Ανάλογα με την κυρτότητα και τον προσανατολισμό της επιφάνειας, μερικές επιφάνειες δεν προκαλούν εμπόδιο στο στάδιο της αποκαλούπιασης, οπότε δεν χρειάζεται να ενσωματώσουμε οι γωνίες που αναφέρθηκαν.

d) Αντοχή

Η μηχανική αντοχή ενός φύλλου υπό διαμόρφωση μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση αυλακώσεων, ιστών και γεφυρών. Μερικές φορές ένα χαρακτηριστικά με τη μορφή σχισμής σχεδιάζονται για να λειτουργήσουν σαν άρθρωση, επιτρέποντας ένα μορφοποιημένο φύλλο να διπλώνεται στη σχισμή. Ένα άλλο παράδειγμα είναι ότι εάν μια πλευρά του διπλωμένου φύλλου έχει μια προεξοχή, ένα εξόγκωμα και κάποια άλλη έχει μια εσοχή, το εξόγκωμα μπορεί να εισχωρήσει στην εσοχή, παράγοντας μια μορφή κλειδώματος, με αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται το δίπλωμα του φύλλου.

vi) Κατασκευή Μοντέλου Επιφάνειας

Το χαρακτηριστικό του χώρου περικάλυψης, αποτελεί το βασικότερο γνώρισμα λειτουργικότητας του τελικού προϊόντος. Για το λόγο αυτό, στην προτεινόμενη μέθοδο, το χαρακτηριστικό αυτό κατασκευάζεται πρώτο. Κατόπιν, η επιφάνεια αυτή μπορεί να τροποποιηθεί για να συμπεριληφθούν και τα δευτερογενή χαρακτηριστικά, όπως ο συντελεστής εφελκυσμού, το αποκαλούπιασμα και η αντοχή. Παρακάτω περιγράφουμε την κατασκευή του βασικού χαρακτηριστικού και την κατόπιν τροποποίηση για τη πρόσθεση κάποιων δευτερογενών γνωρισμάτων.

vii) Διαμόρφωση Αρχικής Επιφάνειας Μοντέλου

Το πρώτο βήμα, όσο αφορά την μοντελοποίηση του χώρου περικάλυψης για μια συγκεκριμένη περιοχή του τεμαχίου, είναι η τμηματοποίηση κάποιων άκρων σε μια περιοχή που επιλέγει ο χρήστης. Η τμηματοποίηση γίνεται χειρονακτικά με την επιλογή των σημείων που βρίσκονται στα σύνορα της επιθυμητής περιοχής. Το πρόγραμμα τότε θα επεξεργαστεί ξανά το σύνολο των σημείων, ώστε η τιμή κατά τον Z άξονα των σημείων που βρίσκονται μέσα στην περιοχή που καθορίσαμε να μείνει αμετάβλητη και η αντίστοιχη τιμή των σημείων που βρίσκονται έξω από την περιοχή να γίνει 0 (μηδέν). Αυτό θα θεωρηθεί και επίπεδο αναφοράς (base level).

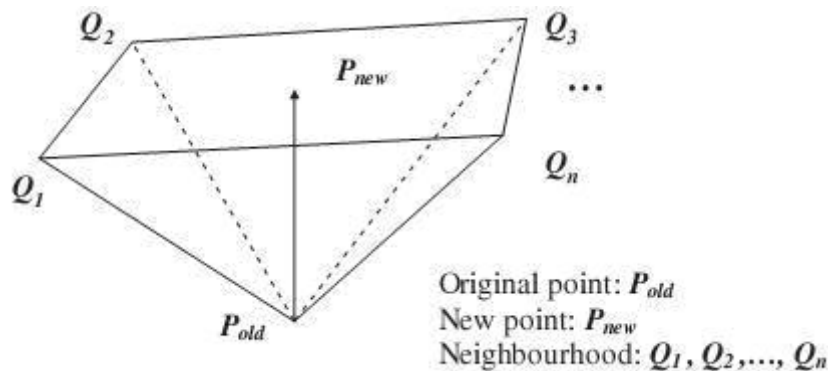
Το δεύτερο βήμα είναι να εξομαλύνουμε τα σημεία με την εφαρμογή της Λαπλασιανής (Laplacian) εξίσωσης. Η βασική αρχή εξομάλυνσης της Λαπλασιανής εξίσωσης είναι ότι ένα σημείο μετακινείται αρκετά κοντά στην αρχική του θέση, μην μεταβάλλοντας συνολικά όμως τη μέση τιμή των συνοριακών σημείων. Συνεπώς, αυτό επιδρά στο μέσο όρο με το μειώνει την αυξομείωση, τη διακύμανση των συντεταγμένων τιμών σε σχέση με όλες τις τιμές των σημείων.[12]

Μαθηματικός, μια τέτοια εξίσωση φαίνεται παρακάτω

$$U(P) = \frac{1}{\sum_i w_i} \sum_i w_i Q_i - P$$

$$P_{new} \leftarrow P_{old} + \lambda U(P_{old})$$

όπου P είναι σημείο που μετακινείται, Qi είναι το γειτονικό ith σημείο, w είναι η βαρύτητα του κάθε γειτονικού σημείου, και λ η βαρύτητα του μέσου όρου των όλων επιδράσεων.

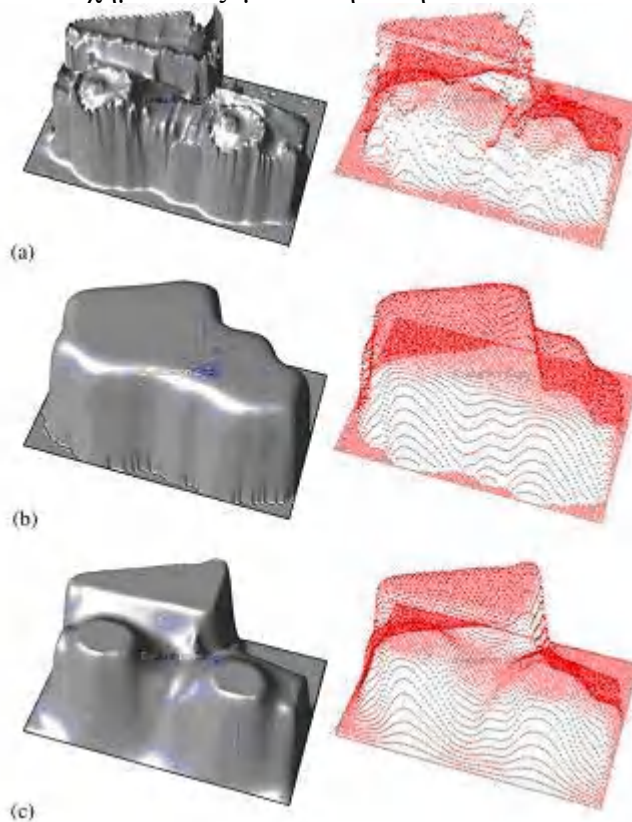


Σχήμα 4.17: Τελεστής εξομάλυνσης μέσω Λαπλασιανή Εξίσωση

Για ένα σημείο $P_{i,j}$, το οποίο βρίσκεται στην i^{th} σειρά και στην j^{th} στήλη, ενός κανονικού χάρτη z συντεταγμένων, τα τέσσερα γειτονικά του σημεία είναι τα $P_{i+1,j}$, $P_{i-1,j}$, $P_{i,j+1}$ και $P_{i,j-1}$. Υποθέτοντας ότι όλα τα γειτονικά σημεία έχουν ίση σημασία επιρροής, η τιμή του w_i , ισούται με 1. Επίσης και η αξία του λ ισούται με 1, ώστε να μην επηρεάζεται το καινούριο σημείο - το οποίο προκύπτει μετά τη Λαπλασιανή εξίσωση - από τη θέση του αρχικού σημείου.

Από τη στιγμή που οι x - y συντεταγμένες του κάθε σημείου είναι γνωστές από τον ψηφιοποιητή που χρησιμοποιεί τη διάταξη των ακίδων, η Λαπλασιανή εξίσωση εφαρμόζεται για να προσαρμόσει μόνο τις z συντεταγμένες. Για να είμαστε σίγουροι ότι υπάρχει θετική μετατόπιση μεταξύ της σταθερής επιφάνειας και των αρχικών σημείων, οι z τιμές που υπολογίζονται από τη Λαπλασιανή εξίσωση τροποποιούνται με την εφαρμογή ενός απλού κανόνα. Εάν οι νέες z τιμές είναι μεγαλύτερες από τις παλιές τιμές, τότε χρησιμοποιούμε τις καινούριες, αλλιώς χρησιμοποιούμε τις παλιές.

Αυτή η τροποποίηση βεβαιώνει ότι το αποτέλεσμα από την Λαπλασιανή εξίσωση θα συγκλίνουν και το πρόβλημα της συρρίκνωσης που συναντάμε στην Λαπλασιανή εξίσωση μπορεί να αποφευχθεί. Η εξίσωση επιδρά σαν μια διαδικασία διάχυσης, κατά την οποία υψηλότερης αξίας σημεία εκτείνουν την επιρροή τους σε σημεία χαμηλότερης αξίας. Διαπιστώθηκε ότι εφαρμόζοντας αυτήν την εξίσωση συνεχόμενα για 20 έως 200 φορές, η κατανομή των z συντεταγμένων δημιουργεί μια λεία επιφάνεια. Εν συνεχεία η επιφάνεια αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πρότυπο μήτρας, ώστε εν συνεχεία να παράγουμε καλούπια για θερμομόρφωση. , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η εξομάλυνση αυτή αποτυπώνεται στο σχήμα 4.18.



Σχήμα 4.18: Διαδικασία εξομάλυνσης σημείων

Προφανώς, το πώς θα γίνει η τμηματοποίηση κάποιων σημείων, θα έχει επίδραση στη μορφή του τελικού σχήματος της επιφάνειας του μοντέλου. Για παράδειγμα, στο σχήμα 4.18, το (α) δείχνει τα αρχικά σημεία ενός παιχνιδιού αυτοκινήτου, όπως έχουν καταγραφεί από τον ψηφιοποιητή. Η φιγούρα (b) δείχνει την σχηματοποιημένη επιφάνεια, αφού έχει γίνει τμηματοποίηση σε μια περιοχή αντί των αρχικών σημείων. Ενώ το (c) απεικονίζει το αποτέλεσμα αν γίνει τμηματοποίηση σε 3 περιοχές. Καταλαβαίνουμε δηλαδή ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να προσφέρει ευελιξία στον σχεδιαστή, κατά τη μορφοποίηση της επιθυμητής επιφάνειας του καλουπιού. Παρόλο που η διαδικασία της μοντελοποίησης είναι αρκετά πιο πολύπλοκη όταν τα σημεία επιλέγονται χειροκίνητα, η διαδικασία της τμηματοποίησης αξίζει να εφαρμόζεται. Ο τρόπος τμηματοποίησης ενός μοντέλου, κατά το σχεδιασμό φορμών της θερμομόρφωσης, εξαρτάται από τον σκοπό του σχεδιαστή, και όχι εξαιτίας συγκεκριμένων γεωμετρικών ιδιοτήτων, όπως γίνεται σε άλλες εφαρμογές αντίστροφης εφαρμοσμένης μηχανικής.

Ο κώδικας που χρησιμοποιείται για την Λαπλασιανή εξίσωση απεικονίζεται στο σχήμα 4.19. Εκτιμάται ότι η εξίσωση μπορεί να εξομοιώσει την επίπτωση αν προσθέσουμε πηλό στο πρότυπο μοντέλο, που θα χρησιμοποιηθεί στην θερμομόρφωση, για τη αντιστάθμιση διάφορων κενών και μείωσης σημείων της επιφάνειας με μεγάλη τριβή.

```

//Primary feature
//zi,j is height of point Pi,j in a set of MxN points
For i = 1 to M
  For j = 1 to N
    If Pi,j in segment then
      ξi,j = ηi,j = zi,j
    Else
      ξi,j = ηi,j = 0
    End if
  Next j
Next i
For n = 1 to Number_of_step //(20< Number_of_step <200)
  For i = 1 to M
    For j = 1 to N
      If ξi,j < (ηi,j-1 + ηi,j+1 + ηi-1,j + ηi+1,j)/4 then
        ξi,j = (ηi,j-1 + ηi,j+1 + ηi-1,j + ηi+1,j)/4
      Else
        ξi,j = ξi,j
      End if
    Next j
  Next i
  For i = 1 to M
    For j = 1 to N
      ηi,j = ξi,j
    Next j
  Next i
Next n
For i = 1 to M
  For j = 1 to N
    If Pi,j in segment then
      zi,j = ηi,j
    Else
      zi,j = zi,j
    End if
  Next j
Next i

```

Σχήμα 4.19: Κώδικας Λαπλασιανής Εξίσωσης

viii) Διαμόρφωση Γωνιών Σχεδίασης

Μετά την τμηματοποίηση περιοχών, χρειάζεται να εφαρμόσουμε στο καλούπι την Λαπλασιανή εξίσωση σε όλα τα σημεία, προκειμένου να έχουμε μια αποτελεσματική εξομάλυνση. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, οι διάφορες γωνίες που υπάρχουν στα πλευρικά τοιχώματα του υπό κατασκευή μοντέλου μοντελοποιούνται. Κατά την μοντελοποίηση όμως, παρατηρείται ότι τα σημεία εκείνα που εκτείνονται έξω από την άκρη του ορίου ανασύρονται, “σηκώνονται” προς τα επάνω. Εν συνεχεία, η διαδικασία με την Λαπλασιανή εξίσωση τροποποιείται ελαφρώς, ώστε η βαρύτητα του υψηλότερου γειτονικού σημείου να διπλασιάζεται, όπως φαίνεται και από τον κώδικα του σχήματος 4.20.

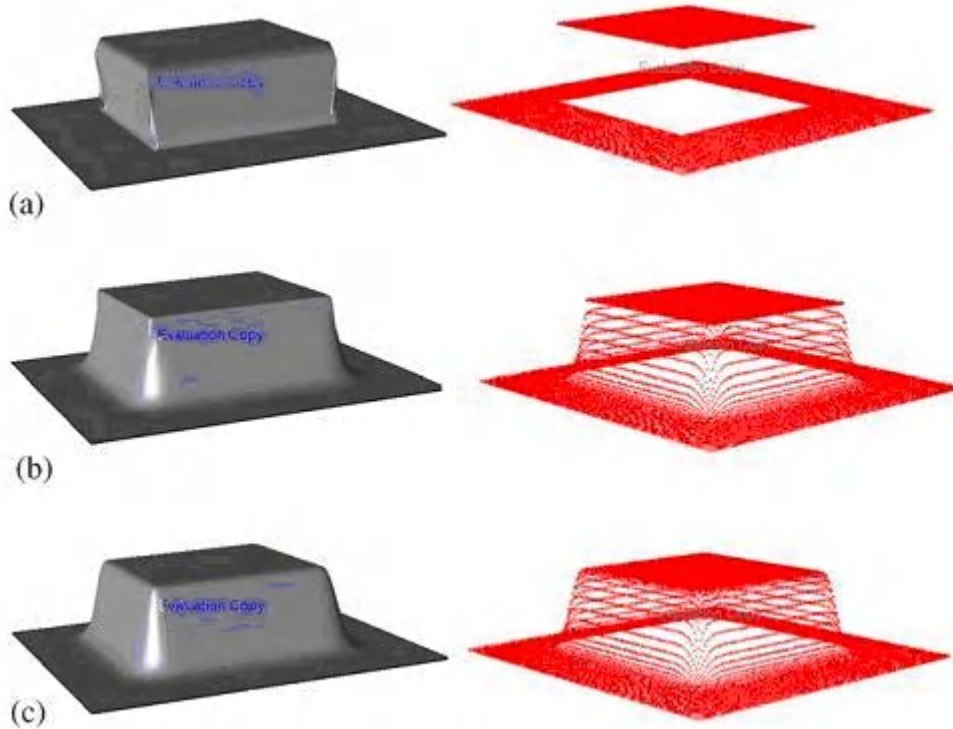
```

//Side wall
//zi,j is height of point Pi,j in a set of MxN points
For i = 1 to M
  For j = 1 to N
    If Pi,j in segment then
       $\xi_{i,j} = z_{i,j}$ 
    Else
       $\xi_{i,j} = 0$ 
    End if
  Next j
Next i
For n = 1 to Number_of_step //(0 < Number_of_step < 6)
  For i = 1 to M
    For j = 1 to N
      If Pi,j in segment then
         $\xi_{i,j} = \xi_{i,j}$ 
      Else
        If  $\xi_{i,j} < (z_{i,j-1} + z_{i,j+1} + z_{i-1,j} + z_{i+1,j})/4$  then
           $\xi_{i,j} = (z_{i,j-1} + z_{i,j+1} + z_{i-1,j} + z_{i+1,j})/4$ 
        Else
           $\xi_{i,j} = \xi_{i,j}$ 
        End if
      End if
    Next j
  Next i
  For i = 1 to M
    For j = 1 to N
       $z_{i,j} = \xi_{i,j}$ 
    Next j
  Next i
Next n

```

Σχήμα 4.20: Κώδικας για Διαμόρφωση Πλευρικών Τοιχωμάτων

Διαπιστώθηκε, ότι μετά την εφαρμογή της Λαπλασιανής εξίσωσης, για λιγότερες από 6 φορές, η επαπτόμενη γωνία των πλευρικών τοιχωμάτων ελαττώνεται και γίνεται πιο αιχμηρή, “μυτερή” προς τα έξω, σχηματοποιώντας έτσι το φαινόμενο των γωνιών σχεδίασης, όπως φαίνεται στο (b) του σχεδίου 4.21.



Σχήμα 4.21: Εξομάλυνση γωνιών και πλευρικών τοιχωμάτων

ix) Διαμόρφωση Λωρίδων

Η μοντελοποίηση κατά λωρίδες γίνεται προκειμένου να στρογγυλέψουν οι άκρες στα όρια και οι γωνίες της επιφάνειας ενός μοντέλου. Για τα σημεία, τα οποία βρίσκονται μέσα στα όρια της επιφάνειας του υπό μοντελοποίηση τεμαχίου, εάν οι z τιμές του είναι υψηλότερες από εκείνες που υπολογίστηκαν από την εξίσωση Laplace, τότε επιτρέπεται να μειωθούν. Με αυτόν τον τρόπο λοιπόν, τα σημεία που βρίσκονται κοντά στις άκρες του ορίου καθώς και οι γωνίες, οι τιμές τους στο z άξονα μειώνονται από τις κανονικές ώστε η επιφάνεια να στρογγυλοποιείται, όπως φαίνεται στο (c) του σχήματος 4.21. Δεδομένου ότι οι τιμές του z άξονα μειώνονται, αυτό οδηγεί σε μια μείωση του χάσματος στην επιφάνεια του μοντέλου. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα όμως την επίδραση μεταξύ του καλουπιού και του υπό διαμόρφωση φύλλου. Για να το αποφύγουμε αυτό, χρησιμοποιούμε έναν αλγόριθμο διαμόρφωσης χάσματος, ο οποίος προτάθηκε από τον Jang [13]. Κατά τον αλγόριθμο αυτό ανυψώνουμε ελαφρώς την επιφάνεια του μοντέλου προτού εκτελέσουμε τη διαδικασία της διαμόρφωσης κατά λωρίδες. Επίσης, αντί να χρησιμοποιήσουμε 4 παράπλευρα σημεία, η διαμόρφωση κατά λωρίδες κάνει χρήση 8 γειτονικών σημείων κατά τη Λαπλασιανή εφαρμογή, ώστε να επιβραδυνθεί η διαδικασία της μείωσης των τιμών στο z άξονα, για να αποφύγουμε την ακραία εξομάλυνση της επιφάνειας και την μείωση χάσματος (αποφυγή επίδρασης μεταξύ καλουπιού και υπό διαμόρφωση φύλλου). Ο κώδικας που χρησιμοποιούμε για διαμόρφωση κατά λωρίδες και της διαμόρφωσης του χάσματος παρουσιάζεται παρακάτω (σχήμα 4.22 (a) και (b) αντίστοιχα), ενώ το (c) του 4.22 επιδεικνύει τη συσσωμάτωση και των 2 διαδικασιών.

```

//Fillet
//zi,j is height of point Pi,j in a set of MxN points
For i = 1 to M
  For j = 1 to N
    ζi,j = zi,j
  Next j
Next i
For n = 1 to Number_of_step //(0< Number_of_step <6)
  For i = 1 to M
    For j = 1 to N
      If ζi,j > (zi,j-1 + zi,j+1 + zi-1,j + zi+1,j + zi+1,j-1 + zi+1,j+1 + zi-1,j-1 + zi-1,j+1)/8 then
        ζi,j = (zi,j-1 + zi,j+1 + zi-1,j + zi+1,j + zi+1,j-1 + zi+1,j+1 + zi-1,j-1 + zi-1,j+1)/8
      Else
        ζi,j = ζi,j
      End if
    Next j
  Next i
  For i = 1 to M
    For j = 1 to N
      zi,j = ζi,j
    Next j
  Next i
Next n

```

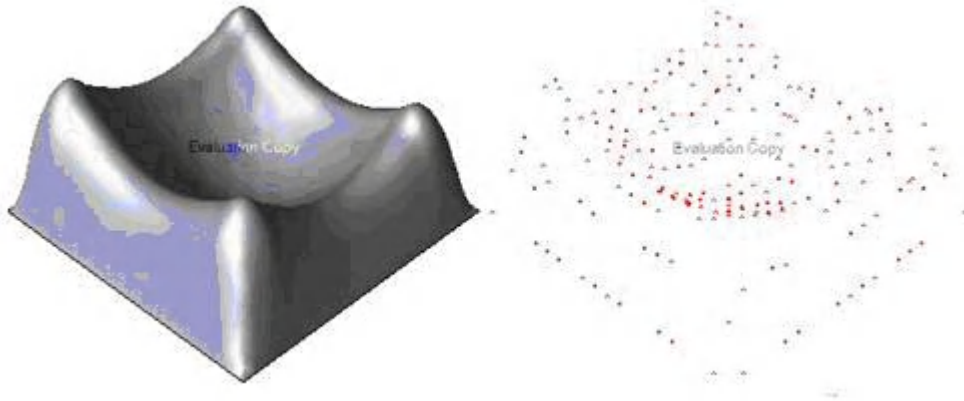
(a) Κώδικας για διαμόρφωση κατά λωρίδες

```

//Offset
//xi,j, yi,j, zi,j is x, y, z coordinates of point Pi,j in a set of MxN points, r is the offset distance
For i = 1 to M
  For j = 1 to N
    ζi,j = zi,j
  Next j
Next i
For i = 1 to M
  For j = 1 to N
    If Pi,j in segment then
      z_max = 0
      For m = 1 to M
        For n = 1 to N
          dm,n = ((xm,n - xi,j)2 + (ym,n - yi,j)2)1/2
          hm,n = (r2 - dm,n2)1/2
          If dm,n <= r then
            If z_max < (zm,n + hm,n) then
              z_max = (zm,n + hm,n)
            Else
              z_max = z_max
            End if
          End if
        Next n
      Next m
      ζi,j = z_max
    Else
      ζi,j = ζi,j
    End if
  Next j
Next i
For i = 1 to M
  For j = 1 to N
    zi,j = ζi,j
  Next j
Next i

```

(b) Κώδικας για διαμόρφωση χάσματος



(c) Τελικό προϊόν μετά την εκτέλεση κώδικα για διαμόρφωση κατά λωρίδες και χάσματος

Σχήμα 4.22: Εξομάλυνση με διαμόρφωση κατά λωρίδες και χάσματος

x) Εφαρμογή και αποτελέσματα

Ένα πειραματικό λογισμικό σχεδίασης καλουπιών θερμομόρφωσης μπορεί να εφαρμοστεί για να επαληθεύσει την αξιοπιστία και την εγκυρότητα της μεθόδου που προτάθηκε. Οι Λαπλασιανές εξισώσεις γράφονται σε κώδικες γλώσσας Visual Basic ή Fortran και συνδέονται με εμπορικά προγράμματα OpenGL Api. Τα εξαγόμενα Λαπλασιανά σημεία εισάγονται σε ένα γεωμετρικό μοντελοποιητή ACIS, προκειμένου να εξαχθεί το πρότυπο μοντέλο και να παρατηρηθεί η επιφάνειά του.

Ένα εύκολο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ποντίκι του σχήματος 4.23.



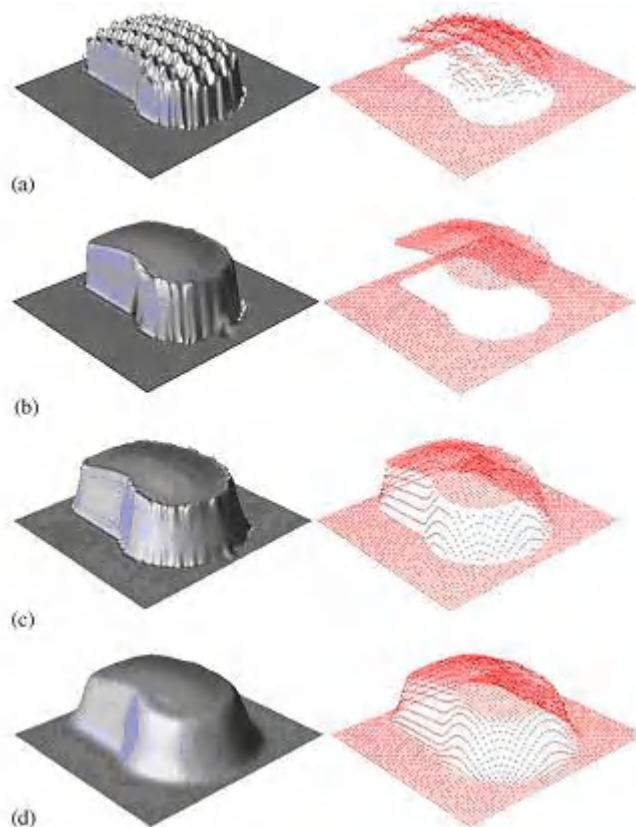
Σχήμα 4.23: Μοντέλου ποντικιού

Το οποίο μπορεί να ψηφιοποιηθεί μέσω του συστήματος ψηφιοποίησης των ακίδων σαν του σχήματος 4.24.



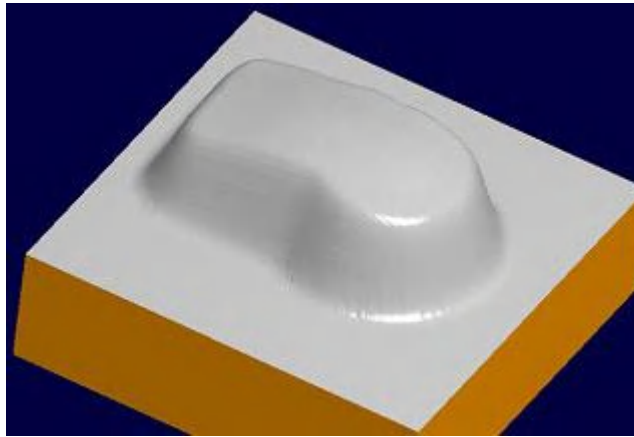
Σχήμα 4.24: Σύστημα ψηφιοποίησης με ακίδες

Με τη βοήθεια του ψηφιοποιητή αποκτήθηκε ένα σύνολο 3600 σημείων με διάστημα 2mm (σχήμα 4.25 (a)). Η πάνω επιφάνεια (σχήμα 4.25 (b)), τα πλευρικά τοιχώματα (σχήμα 4.25 (c)) και η διαδικασία των λωριδών (σχήμα 4.25 (d)) μοντελοποιήθηκαν με τον επαναπροσδιορισμό των συντεταγμένων των σημείων μέσω την τροποποιημένης Λαπλασιανής εξίσωσης.



Σχήμα 4.25: Διαδικασία μοντελοποίησης μήτρας με εξομάλυνση σημείων

Για να είναι καλύτερη η κατανόηση του επαναπροσδιορισμού εκ νέου των σημείων, παρουσιάζονται επίσης οι φωτοσκιασμένες εικόνες. Μετά την επεξεργασία του συνόλου των σημείων με τις Λαπλασιανές εξισώσεις, δημιουργείται η τελική επιφάνεια του πρότυπου μοντέλου και κατασκευάζεται το καλούπι, όπως δείχνει η εικόνα 4.26. Το μοντελοποιημένο αποτέλεσμα είναι ένα τυπικό παράδειγμα σχεδιασμού καλουπιού για θερμομόρφωση.



Σχήμα 4.26: Μήτρα για κατασκευή ποντικιού με μέθοδο Θερμομόρφωσης

xi) Συμπεράσματα

Το κεφάλαιο αυτό αφορά μια προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί η προσέγγιση της χρήσης της αντίστροφης εφαρμοσμένης μηχανικής στη θερμομόρφωση, ώστε να βελτιωθεί η αποδοτικότητα του σχεδιασμού και της παραγωγής καλουπιών. Η προτεινόμενη λύση που αναλύθηκε είναι περιεκτική και στοχεύει σε εταιρείες που έχουν εργασιακούς περιορισμούς και ελάχιστους πόρους. Η συσκευή ψηφιοποίησης ακίδων θεωρείται μια εφαρμόσιμη τεχνική που μπορεί να βοηθήσει τη βιομηχανία θερμομόρφωσης στο σχεδιασμό και στην κατασκευή καλουπιών με τη χρήση τεχνικών από υπολογιστές.

Η ταξινόμηση των γνωρισμάτων της θερμομόρφωσης που παρουσιάσαμε, είναι χρήσιμη για την κατανόηση της δομής των καλουπιών. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται από τους υπολογιστές αναπτύχθηκαν για την επανακατασκευή της δομής κάποιων καλουπιών θερμομόρφωσης. Τα αποτελέσματα από τους αλγόριθμους αυτούς είναι εντυπωσιακά και αρκετά ελπιδοφόρα. Μελλοντικά, θα βρεθεί κάποια μέθοδος διόρθωσης του συντελεστή εφέλκυσμού και βελτίωσης των αλγορίθμων, ώστε να σχεδιάζονται περισσότερο περίπλοκες επιφάνειες καλουπιών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1. A. Illig, Thermomorfing: A Practical Guide, Hanser Publishers, Munich, 2000.
2. J. Throne, Technology of Thermomorfing, Hanser Publications, Munich 1996.
3. G. Gruenwald, Thermomorfing: A Plastic Processing Guide, Technomic Publishing CO., Lancaster, 1987.
4. Hsiao SW, Chuang JC. A reverse engineering based approach for product form desing. Des Stud 2003.
5. Thompson WB, Owen JC, de St Germain HJ. Feature based reverse engineering of mechanical parts. IEEE Trans Robotics Automat 1999.
6. Poldermann B, Horváth I. Surface design based on parameterized surface features. Proceedings of first international symposium on tools and methods of competitive engineering, Budapest, Hungary, 1996.
7. Fontana M, Giannini F, Meirana M. A free form feature taxonomy Comput Graph Forum 1999.
8. Vergeest JSM, Horváth I, Jeloer J. Practical and computational issues of reverse/forward engineering of shape. In: Meiritz B, editor. Reverse Engineering -3D scanning and a shortcut to modeling. Aarhus: Danish Technological Institute, 1999.
9. Tam KW, Chan KW. Case study: a novel surface scanning system, J Robotics Syst, 2005.
10. Berg E, Bronsvort WF, Vergeest JSM. Techniques for freeform feature modeling. Proceedings of fourth international symposium on tools and methods of competitive engineering, Wuhan, China, 2002.
11. Gruenwald G. Thermomorfing: a plastic processing guide. 2nd ed. Lancaster: Technomic Pub. Co. Inc., 1998.
12. Vollmer J, Mencl R, Muller H. Improved Laplacian smoothing of noisy surface meshes. Comput Graph Forum 1999.
13. Jang D, Kim K, Jeong J. Adaptive Gregory patch approximation to Z-map data. Int Adv. Manuf. Technol 1999.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

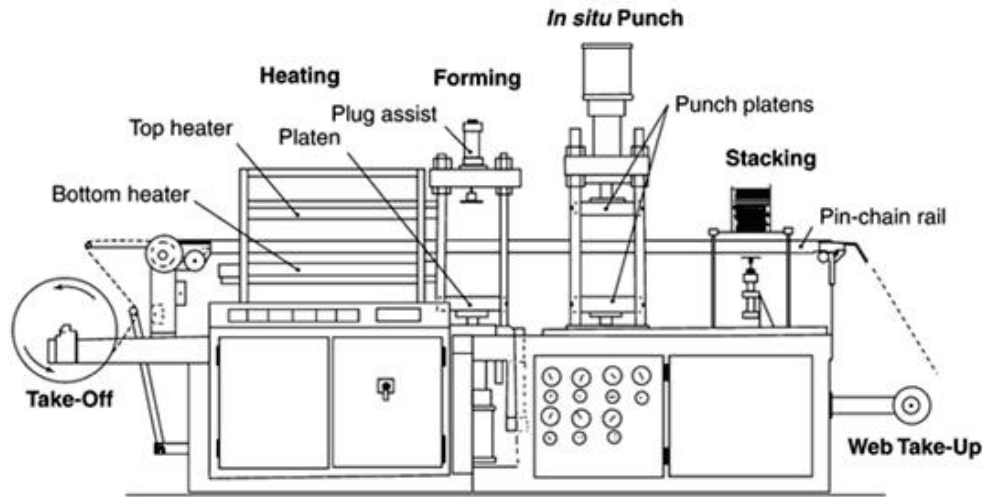
Είδη Μηχανών Θερμομόρφωσης

5.1. Εισαγωγή

Η επιλογή της κατάλληλης μηχανής για τη διαδικασία της θερμομόρφωσης εξαρτάται από το αν θέλουμε να κατασκευάσουμε λεπτές (thin gauge) ή στιβαρές (heavy gauge) κατασκευές. Ωστόσο, όλες οι μηχανές περιλαμβάνουν κάποιας μορφής συσκευή, η οποία θα χειρίζεται το φύλλο υπό διαμόρφωση, κάποιο τρόπο μετακίνησης του φύλλου από τον έναν σταθμό στον άλλο, φούρνος θέρμανσης του φύλλου, σύστημα παραγωγής κενού, σύστημα πίεσης που θα κρατεί τα κομμάτια της μήτρας, περιοχή απομάκρυνσης μήτρας και φύλλου και το σύστημα ελέγχου των υποσταθμών της μηχανής, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την μεταφορά του υπό διαμόρφωση φύλλου από τον έναν σταθμό στον άλλο. Ακόμα οι μηχανές θα μπορούν να περιλαμβάνουν κάποιας μορφής προτεντώματος του υπό διαμόρφωση φύλλου, ένα σύστημα πίεσης, σύστημα ψήξης καλουπιού και κάποιας μορφής αφαίρεσης περιττών τμημάτων από το τελικό προϊόν.

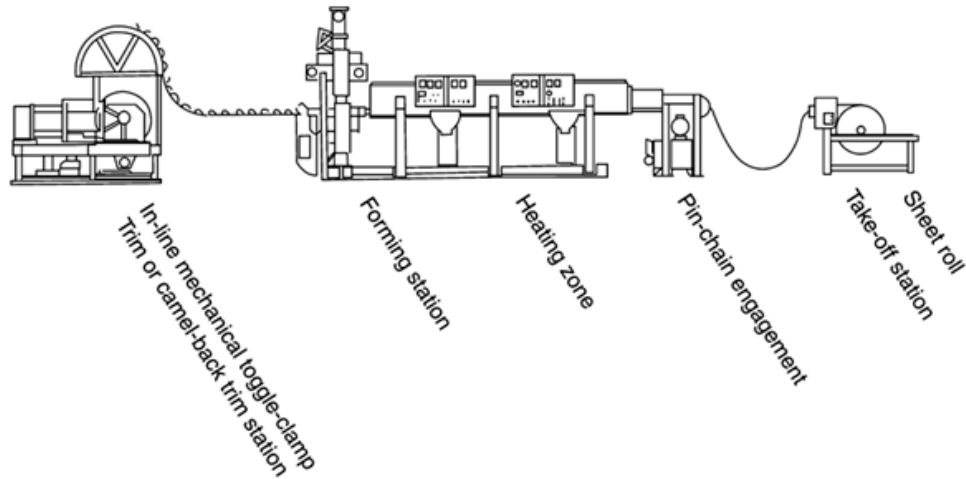
5.2. Μηχανές Λεπτών Κατασκευών (Thin Gauge)

Η εικόνα 5.1 επεξηγεί την πιο κοινή ρύθμιση τέτοιων μηχανών. Το υπό διαμόρφωση φύλλο παραδίδεται σαν ρολό, παρατάσσεται στη μηχανή πάνω σε καρφίτσες, οι οποίες είναι τοποθετημένες κατά μήκος παράλληλων (ή περίπου παράλληλων) των αλυσίδων σύνδεσης. Το φύλλο συνήθως θερμαίνεται ομοιόμορφα και από τις 2 πλευρές, μέσω υπέρυθρης ακτινοβολίας. Οι περισσότερες μηχανές εμπορίου χρησιμοποιούν κεραμικά τούβλα, μεταλλικά πιάτα, μεταλλικές ράβδοι και σωλήνες ή πιάτα χαλαζία για πηγές θέρμανσης. Οι φούρνοι λειτουργούν με στάδια διαμόρφωσης. Μόλις το φύλλο πλησιάσει τη θερμοκρασία διαμόρφωσης, τοποθετείται στην πρέσα διαμόρφωσης. Αυτή περιέχει τουλάχιστον μια πλάκα στερέωσης, η οποία περιέχει την επιθυμητή συναρμολόγηση φόρμας. Στην περίπτωση που τα υπό διαμόρφωση κομμάτια απαιτούν συμπληρωματική διαμόρφωση, όπως στην περίπτωση φύλλων αφρού χαμηλής πυκνότητας, υπάρχει μια δεύτερη πλάκα στερέωσης στην οποία περιέχεται η συμπληρωματική φόρμα. Σε αντίθετη περίπτωση η δεύτερη πλάκα μπορεί να περιέχει ένα κιβώτιο πίεσης, ένα μηχανικό έμβολο και πλέγμα στερέωσης. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ανοίγματος και κλεισίματος της πρέσας διαμόρφωσης. Οι μηχανικοί και πνευματικοί πείροι ασφαλείας χρησιμοποιούνται για δεκαετίες, ενώ οι ηλεκτρικά καθοδηγούμενες πλάκες στερέωσης γίνονται αρκετά δημοφιλείς πρόσφατα. [1]



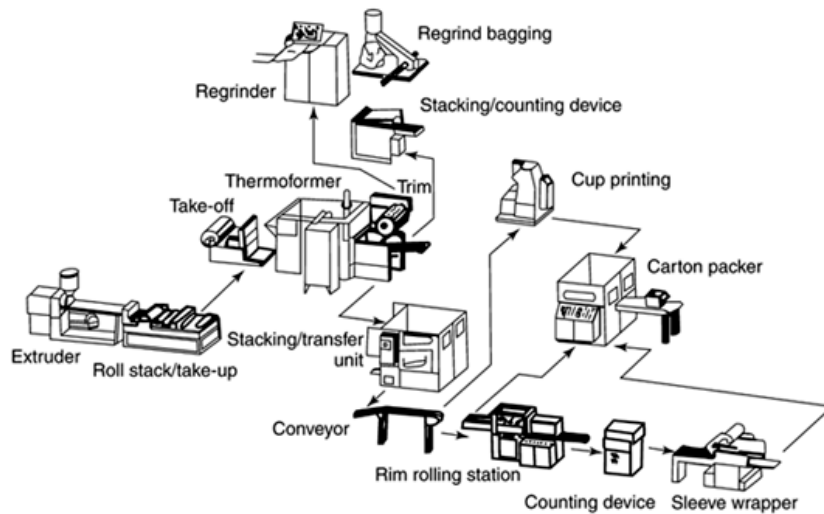
Σχήμα 5.1: Μηχανή Λεπτών Κατασκευών

Η πλειονότητα των κομματιών που παράγονται από τις μηχανές αυτές διαμορφώνεται σε θηλυκές ή αρνητικές κοιλότητες. Για τις βαθιές κοιλότητες ή για τις κοιλότητες πολλαπλών θαλάμων, μηχανικά υποβοηθήματα, τα έμβολα, χρησιμοποιούνται για να τεντώνουν το φύλλο πριν χρησιμοποιηθεί κενό ή πίεση για να εξαναγκασθεί το φύλλο να προσκολληθεί στην επιφάνεια της μήτρας. Πίεση αέρα ίση με 5 bar χρησιμοποιείται, παράλληλα με κενό, για τμήματα που απαιτείται μεγάλη λεπτομέρεια επιφάνειας ή αιχμηρές ακτίνες. Στις μηχανές αυτές χρησιμοποιούνται 3 τρόποι απομάκρυνσης του τελικού προϊόντος από το σκελετό, τη μεμβράνη ή το μη-σχηματισμένο κομμάτι του φύλλου. Μόλις τα τμήματα διαμορφωθούν, ενεργοποιείται ο ατσάλινος χάλυβας κοπής για να απελευθερωθεί το προϊόν από την υπόλοιπη μεμβράνη. Η μηχανή έχει έναν ξεχωριστό σταθμό κοπής, ο οποίος συνήθως τοποθετείται κάτω από το σταθμό διαμόρφωσης, αλλά πάντα μέσα στο πλαίσιο της μηχανής. Το φύλλο που περιέχει τα διαμορφωμένα και τελικά προϊόντα, μετά το χώρο διαμόρφωσης τοποθετείται κατευθείαν στον χώρο κοπής, στον οποίο μέσω του ατσάλινου κόπτη διαχωρίζονται. Στο σχήμα της εικόνας 5.2 απεικονίζεται μια μηχανή, στην οποία το φύλλο που περιέχει τα διαμορφωμένα προϊόντα τροφοδοτείται από το τμήμα της διαμόρφωσης στο τμήμα κοπής. Το φύλλο περνά ανάμεσα ενός μηχανισμού διάτρησης και ενός μηχανισμού κοπής. Η διάτρηση ωθεί τα τελικά προϊόντα στον κόπτη, ο οποίος διαχωρίζει τα κομμάτια από το φύλλο και τα σπρώχνει σε τραπέζι συλλογής.



Σχήμα 5.2: Στάδια Μηχανής Λεπτών Κατασκευών

Οι μηχανές FFS χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή συσκευασιών φαρμακευτικών ειδών, τροφίμων και ιατρικών προμηθειών. Στις μηχανές αυτές το φύλλο συνήθως τραβιέται καθ' όλη τη διάρκεια της FFS διαδικασίας. Το υπό διαμόρφωση φύλλο θερμαίνεται από την επαφή με θερμαντικές πλάκες ή κυλίνδρους. Η διαδικασία αυτή είναι πολύ αποτελεσματική όταν το φύλλο είναι της τάξης των 250 μm . [2]

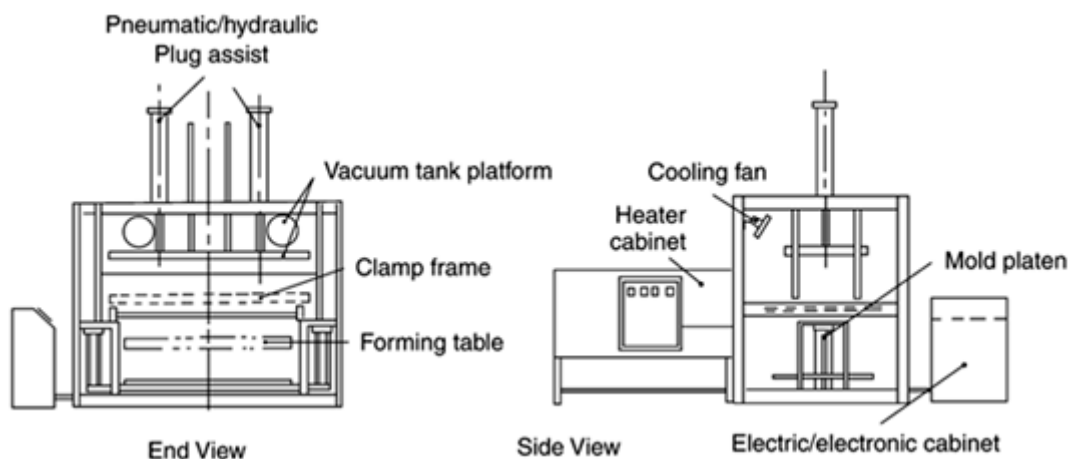


Σχήμα 5.3: Παραδείγματα χρήσης μηχανών λεπτών κατασκευών

Στο τέλος κάθε θερμομόρφωσης το υλικό που έχει απομείνει από το φύλλο συλλέγεται για εκ νέου άλεσμα και επανεπεξεργασία αυτού.

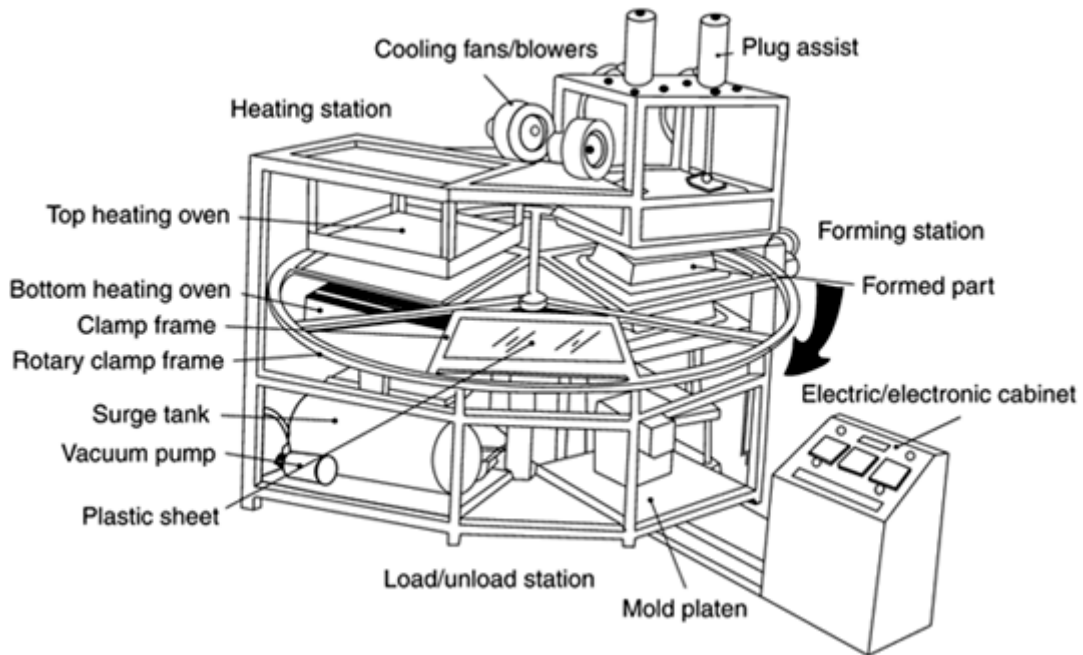
5.3. Μηχανές Βαρέων Κατασκευών (Heavy Gauge)

Υπάρχουν πολλές κοινά μοντέλα για της μηχανές διαμόρφωσης βαριών κατασκευών. Η απλούστερη και ευρύτετα χρησιμοποιημένη είναι η μηχανή με μικρή και τακτική διαδρομή (shuttle machine) [3], στην οποία το φύλλο – το οποίο είναι κομμένο στο μέγεθος και παλετοποιημένο – φορτώνεται (ένα κάθε φορά) σε ένα τετραπλό πλαίσιο σφιγκτήρων και τοποθετείται στο φούρνο. Όταν φτάσει σε θερμοκρασία διαμόρφωσης τοποθετείται στο στάδιο, τμήμα διαμόρφωσης. Όταν διαμορφωθεί και ψυχθεί το φύλλο, αφαιρείται από το πλαίσιο σφιγκτήρων και τοποθετείται στο εξάρτημα κοπής. Οι πρέσες πίεσης είναι πολλαπλών χρήσεων και ικανοί να διαμορφώνουν κομμάτια με σχεδόν απεριόριστες διαστάσεις. Οι πρέσες οι οποίες έχουν 2 σταθμούς διαμόρφωσης και έναν κεντρικό φούρνο χρησιμοποιούνται για να ξεπεράσουν την μη-επαρκή λειτουργία – όσο αφορά οικονομικό κόστος – σε σχέση με μια απλή μηχανή διαμόρφωσης πίεσης. Η shuttle machine περιγράφεται στην εικόνα 5.4.



Σχήμα 5.4: Μηχανή Βαρέων Κατασκευών

Οι μηχανές διαμόρφωσης με ρότορα, είτε με τρεις είτε με τέσσερα σταθμούς, έχουν αρκετά μεγάλο βαθμό απόδοσης, αλλά χρειάζονται μεγάλη προσοχή στις ρυθμίσεις. Στο σχήμα της εικόνας 5.5 εμφανίζεται μια μηχανή με ρότορα, η οποία έχει τρεις σταθμούς. Αυτού του είδους οι μηχανές είναι επίσης περιορισμένες στο μέγεθος των κομματιών που μπορούν να διαμορφώσουν.



Σχήμα 5.5: Μηχανή Βαρείων κατασκευών με ρότορα

Μια μηχανή με τρεις σταθμούς περιλαμβάνει έναν σταθμό θέρμανσης, ο οποίος περιέχει και σταθμό διαμόρφωσης και σταθμό φόρτωσης – εκφόρτωσης. Οι μηχανές με τέσσερις σταθμούς περιλαμβάνουν δυο σταθμούς θέρμανσης. Το φύλλο υπό διαμόρφωση συνήθως θερμαίνεται ομοιόμορφα και από τις δυο πλευρές, με υπέρυθη ακτινοβολία. Οι περισσότερες μηχανές του εμπορίου αυτού του είδους, χρησιμοποιούν σαν ενεργειακές πηγές κεραμικά τούβλα ή πλακάκια, θερμαντικά πιάτα ή ράβδες μετάλλου, πιάτα χαλαζία ή θερμαντήρες αερίου με καταλύτη. Όταν το φύλλο φτάσει στη υπό διαμόρφωση θερμοκρασία, τοποθετείται στην πρέσσα διαμόρφωσης. Ο σταθμός διαμόρφωσης περιέχει μια τουλάχιστον πλάκα στερέωσης με το επιθυμητό καλούπι. Ο σταθμός μπορεί να περιέχει και δεύτερη πλάκα στερέωσης. Για διαμορφώσεις ενός φύλλου, η δεύτερη πλάκα μπορεί να περιέχει ένα κουτί πίεσης, ένα μηχανικό έμβολο και κουτί δημιουργίας κενού, τα οποία πνευματικώς προτεντώνουν το υπό διαμόρφωση φύλλο. Η μήτρα μπορεί να τοποθετηθεί τόσο στην κορυφή όσο και στη βάση της πλάκας στερέωσης. Το πλαίσιο καλουπιών συνήθως περιέχει από ένα μέχρι μερικά καλούπια, τα οποία είναι είτε αρσενικά είτε θηλυκά. Ο μηχανισμός που χρησιμοποιείται για ανύψωση και βύθιση της πλάκας είναι είτε με πείρους ασφαλείας μηχανικώς είτε με οδηγούς αλυσίδας ηλεκτρονικώς. Εάν χρησιμοποιηθεί κουτί πίεσης, τα τμήματα της μήτρας κλειδώνονται ηλεκτρονικώς και οι σακούλες πίεσης διογκώνονται για να εξασφαλίσουν στεγανότητα σε πιέσεις έως και 0,5MPa.

Η θερμομόρφωση με δύο φύλλα χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση κοίλων ή ημικοίλων κομματιών όπως το πλαίσιο της πόρτας. Συνήθως χρησιμοποιούνται μηχανές τεσσάρων σταθμών για τη διαμόρφωση τέτοιων προϊόντων. Το πρώτο φύλλο υπό διαμόρφωση φορτώνεται στο πλαίσιο σφιγκτήρων και περιστρέφεται στο πρώτο φούρνο. Μετά από προκαθορισμένο χρόνο, το δεύτερο φύλλο φορτώνεται στο επόμενο πλαίσιο σφιγκτήρων και περιστρέφεται στον πρώτο φούρνο, ενώ παράλληλα το πρώτο φύλλο περιστρέφεται και εισάγεται στο δεύτερο φούρνο. Όταν το πρώτο φύλλο φτάσει την υπό διαμόρφωση θερμοκρασία, εισάγεται στην σταθμό

διαμόρφωσης και σχηματοποιείται στην μήτρα που είναι στην κορυφή. Όταν αυτό διαμορφωθεί και ψυχθεί, απελευθερώνεται από το πλαίσιο σφιγκτήρων και το δεύτερο φύλλο εισχωρεί στο σταθμό διαμόρφωσης και σχηματοποιείται στην κατώτερη μήτρα. Έπειτα οι πλάκες κλείνουν και κλειδώνουν μηχανικώς μεταξύ τους, με αποτέλεσμα ο αέρας να εγκλωβίζεται ανάμεσα στα φύλλα υπό μεγάλη πίεση. Εξαιτίας αυτών των πιέσεων τα δύο φύλλα σφραγίζονται στα άκρα τους και σε όλες τις ιδιαιτερότητες που σχεδιάζονται μέσα στις μήτρες. Τα φύλλα που έχουν ενωθεί τότε ερμητικά απελευθερώνονται από τους σφιγκτήρες και σχηματοποιούνται στις συσκευές αφαίρεσης περιττών κομματιών. [4],[5]

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι αφαίρεσης του τελικού προϊόντος από το πλαστικό που το περιβάλλει. Φορητές μηχανές κοπής, πριόνια ταινίας και πριόνια κυκλικά συνήθως χρησιμοποιούνται. Φορητά τρυπάνια χρησιμοποιούνται συνήθως για τρύπες και αυλακώσεις. Μηχανές κοπής, οι οποίες ελέγχονται από υπολογιστή, χρησιμοποιούνται για προϊόντα με απόλυτη ακρίβεια στον καθαρισμό τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1. J. L. Throne, Understanding Thermomorfing, Hanser Publishers, Munich 1999.
2. K. H. Hartmann, Kunststoffe,Bild 3, 1998.
3. J. L. Throne, Technology of Thermomorfing, Hanser Publishers, Munich, 1996.
4. K. J. Susnjara, Three Dimensional Trimming & Machining: The Five Axis CNC Router, Thermwood Corp., Dale, Ind., 1999.
5. P.J. Mooney, Understanding the Industrial Thermomorfing Business, Plastics Custom Research Services, Advance, N.C., 2001.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

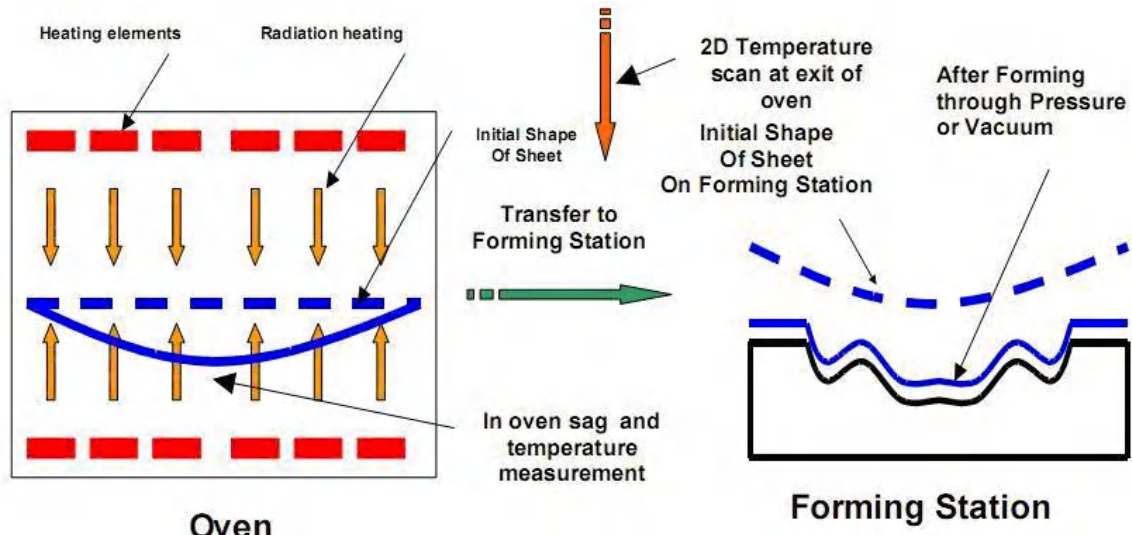
Θερμική Μελέτη **Θερμομόρφωσης**

6.1. Εισαγωγή

Η θερμομόρφωση μεγάλων σε όγκο φύλλων χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή τμημάτων, όπως σε δεξαμενές αερίων διπλού φύλλου, σε σώματα για πλαίσια ή πίνακα οργάνων και σε ανεμοθώρακα μοτοσυκλετών (φέρινγκ). Τα σύνθετα αυτά υλικά απαιτούν ακριβή θερμοκρασιακή κατανομή, ώστε πρώτα να υπάρχει το στάδιο που είναι ρευστά και εν συνεχεία να προχωρήσουμε στη διαμόρφωση. Συγκεκριμένα, το υλικό που χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση των δεξαμενών αερίων, περιλαμβάνει ένα διαχωριστικό στρώμα EVOH (Ethylene – Vinyl Alcohol Copolymer), το οποίο τείνει να παρουσιάσει ρωγμές όταν δεν εφαρμόζονται αυστηρά οι ακριβείς όροι διεργασίας του. Το πρόβλημα έγκειται από το γεγονός ότι ναι μεν η θερμοκρασία είναι απόλυτα ελεγχόμενη στα θερμομαντικά στοιχεία, η κατανομή θερμοκρασίας δε στην επιφάνεια του υπό διαμόρφωση φύλλου είναι η κύρια μεταβλητή της διαδικασίας. Η δυσκολία στον έλεγχο αυτό της θερμοκρασιακής κατανομής είναι που κάνει τη διαδικασία της θερμομόρφωσης αρκετά ευαίσθητη στις διάφορες διαταραχές και αυξάνει σημαντικά τον αριθμό των τμημάτων που είναι προς απόρριψη. Για να επιτύχουμε αύξηση παραγωγής και ποιότητας, η πραγματική κατανομή θερμοκρασίας στο υπό διαμόρφωση φύλλο πρέπει να ακολουθεί πιστά τον βελτιστοποιημένο θερμοκρασιακό χάρτη - πριν την έναρξη της διαμόρφωσης -, όπως αυτός έχει προβλεφθεί από κάποια προσομοίωση της διαδικασίας ή από τα αποτελέσματα κάποιων προηγούμενων πειραμάτων. Το σύστημα το οποίο παρουσιάζεται εδώ ελέγχει το ποσό της ενέργειας που λαμβάνει μια οποιαδήποτε περιοχή του υπό διαμόρφωση φύλλου, η οποία ισοδύναμα αντιστοιχεί σε έλεγχο της συνολικής θερμοκρασιακής κατανομής του φύλλου. Το σύστημα αυτό αναγνωρίζει την περιοχή θερμότητας σε περιοχή του φύλλου, μέσω ενός μετρητή ροής και αντιστοιχεί εν συνεχεία τα αποτελέσματα του μετρητή αυτού με ένα υπέρυθρο θερμόμετρο, το οποίο βρίσκεται στην έξοδο του φούρνου. Το σύστημα ελέγχου χρησιμοποιεί τον χάρτη της θερμοκρασιακής κατανομής στην επιφάνεια του φύλλου, με τον να προσαρμόζει την θερμοκρασία των στοιχείων θέρμανσης. Η αναφορά αυτή έχει πραγματοποιηθεί σε μηχανή Monark δίδυμων φύλλων για θερμομόρφωση, η οποία περιέχει διπλούς 1.8m x 1.8m φούρνους με 504 στοιχεία θέρμανσης σε προδιαταγμένες ζώνες.

Η θερμομόρφωση μεγάλων πλαστικών μερών χρησιμοποιείται σε διαδικασία ευρέως σε ένα μεγάλο αριθμό βιομηχανιών, συμπεριλαμβανομένου βιομηχανίας αυτοκινήτου, αεροναυπηγικής, αεροδιαστημικής καθώς και οικιακών σκευών. Σα διαδικασία είναι απλή και θα την αναλύσουμε σε επόμενο κεφάλαιο, συνοπτικά όμως έχουμε ένα θερμοπλαστικό φύλλο, το οποίο θερμαίνεται σε φούρνο μέχρι να φτάσουμε σε θερμοκρασία σχηματοποίησης. Εν συνεχεία το φύλλο μεταφέρεται στο σταθμό σχηματοποίησης, διαμόρφωσης, στον οποίο πιέζεται στο καλούπι, με χρήση κενού ή πιεσμένου αέρα, για να αποκτήσει την επιθυμητή μορφή. Τέλος, το κομμάτι απομακρύνεται από το καλούπι και οδηγείται στο στάδιο της ψύξης. Θερμαντικά στοιχεία υπάρχουν τόσο στο πάνω όσο και στο κάτω μέρος του φούρνου, παρέχοντας θερμότητα και στις δυο πλευρές του φύλλου. Μια σημαντική παράμετρος του φούρνου είναι η γεωμετρική κατανομή των θερμομαντικών στοιχείων, τα οποία

επηρεάζουν το φύλλο. Η ενέργεια ακτινοβολίας που μεταφέρεται από το κάθε θερμαντικό στοιχείο στην επιφάνεια του φύλλου που του αντιστοιχεί, πρέπει να ρυθμίζεται κατά τη διαδικασία θέρμανσης, καθώς το φύλλο αποκτά «κρεμώδη» χαρακτηριστικά. Η ρύθμιση αυτή γίνεται αλλάζοντας την απόσταση φύλλου – θερμαντικών στοιχείων, όπως δείχνει το παρακάτω σχέδιο.



Σχήμα 6.1: Επιρροή Θερμοκρασίας στη θερμομόρφωση

Κάποιο μέρος της θερμότητας μεταφέρεται με επαγωγή, αν και είναι δύσκολος ο ακριβής ποσοτικός προσδιορισμός αυτού του ποσοστού της θερμότητας, μιας και οι φούρνοι θερμομόρφωσης είναι «ανοιχτές» κατασκευές και υπάρχει συσσώρευση καυτού αέρα σε συγκεκριμένες περιοχές. Κατά συνέπεια, οι συντελεστές της μεταφοράς θερμότητας με επαγωγή σε διαφορετικές περιοχές του υπό διαμόρφωση φύλλου μπορούν να ποικίλλουν αρκετά. Σημαντικό ποσό θέρμανσης μέσα στο φύλλο πραγματοποιείται με επαγωγή από την επιφάνειά του, η οποία θερμαίνεται μέσω ακτινοβολίας από τα θερμαντικά στοιχεία. Εντούτοις, ένα μεγάλο ποσοστό της αύξησης της θερμοκρασίας του φύλλου προέρχεται κατευθείαν από την ενέργεια λόγω ακτινοβολίας, την οποία απορροφά αμέσως το πλαστικό υλικό σε οποιοδήποτε δεδομένο βάθος, σύμφωνα με τον νόμο Lambert – Beer. [1]

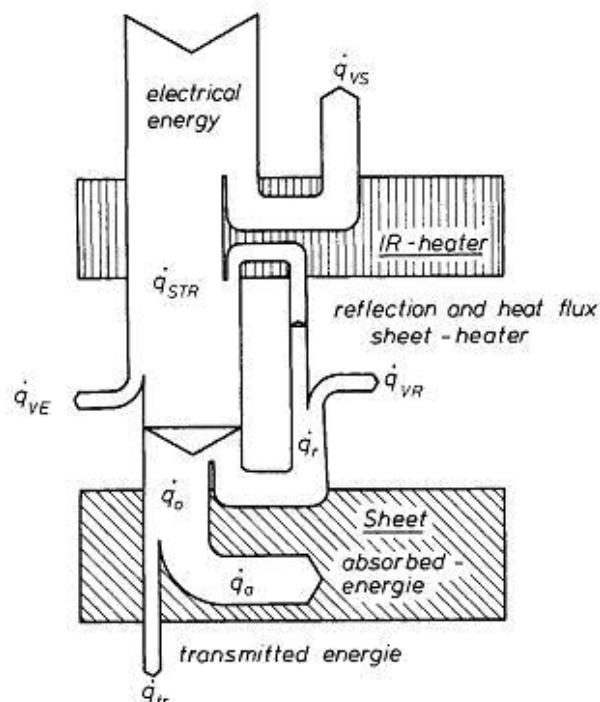
Οι σημερινές αυστηρές απαιτήσεις στην κατασκευή των κομματιών, όσο αφορά την ποιότητα της επιφάνειας, την ακρίβεια του πάχους, της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, του χρόνου παραγωγής και ποιότητας, συμπεριλαμβανομένου της επεξεργασίας και σχεδιασμού καινούριων πολυμερών και πολυστρωματικών φύλλων για διαμόρφωση, έχει οδηγήσει τους ερευνητές να προσπαθούν να βελτιώσουν τον έλεγχο της διαδικασίας. Αν και η θερμομόρφωση είναι εννοιολογικά απλή, η δυναμική του είναι αρκετά σύνθετη και περίπλοκη, μιας και η θέρμανση του φύλλου διαδραματίζεται μέσω ακτινοβολίας, επαγωγής και επαφής. Αυτοί οι μηχανισμοί εισάγουν μια πληθώρα ασταθειών, καθώς και μη γραμμικότητας και παραλλαγών σε εξάρτηση με το χρόνο της μεταφοράς θερμότητας. Επιπλέον, η θέρμανση των υπό διαμόρφωση φύλλων διαδικασία διανεμημένη στο χώρο, η οποία περιγράφεται καλύτερα από τις μερικές διαφορικές εξισώσεις.

Μεγάλο μέρος από την προσπάθεια των ερευνών έχει κατευθυνθεί στη λήψη σωστής ανάλυσης, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, μοντέλων προσομοίωσης της διαδικασίας της θερμομόρφωσης. Εντούτοις, διάφορες αβεβαιότητες της διαδικασίας, όπως οι διαφοροποιήσεις στις ιδιότητες του υλικού από παρτίδα σε παρτίδα είναι αδύνατο να καταμετρηθούν, τα οποία καθιστούν ακόμα και σοφιστικά μοντέλα προσομοίωσης να αδυνατούν να προβλέψουν σωστά τη θερμοκρασία στο φύλλο, το πάχος των τοιχωμάτων και άλλα χαρακτηριστικά των τμημάτων. Παρακάτω παρουσιάζουμε ένα κύκλο στρατηγικής ελέγχου της θερμοκρασίας στο φύλλο, εφαρμόσιμο σε μηχανές θερμομόρφωσης, εξοπλισμένες με ένα υπέρυθρο γραμμικό θερμομέτρο, το οποίο μας επιτρέπει την αποτύπωση ενός προκαθορισμένου χάρτη θερμοκρασίας, μέσω της προσομοίωσης ή πειραματικού μοντέλου διαδικασίας.

6.2. Μεταφοράς Θερμότητας Με Ακτινοβολία

ι) Μεταφορά Θερμότητας με Υπέρυθη Ακτινοβολία

Το σχήμα 6.2 περιγράφει τις διάφορες ενεργειακές ροές που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της ακτινοβολίας σε ημιτελή πλαστομερή. Η ενέργεια που εισάγεται στη διάταξη υπέρυθρης ακτινοβολίας προέρχεται από την παροχή του ηλεκτρικού ρεύματος. Στην πρώτη περίπτωση, υπάρχει κάποια απώλεια στο θερμαντικό στοιχείο, εξαιτίας του συντελεστή απόδοσης του στοιχείου αλλά και της ακτινοβολίας. Στο στάδιο αυτό λοιπόν, το θερμαντικό στοιχείο εκπέμπει μια ροή \dot{q}_{STR} . Πριν η ακτινοβολία φτάσει στην επιφάνεια του ημιτελούς προϊόντος, κάποια θερμότητα \dot{q}_{VE} θα έχει χαθεί κατά τη μεταφορά στον περιβάλλοντα αέρα, μέσα στη μηχανή. Η έκταση της απώλειας αυτής εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ του στοιχείου που εκπέμπει την υπέρυθη ακτινοβολία και της επιφάνειας του τεμαχίου. Η απώλεια αυτή μπορεί να περιοριστεί με τη χρήση ανακλαστικών επικαλύψεων.



Σχήμα 6.2: Διάγραμμα Ενεργειακής Ροής

Τμήμα της ακτινοβολίας q_R που φτάνει στην επιφάνεια του φύλλου ανακλάται πίσω και η υπόλοιπη διαπερνά την επιφάνεια. Η ανακλώμενη ροή θερμότητας πηγαίνει προς την αντίθετη κατεύθυνση, προς το στοιχείο εκπομπής της, και απορροφείται εκ νέου από αυτό, χάνοντας ένα ποσοστό q_{VR} στον περιβάλλοντα αέρα.

Η ποσότητα θερμότητας \dot{Q}_0 η οποία διαπερνάει την επιφάνεια και εισχωρεί στο εσωτερικό του φύλλου, κάποιο ποσοστό q_a απορροφάται και κάποιο άλλο εκπέμπεται \dot{Q}_{tr} . Μόνο το ποσοστό που απορροφήθηκε είναι υπεύθυνο για την αύξηση της θερμοκρασίας του φύλλου.

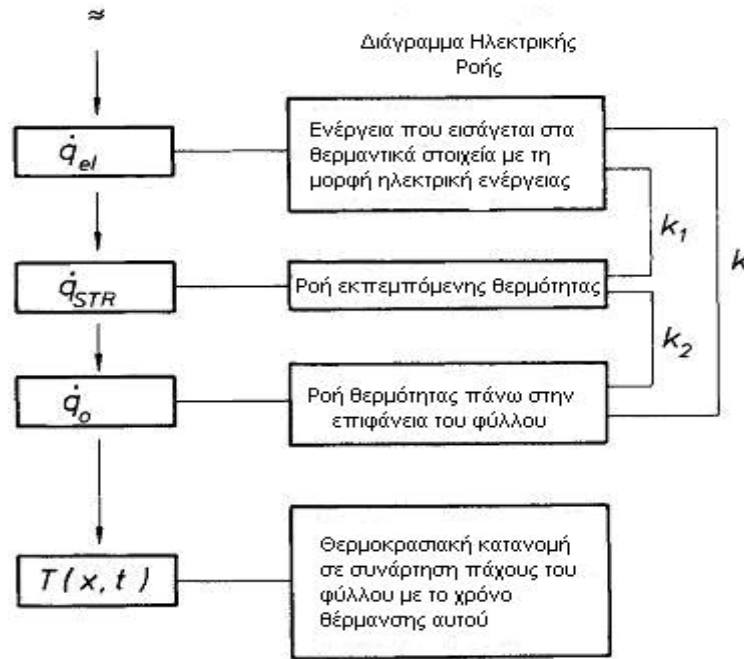
Οι ιδιότητες απορρόφησης των πλαστικών εξαρτώνται αρκετά από το μήκος κύματος. Ο υπολογισμός του σχεδιαγράμματος της θερμοκρασίας, χρησιμοποιώντας φάσμα απορρόφησης απαιτεί σύστημα επεξεργασίας των δεδομένων, και πρέπει να αναφερθεί ότι πρέπει να επιτευχθεί ταυτοποίηση με τις μετρημένες τιμές.

ii) Εκτιμώμενος Υπολογισμός της Θερμότητας με Υπέρυθρη Ακτινοβολία

Η εφαρμογή αυτής της εξαιρετικά ακριβής τεχνικής είναι δύσκολη στην πράξη. Μια μέθοδος όμως έπρεπε να αναπτυχθεί ώστε η διαδικασία της θέρμανσης του φύλλου να μπορεί να υπολογισθεί με τη χρήση απλών εξισώσεων. Για το λόγο αυτό έγιναν αρκετές απλουστεύσεις και υποθέσαμε ιδανικές συνθήκες σε κάποιες εξισώσεις. Κάποιες παραμέτρους όμως δεν μπορούν να απλοποιηθούν και για το λόγο αυτό εκτιμήθηκαν ή λάβαμε υπόψη κάποιο διορθωτικό παράγοντα, προκειμένου να αυξήσουμε την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Η εικόνα 6.3 παρουσιάζει τη δομή της προσέγγισης σε σχεδιάγραμμα. Η ροή θερμότητας \dot{Q}_0 που λαμβάνεται στην επιφάνεια του φύλλου μπορεί να υπολογιστεί από μετρήσεις της θερμοκρασίας των θερμαντικών στοιχείων. Παράλληλες μετρήσεις της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει το θερμαντικό στοιχείο, θα μας δώσει τον διορθωτικό παράγοντα K .

$$K = \frac{\dot{q}_0}{\dot{q}_{el}}$$



Σχήμα 6.3: Προσεγγιστικός Υπολογισμός θερμότητας από ακτινοβολία

Εάν είναι γνωστή η επιφάνεια του θερμαντικού στοιχείου που εκπέμπει την ακτινοβολία και η θερμοκρασία του, τότε η ροή της εκπεμπόμενης θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση των Stefan-Boltzmann, με τον κατάλληλο διορθωτικό παράγοντα, ως εξής

$$K_2 = \frac{\dot{q}_0}{\dot{q}_{STR}}$$

Αυτοί οι διορθωτικοί παράγοντες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εκφράσουν την απόδοση των μεμονωμένων σταδίων της θέρμανσης. Εάν είναι γνωστό πως κυμαίνονται οι παράγοντες αυτοί, ανάλογα τη διαφορετική ρύθμιση στην εκάστοτε μορφοποίηση, οι θερμοκρασίες της ακτινοβολίας, οι ιδιότητες των μορφοποιημένων υλικών και η φύση των χρωμάτων, τότε είναι δυνατό να υπολογίσουμε τη θερμότητα όλης της διαδικασίας.

iii) Βασικές Αρχές

Σε αντίθεση με ότι συμβαίνει κατά τη μεταφορά θερμότητας με επαφή, η θερμοκρασία επιφάνειας του φύλλου είναι μια συνάρτηση του χρόνου θέρμανσης. Αυτό φαίνεται από την παρακάτω εξίσωση της σταθερής θερμότητας q που παρέχεται

$$q = -\lambda \frac{d_T}{d_t}$$

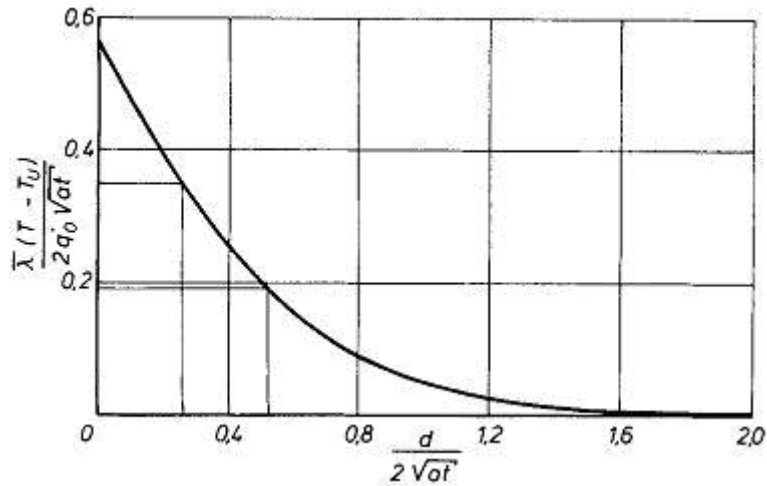
Σύμφωνα με τους Carslaw-Jaeger, η παραπάνω εξίσωση μας δίνει την εξής διαφορική εξίσωσης της αρχικής κατάστασης

$$\alpha \frac{\partial^2 \dot{q}}{\partial x^2} = \frac{\partial \dot{q}}{\partial T}$$

Η εξίσωση που μας δίνει τη θερμοκρασία που αποκτήθηκε σε μονή επιφάνεια μέσω υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι

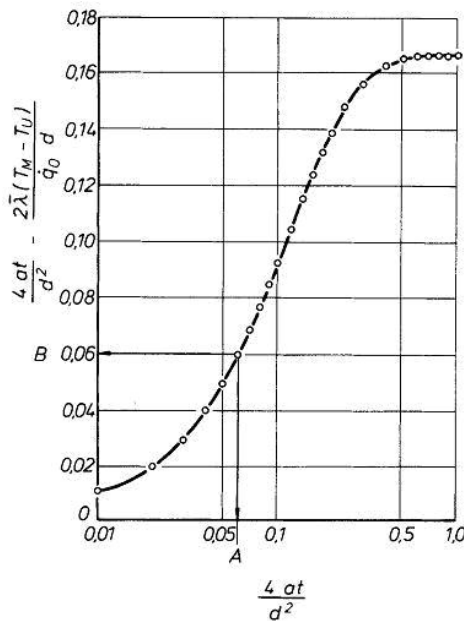
$$T - T_u = \frac{2\dot{q}_o - \sqrt{at}}{\lambda} ierF_c \frac{x}{2\sqrt{at}} \quad (a)$$

Η συνάρτηση $ierF_c$ (integral error function complement) δεν μπορεί να λυθεί αναλυτικά. Η τιμή της βρίσκεται μέσα από πίνακες ή σχεδιαγράμματα. Η χαρακτηριστική καμπύλη της εξίσωσης (a) δίνεται στην εικόνα 6.4

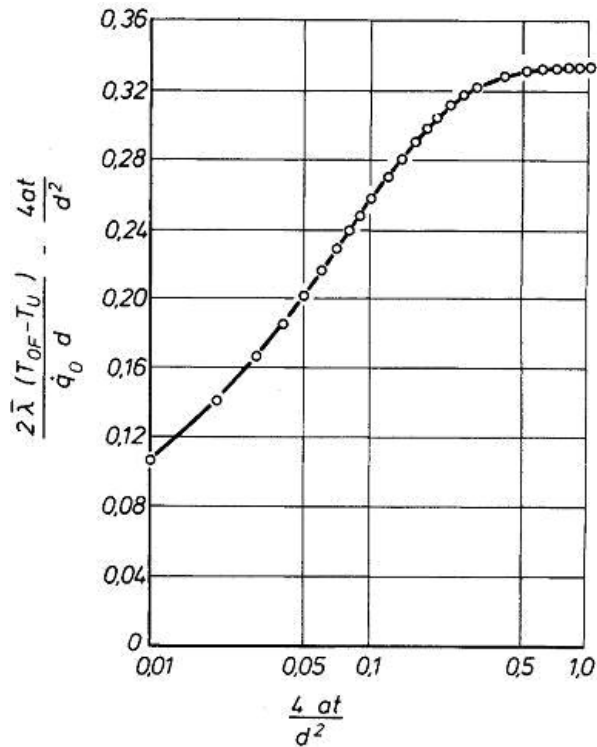


Σχήμα 6.4: Χαρακτηριστική καμπύλη εξίσωσης (a)

Τα σχήματα των εικόνων 6.5 και 6.6 παρουσιάζουν το γράφημα της εξισ. (a) στο κέντρο και στην επιφάνεια του φύλλου αντίστοιχα.



Σχήμα 6.5: Γραφική παράσταση εξίσωσης (a) στο κέντρο του φύλλου

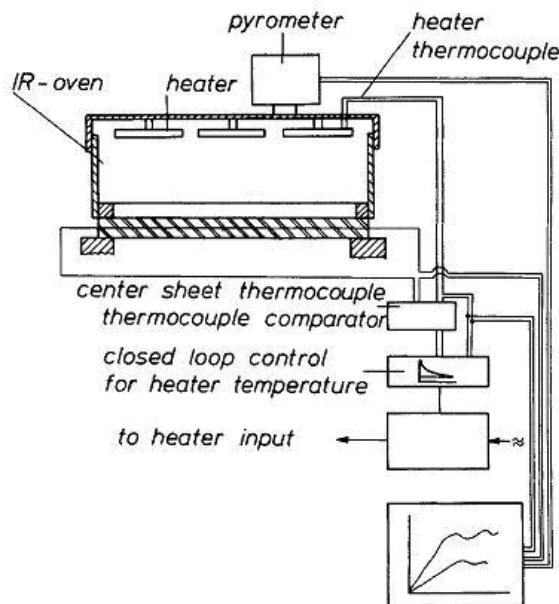


Σχήμα 6.6: Γραφική παράσταση εξίσωσης (a) στην επιφάνεια του φύλλου

iv) Προσδιορισμός του Διορθωτικού Παράγοντα K

Χρησιμοποιώντας το παράδειγμα της απλής ακτινοβολίας σε μονόπλευρη επιφάνεια, παρουσιάζεται μια μέθοδο, η οποία υπολογίζει το διορθωτικό παράγοντα K.

Η θερμοκρασία έχει μετρηθεί με την μέθοδο που έχει αναπτύξει ο Kochhahn [4], σύμφωνα με την οποία το θερμοηλεκτρικό ζεύγος είναι τοποθετημένο κάθετα στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.7.

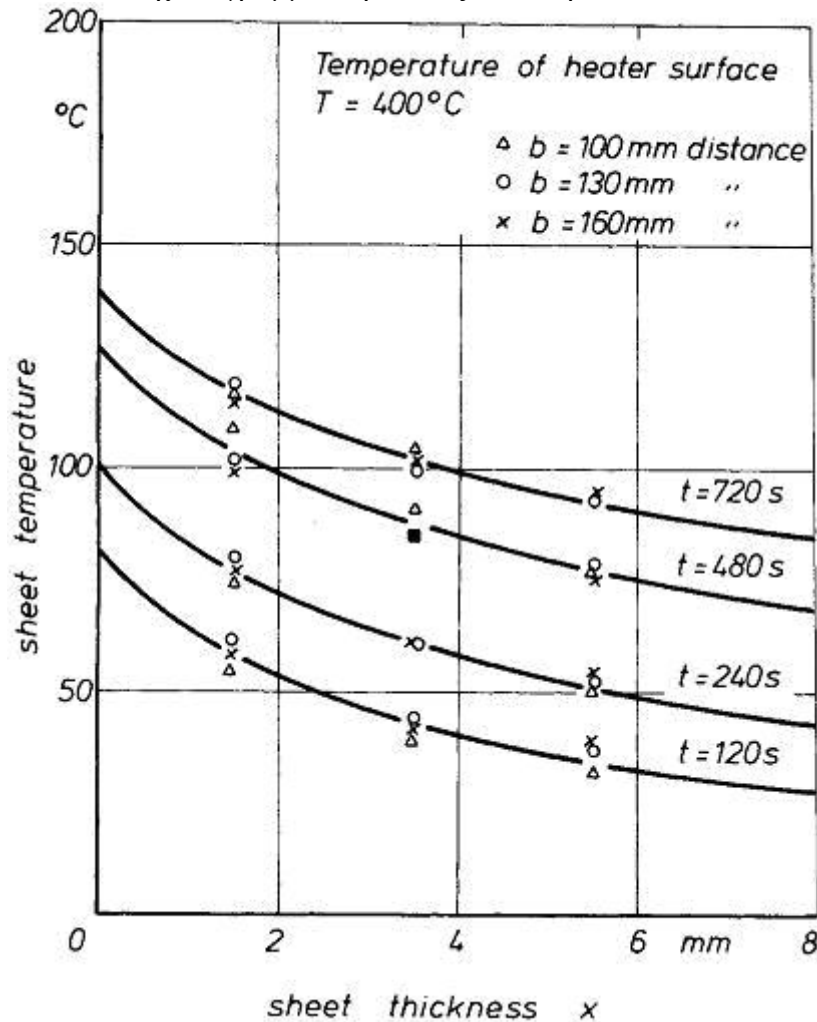


Σχήμα 6.7: Συσκευή μέτρησης θερμοκρασίας

Κατά τη διάρκεια του πειράματος πρέπει να προσδιοριστούν οι παρακάτω παράμετροι:

- Η θερμοκρασία της επιφάνειας του φύλλου T_o
- Η αρχική θερμοκρασία του φύλλου T_u
- Η θερμοκρασία της κάτω επιφάνειας του φύλλου T_{us}
- Τη θερμοκρασία στο κέντρο του φύλλου T_m , σε περίπτωση θέρμανσης και των 2 πλευρών του φύλλου
- Η θερμοκρασία του θερμαντικού στοιχείου
- Η ενέργεια εισόδου του θερμαντικού στοιχείου

Καταγράφονται λοιπόν τα διάφορα σχεδιαγράμματα της θερμοκρασίας τόσο της πάνω επιφάνειας του υπό διαμόρφωση φύλλου (πλευρά που ακτινοβολείται) όσο και της κάτω επιφάνειας (ή του κέντρου του φύλλου στην περίπτωση που έχουμε θερμαντικά στοιχεία που εκπέμπουν θερμότητα και προς τις 2 επιφάνειες του φύλλου). Ένα τέτοιο σχεδιάγραμμα παρουσιάζεται στην εικόνα 6.8.



Σχήμα 6.8: Επίδραση της απόστασης θερμαντικών στοιχείων στην κατανομή της θερμοκρασίας και του πάχους του φύλλου

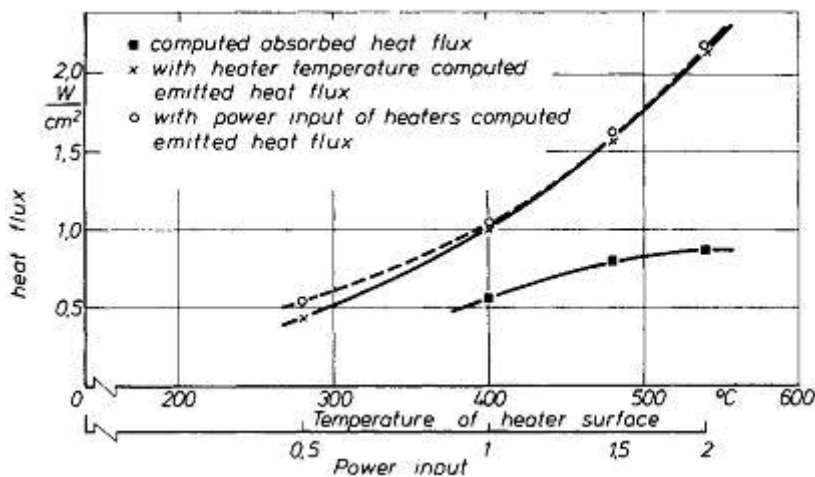
Από την χαρακτηριστική καμπύλη της εξίσωσης (a), έχουμε την παρακάτω εξίσωση για την πλευρά που ακτινοβολείται, με $d=0$

$$\frac{\bar{\lambda}(T - T_u)}{2q_0at} = 0.564$$

Τροποποιώντας την εξίσωση και εισάγοντας τον παράγοντα της θερμοκρασίας της επιφάνειας T_0 , η οποία μετριέται, με το πέρας ενός συγκεκριμένου χρόνου θέρμανσης t_E , παίρνουμε την ακόλουθη εξίσωση

$$q_0 = \frac{\bar{\lambda}(T_0 - T_u)}{1.13\sqrt{at_E}}$$

Στην εικόνα 6.9 συγκρίνουμε τη ροή θερμότητας από μετρήσεις σε χρωματιστά υλικά με τη ροή θερμότητας υπολογισμένη από τη θερμοκρασία των θερμαντικών στοιχείων σύμφωνα με την εξίσωση των Stefan-Boltzmann (\dot{q}_{STR}) ή με την καταγεγραμμένη ηλεκτρική ενέργεια στο θερμαντικό στοιχείο ανά τετραγωνική περιοχή (\dot{q}_{el}).



Σχήμα 6.9: Ροή θερμότητας

Μπορούμε να καταλάβουμε ότι η απόσταση μεταξύ των ροών θερμότητας αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας των θερμαντικών στοιχείων. Η αιτία του φαινομένου αυτού είναι οι πρόσθετες απώλειες θερμότητας \dot{q}_{VS} και \dot{q}_{VE} , όπως φαίνεται από το πρώτο σχήμα του κεφαλαίου αυτού.

ν) Σταθερές Υλικών

Για να εφαρμοστούν τώρα οι υπολογισμοί αυτοί, η θερμική αγωγιμότητα του υλικού πρέπει να είναι γνωστή. Οι αποτελεσματικές σταθερές του υλικού, όπως εισάχθηκαν από τον Wübken [6], έχουν υποδειχθεί καταλληλότερες για αυτό το σκοπό. Αυτές είναι οι μέσες σταθερές υλικού, ανεξάρτητες από τη θερμοκρασία, οι οποίες μεταβάλλονται το ίδιο ανεξάρτητα της θερμοκρασίας του φούρνου, στην ίδια περίοδο χρόνου, όπως προκύπτουν από υπολογισμό με τιμές οι οποίες εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Οι σταθερές αυτές συνοψίζονται στον πίνακα της εικόνας 6.10 για τα βασικά υλικά.

Material Constants		
	Eff. thermal diffusivity	Med. thermal conductivity
Material	$a_{\text{eff}} \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right]$	$\lambda \left[\frac{\text{w}}{\text{cm grd}} \right]$
PC	10.82×10^{-4}	0.165×10^{-2}
ABS	8.47×10^{-4}	—
SAN	8.47×10^{-4}	—
PS	7.53×10^{-4}	0.165
PVC	7.00×10^{-4}	0.165
PMMA	6.82×10^{-4}	0.200
HDPE	$4.7-5.6 \times 10^{-4}$	0.36
LDPE	7.5×10^{-4}	0.28
PP	6.00×10^{-4}	0.19

Σχήμα 6.10: Πίνακας σταθερών

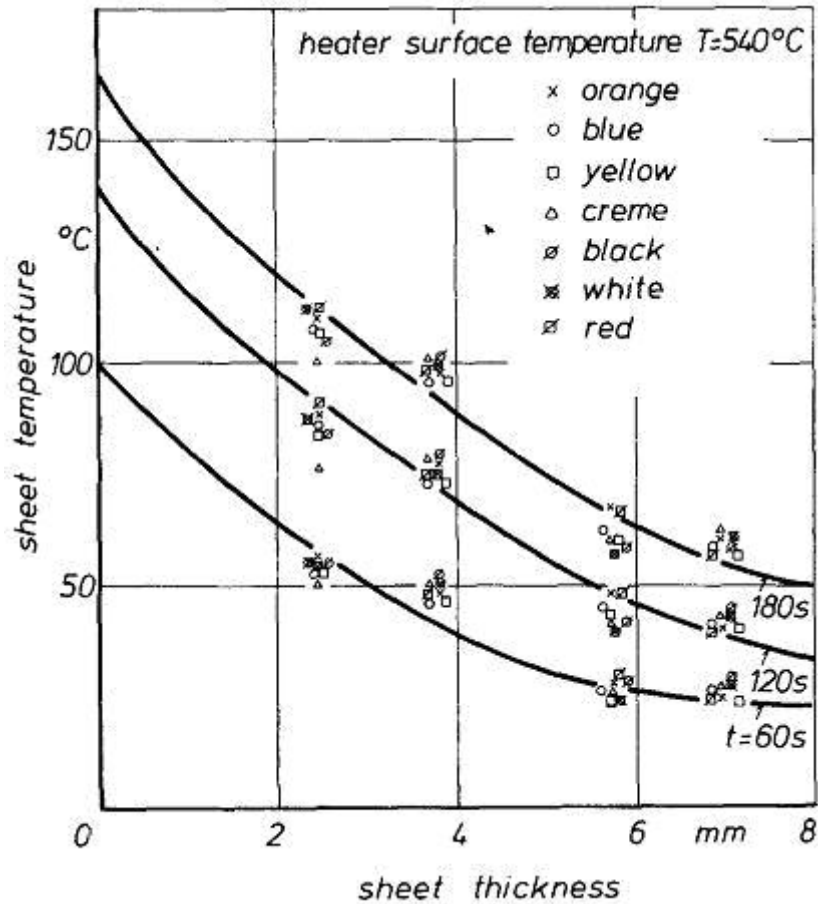
vi) Ρυθμιστικοί Παράμετροι

➤ **Απόσταση Θερμαντικών Στοιχείων από την επιφάνεια**

Όπως είδαμε στο σχεδιάγραμμα της εικόνας 6.9, διαφοροποιήσεις στην απόσταση θερμαντήρων από την επιφάνεια του φύλλου, δεν επιφέρουν ουσιαστική αλλαγή στην θερμοκρασιακή κατανομή στην επιφάνεια του υπό διαμόρφωση φύλλου.

➤ **Χρώμα του Υπό Διαμόρφωση Φύλλου**

Όπως φαίνεται στο σχεδιάγραμμα της εικόνας 6.11, ο χρωματισμός δεν έχει κάποια σημαντική επίδραση στη διανομή της θερμοκρασίας. Το πορτοκαλί και το μπλε παρουσιάζουν μια διαφανή συμπεριφορά και τα υπόλοιπα χρώματα μια αδιαφανή. Ο Craig [7] παρατήρησε μια παρόμοια επίδραση, κατά την εξέταση μιας διαδικασίας θέρμανσης σε HDPE, κατά την οποία καμία διαφορά δεν εντοπίστηκε μεταξύ φυσικών, σε χρώμα, υλικών με αντίστοιχα τεχνητού χρωματισμού.

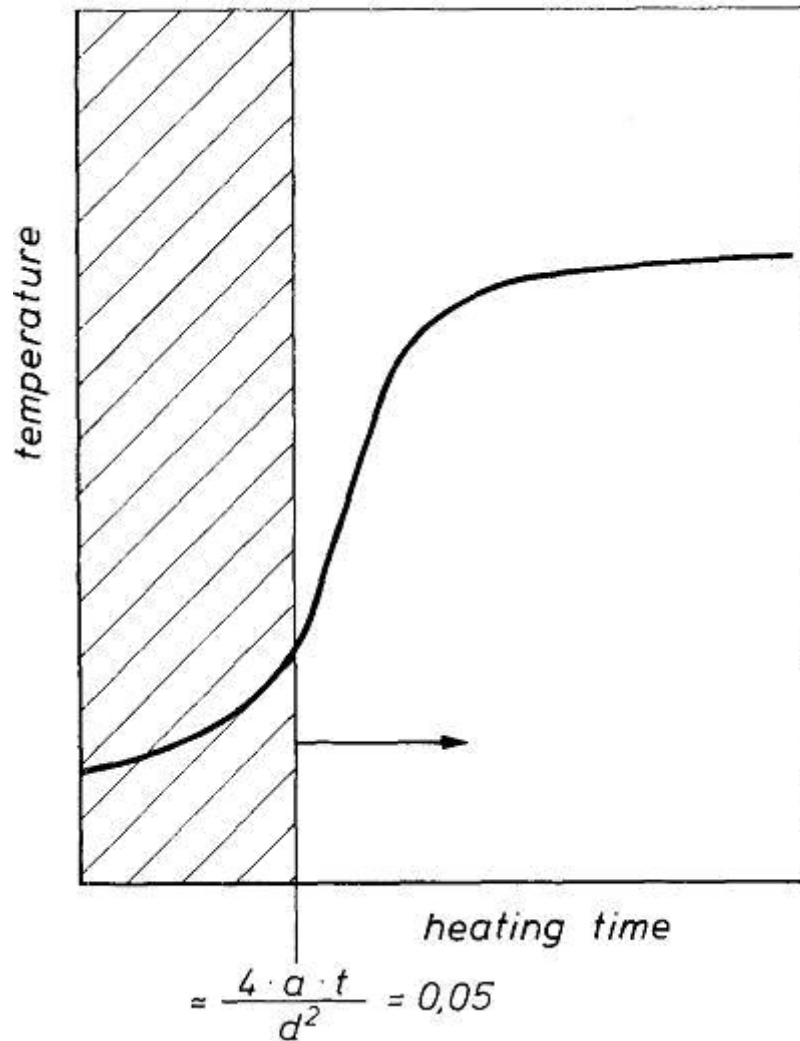


Σχήμα 6.11: Θερμοκρασιακή κατανομή χρωματισμένου φύλλου PMMA

vii) Περιορισμοί

Όλοι οι υπολογισμοί έχουν βασισθεί σε προσεγγίσεις πραγματικών τεχνολογικών συστημάτων, στα οποία έχουν συμπεριληφθεί όλες οι απαραίτητες απλοποιήσεις, τα οποία βεβαίως μειώνουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Στη διαδικασία που παρουσιάζεται στο τελευταίο τμήμα αυτού του κεφαλαίου, υπάρχει ένας περιορισμός, ο οποίος επιδρά σε τέτοιο βαθμό ώστε η αρχική διαδικασία δεν μπορεί να συμπεριληφθεί στην προσεγγιστική μέθοδο, όπως αποτυπώνεται στο σχήμα της εικόνας 6.12. Για πολύ σύντομες χρονικές στιγμές θέρμανσης και για αρκετά παχύ φύλλα, τα αποτελέσματα είναι ανακριβή. Για θέρμανση δύο επιφανειών η διαδικασία δίνει ακριβή αποτελέσματα για παράγοντα $4at/d^2 > 0.05$



Σχήμα 6.12: Περιοριστικός παράγοντας για θέρμανση δύο επιφανειών

viii) Διαδικασία Ψύξης

Είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία ότι στη μέθοδο της εξώθησης και της έγχυσης, η διαδικασία ψύξης έχει μια αποφασιστική επιρροή στη δομή και στις ιδιότητες του τελικού τεμαχίου. Για τη διαδικασία της θερμομόρφωσης ελάχιστα πράγματα βρίσκονται όσο αφορά τη σχέση μεταξύ των παραμέτρων που εμπλέκονται στη διαδικασία και των κριτηρίων ποιότητας. Στη μορφοποίηση σε κενό χώρο (ή με πίεση) επιτυγχάνεται ένα ασύμμετρο σχεδιάγραμμα θερμοκρασίας, εξαιτίας της ψύξης που επιτυγχάνεται κατά τη επαφή του φύλλου με άλλες επιφάνειες κατά την απομάκρυνση από το καλούπι. Για το λόγο αυτό εκτενή πειράματα πραγματοποιούνται για να εκτιμηθεί η σημασία της ψύξης.

Η εξέταση των μεθόδων ψύξης και της δυναμικής συμπεριφοράς των διάφορων τμημάτων της εργαλειομηχανής – στα οποία έρχεται σε επαφή το φύλλο – παρέχουν στον σχεδιαστή σημαντική καθοδήγηση.

Κατά τη διάρκεια κάποιων ερευνών, έγινε μια προσπάθεια να τροποποιηθεί ο αναλογικός προσομοιωτής θερμομόρφωσης, ο οποίος αναπτύχθηκε για μορφοποίηση μέσω έγχυσης. Έτσι έγινε αποφυγή δαπανηρών και χρονοβόρων πειραμάτων και δοκιμών στην εργαλειομηχανή.

ix) Έρευνα Δυναμικής Συμπεριφοράς Εργαλείων

Χρησιμοποιώντας μια μηχανή θερμομόρφωσης, έγιναν συγκρίσεις μεταξύ δύο εργαλείων απομάκρυνσης του φύλλου από το καλούπι, τα οποία εν συνεχεία ψύχουν το φύλλο. Η μέγιστη θερμοκρασία των εργαλείων αυτών μετά από 20 κύκλους παραγωγής, με διάρκεια κάθε κύκλου τα 50sec, παρουσιάζεται στην εικόνα 6.13

<u>Tool material</u>	<u>Cooling method</u>	<u>Maximum temperature</u>
Steel	Water 20°C	26°C
Steel	—	47°C
Epoxy resin	Water 20°C	42°C
Epoxy resin	—	71°C

Σχήμα 6.13: Επίδραση διαφορετικού εργαλείου απομάκρυνσης στη μέγιστη θερμοκρασία του φύλλου

x) Προσομοίωση των Μεταβλητών Θερμοκρασίας – Χρόνου

Προκειμένου να είμαστε σε θέση να προσομοιώσουμε τις διαδικασίες ψύξης, κάνουμε χρήση της ομοιότητας των ηλεκτρικών και μηχανικών διαδικασιών. Η αντιστοιχία της προσομοίωσης είναι η εξής [8]

<u>Παράμετροι Θερμότητας</u>	<u>Ηλεκτρικοί Παράμετροι</u>
Θερμοκρασία	Ηλεκτρική Τάση
Ροή Θερμότητας	Ηλεκτρικό Ρεύμα
Χωρητικότητα Ροής	Ηλεκτρικός Πυκνωτής
Αντίσταση Θερμικής Αγωγιμότητας	Αντίσταση Ohm

Οι παρακάτω παραδοχές έχουν ληφθεί [9]

- Λαμβάνονται υπόψη μόνο οι ροές θερμότητας προς την κυρίως κατεύθυνση (μονοδιάστατο πρόβλημα)
- Η επιφάνεια των καναλιών ψύξης θεωρούνται αέριο σύνολο. Για το λόγο αυτό μόνο η μέση απόσταση από τα κανάλια ψύξης μέχρι την επιφάνεια του φύλλου χρησιμοποιείται και όχι ολόκληρη η κατανομή τους

- Αντί των πραγματικών σταθερών του υλικού, οι οποίες είναι ανάλογες της θερμοκρασίας, κάνουμε χρήση των «αποτελεσματικών σταθερών» (effective constants)
- Πριν ξεκινήσει το στάδιο ψύξης, το θερμαινόμενο φύλλο έχει μια μέση θερμοκρασία T_m , η οποία επιτυγχάνεται στην πραγματική παραγωγή των μηχανών θερμομόρφωσης.

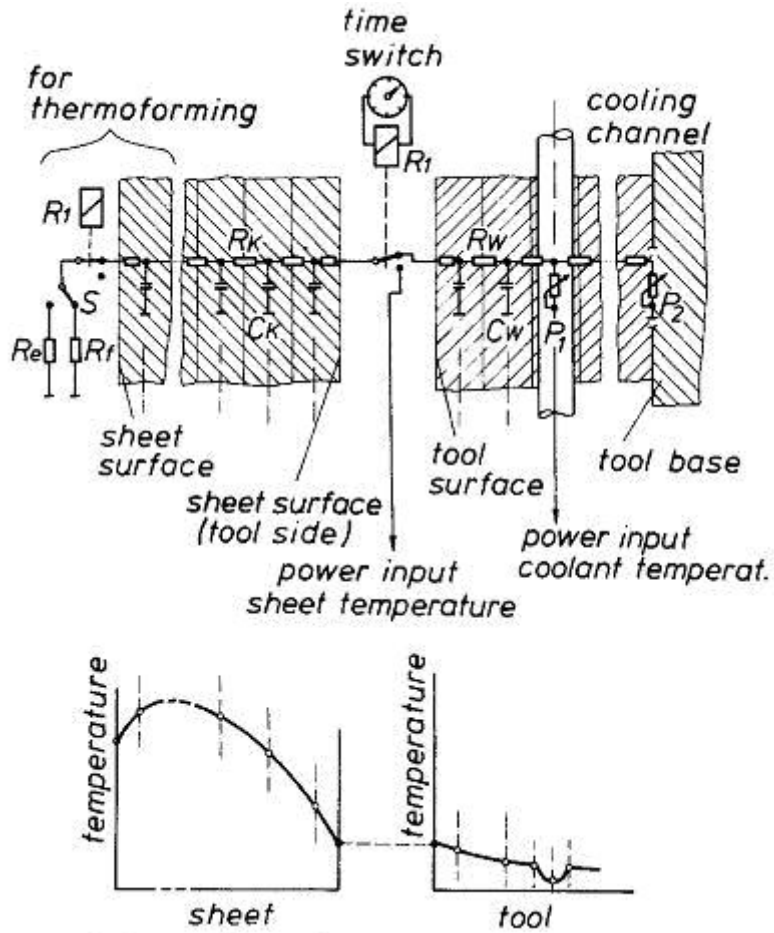
Με αυτές τις παραδοχές, οι διαφορικές εξισώσεις (χωρίς έννοια διαστάσεων) των θερμικών και ηλεκτρικών μεταβλητών έχουν μετατραπεί στις

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} = 0 \text{ θερμική εξίσωση}$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0 \text{ ηλεκτρική εξίσωση}$$

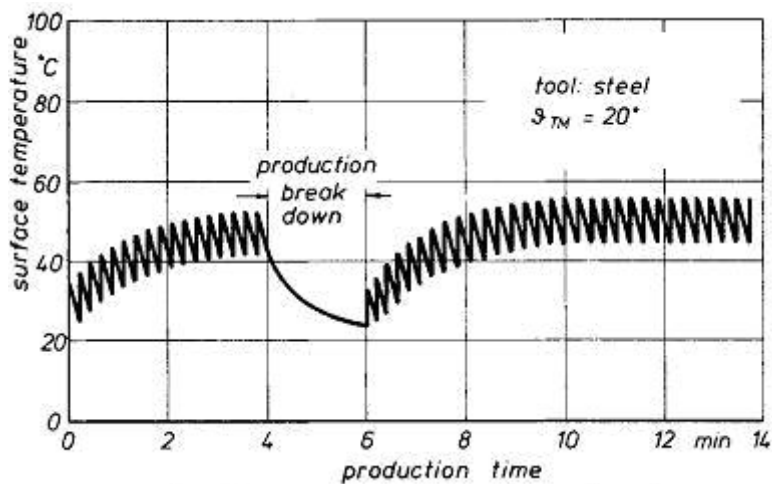
Μιας και υπάρχει αντιστοιχία των 2 εξισώσεων (χωρίς μεταβλητή διάστασης), τότε καταλαβαίνουμε ότι το ηλεκτρικό δυναμικό πεδίο και το θερμοκρασιακό πεδίο είναι ίσα όταν οι αντίστοιχες διαφορικές εξισώσεις είναι ίσες. Αυτό σημαίνει ότι η εξίσωση που περιγράφει τη θερμοκρασία μπορεί να προσομοιωθεί από την αντίστοιχη εξίσωση που προκύπτει μέσω των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Στην εικόνα 6.14 παρουσιάζεται ένα απλό σχεδιάγραμμα του ηλεκτρικού κυκλώματος μέσα στον προσομοιωτή, ο οποίος σε αυτήν την περίπτωση έχει τροποποιηθεί για τη διαδικασία της θερμομόρφωσης. Το εσωτερικού του φύλλου αλλά και του μηχανισμού απομάκρυνσης και ψύξης του φύλλου από το καλούπι, έχουν χωρισθεί σε στρώματα. Η αντίσταση θερμικής αγωγιμότητας και η θερμική χωρητικότητα κάθε στρώματος αντιπροσωπεύονται με ένα συνδυασμό αντίστασης-πυκνωτή (R_k, C_k ή R_w, C_w , του φύλλου και του μηχανισμού αντίστοιχα).



Σχήμα 6.14: Σχεδιάγραμμα ηλεκτρικού κυκλώματος προσομοίωσης

Τέλος, η εικόνα 6.15 παρουσιάζει τη συμπεριφορά του μηχανισμού, από την έναρξη της διαδικασίας, αν κάνει κάποια παύση στην παραγωγή.



Σχήμα 6.15: Κατανομή θερμοκρασίας κατά τη προσομοίωση

Συνειδητοποιούμε λοιπόν ότι η μέθοδος της προσομοίωσης είναι πλέον κατάλληλη για μελλοντικά πειράματα και προετοιμασία κάποιες παραγωγής, εξαιτίας της εξοικονόμησης υλικού και μείωσης χρονικών περιορισμών. Μέσω της μηχανής προσομοίωσης μπορούμε να εκτελέσουμε μια σειρά από ανεξάρτητων ερευνών, όπως

- Προσδιορισμός χρόνου ψύξης για τεμάχια θερμομόρφωσης
- Προσδιορισμός θερμοκρασίας της πλευρικής επιφάνειας του μηχανισμού απομάκρυνσης, κατά την εκκίνηση της παραγωγής ή σε μια κατάσταση παύσης
- Προσδιορισμός της επιρροής της απόστασης των καναλιών ψύξης, της επιφάνειας των καναλιών ψύξης, διάρκειας κύκλου, πάχος του υπό διαμόρφωση φύλλου και άλλων μεταβλητών που επηρεάζουν τη θερμομόρφωση
- Επίδραση των διακοπών του κύκλου παραγωγής σε θερμοκρασιακές συνθήκες
- Μετατροπή σε υπολογιστικό κώδικα των συσκευών ελέγχων

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 6^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- 1.** J. Frados, ed., *Plastics Engineering Handbook*, 4th Edition, Van Nostrand Reinhold, New York, 1976.
- 2.** F. Kreith, *Principles of Heat Transfer*, 2nd Edition, International Textbook, Co., Scranton, 1965.
- 3.** D.G. Keith and A. E. Flecknoe – Brown, *Mod. Plast.*, 1979.
- 4.** G. Kochhahn, Diploma-thesis at the IKV, no D 7354/.
- 5.** W. Predöhl, *Kunststoffe*, 1971.
- 6.** G. Wübken, “Thermisches Verhalten und thermische Auslegung von Spritzgießwerkzeugen” *Technischwissenschaftlicher Bericht des IKV, DS 76/09*, Aachen, Germany.
- 7.** R.F. Craig, “Thermomorfing HDPE in Basic Principles of Thermomorfing” Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1973.
- 8.** G. Wübken, *Thermolog, Bedienungshandbuch*.
- 9.** H.S. Carslaw and I.C. Jaeger “Conduction of Heat in Solids” 2nd Ed. Clarendon Press, 1973.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Μοντέλα Ανάλυσης με Πεπερασμένα Στοιχεία για Θερμομόρφωση

7.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε σε κάποιες εργαστηριακές εφαρμογές που έχουν γίνει για να διαπιστωθεί κατά πόσο τα αριθμητικά αποτελέσματα (με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων) συμβαδίζουν με τις πειραματικές μετρήσεις.

Μέχρι και πριν από λίγα χρόνια, η βιομηχανία της θερμομόρφωσης στηριζόταν στην τεχνική της δοκιμής και διόρθωσης σφαλμάτων, όσο αφορά το σχεδιασμό και την ανάπτυξη καινούριων προϊόντων, που είχε ως αποτέλεσμα τη σπατάλη χρόνου και χρημάτων. Η ανάλυση μέσω πεπερασμένων στοιχείων θεωρείται ένα καλό εργαλείο για το σχεδιασμό και τη μορφοποίηση του πλαστικού. Ωστόσο για να έχουμε ρεαλιστική προσομοίωση της διαδικασίας είναι σημαντικό να γνωρίζουμε με μεγάλη ακρίβεια τις μηχανικές ιδιότητες του υπό διαμόρφωση πλαστικού. Τα τελευταία χρόνια, όλο και περισσότεροι ερευνητές έχουν εστιάσει στην αριθμητική προσομοίωση της θερμομόρφωσης, όπως ο Stephenson [1] που εισηγήθηκε μια μηχανική απόδοση και μια πειραματική ανάλυση ενός βουταδιενίου-στυρενίου συμπολυμερούς με πολυστυρένιο, ο Erchiqui [2], ο οποίος ερεύνησε μια δυναμική διαδικασία πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας τη θεωρία μεμβρανών και μετασχηματισμό Λανγκράντς, κατορθώνοντας να μοντελοποιήσει τη θερμομόρφωση ενός ABS φύλλου.

7.2. Υπερελαστικό Μοντέλο Mooney – Rivlin

Στο παρόν κεφάλαιο η ανάλυση που θα αναφερθεί έχει επηρεαστεί από τη θεωρία των υπερελαστικών (Ogden και Mooney-Rivlin) και βισκοελαστικών (Lodge και Christensen) μοντέλων, πάνω στην κατανομή πάχους και τάσεων στο υπό διαμόρφωση φύλλο. Χρησιμοποιείται ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο προσομοιώνει τη διαδικασία της θερμομόρφωσης ενός φύλλου ABS, σύμφωνα με τη θεωρία σχηματισμού μεμβρανών[3]. Η μηχανική συμπεριφορά του υπό διαμόρφωση υλικού ακολουθεί τους νόμους του υπερελαστικού μοντέλου, σύμφωνα με τις δυο παράμετρους του μοντέλου Mooney – Rivlin. Το συγκεκριμένο μοντέλο μας επιτρέπει να αξιολογήσουμε εκείνα τα σημεία του υλικού που παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες σε τάση, παραμορφωση, δημιουργίας «λαιμού» καθώς και στην κατάσταση επαφής μεταξύ του υπό διαμόρφωση υλικού και της μήτρας.

a) Μαθηματική Διατύπωση

Θερμοπλαστικά υλικά, τα οποία ζεσταίνονται αρκετά πάνω από την θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης, θεωρούνται υλικά παρόμοιας συμπεριφοράς με των ελαστικών, τα οποία χαρακτηρίζονται από μη-γραμμική, μη-συμπιεστή, βισκοελαστική συμπεριφορά. Κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσης, εξαιτίας της εφαρμογής πίεσης ή κενού, το θερμοπλαστικό φύλλο συχνά μοντελοποιείται σαν βισκοελαστικό ή υπερελαστικό υλικό[4]. Στη παρούσα ανάλυση υποθέτουμε την υπερελαστική συμπεριφορά. Η υπερελαστική συμπεριφορά αναφέρεται στα υλικά εκείνα τα οποία

παρουσιάζουν μεγάλη ελαστική παραμόρφωση, με αμελητέα μεταβολή όγκου (ασυμπίεστο). Η ουσιώδη συμπεριφορά των υλικών αυτών προέρχεται από τις ενεργειακές του δυνατότητες για παραμόρφωση.

Ένα υλικό θεωρείται υπερελαστικό εάν υπάρχει μια δυναμική συνάρτηση ελαστικότητας W (ή ενεργειακή συνάρτηση βάση της πυκνότητας παραμόρφωσης), η οποία είναι βαθμωτό μέγεθος ενός τελεστή παραμόρφωσης, του οποίου το παράγωγο προσδιορίζει την αντίστοιχη τάση. Αυτό μπορεί να εκφραστεί σαν

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} = 2 \frac{\partial W}{\partial C_{ij}} \quad (1)$$

όπου S_{ij} είναι οι συνιστώσες του δεύτερου τελεστή τάσης των Piola – Kirchhoff, W είναι η ενεργειακή συνάρτηση παραμόρφωσης ανά μονάδα απαραμόρφωτου όγκου, E_{ij} είναι οι συνιστώσες του λανγκρασιανού τελεστή παραμόρφωσης και C_{ij} οι συνιστώσες του τελεστή παραμόρφωσης των Cauchy – Green. Ο λανγκρασιανός τελεστής παραμόρφωσης μπορεί να εκφραστεί σαν

$$C_{ij} = \frac{1}{2} (\delta_{ij} + F_{ij}^2) \quad (2)$$

όπου δ_{ij} είναι το δέλτα Kronecker ($\delta_{ij} = 1, i=j; \delta_{ij}=0, i \neq j$) και ο τελεστής παραμόρφωσης C_{ij} εμπεριέχει τα βαθμωτά ανύσματα παραμόρφωσης

$$I_1 = \text{tr} C_{ij} \quad (3)$$

όπου F_{ij} είναι οι συνιστώσες του δεύτερου τελεστή τάσης των Piola – Kirchhoff, X_i είναι η απαραμόρφωτη θέση ενός σημείου κατά τη διεύθυνση i , $x_i = X_i + u_i$, είναι η παραμορφωμένη θέση ενός σημείου κατά τη διεύθυνση i και u_i είναι το εκτόπισμα του σημείου κατά τη διεύθυνση i . Οι ιδιοτιμές του C_{ij} είναι λ_1^2 , λ_2^2 και λ_3^2 και υπάρχουν μόνο αν

$$\det C_{ij} - I_1 \det C_{ij} + I_2 \det C_{ij} - I_3 \det C_{ij} = 0 \quad (4)$$

το οποίο μπορεί να εκφραστεί και σαν

$$-I_1^3 + 3I_1 I_2 - 2I_3 = 0 \quad (5)$$

όπου I_1, I_2 και I_3 είναι οι σταθερές του C_{ij}

$$\begin{aligned} I_1 &= \text{tr} C_{ij} \\ I_2 &= \frac{1}{2} (\text{tr} C_{ij})^2 - \text{tr} (C_{ij}^2) \\ I_3 &= \det C_{ij} \end{aligned} \quad (6)$$

όπου J είναι η αναλογία του παραμορφωμένου ελαστικού όγκου σε σχέση με τον απαραμόρφωτο όγκο του υλικού. Σύμφωνα με τις 2 παραμέτρους της θεωρίας των Mooney-Rivlin για τα ισοτροπικά υλικά, η ενέργεια μπορεί να περιγραφεί σαν

συνάρτηση των 3 σταθερών Cauchy της παραμόρφωσης σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο

$$= (- 3) + (- 3) + (1/)(- 1) \quad (7)$$

Ο τύπος της πιθανής ενέργειας παραμόρφωσης που αφορά το μοντέλο των Mooney-Rivlin με 3 παραμέτρους είναι ο κάτωθι

$$= (- 3) + (- 3) + (- 3)(- 3) + (1/)(- 1) \quad (8)$$

Ενώ οι αντίστοιχοι τύποι που αφορά το μοντέλο 5 παραμέτρων και το μοντέλο 9 παραμέτρων είναι αντίστοιχα οι

$$= (- 3) + (- 3) + (- 3) + (- 3)(- 3) + (- 3) + (1/)(- 1) \quad (9)$$

$$= (- 3) + (- 3) + (- 3) + (- 3)(- 3) + (- 3) + (- 3) + (- 3) + (- 3)(- 3) + (- 3) + (1/)(- 1) \quad (10)$$

Όπου $c_{10}, c_{01}, c_{20}, c_{11}, c_{02}, c_{30}, c_{21}, c_{12}, c_{03}$ και d είναι σταθερές υλικού. Τα c_{10}, c_{01} και d σχετίζονται με τη σταθερά διάτμησης (μ) και σταθερά διόγκωσης (K) σύμφωνα με το παρακάτω τύπο

$$= \chi +) \quad (11)$$

$$= 2/$$

Μια διαφορετική προσέγγιση της ενεργειακής παραμόρφωσης δίδεται από τον Ogden και δίνεται από τον εξής τύπο

$$= \sum (/) + + - 3 + \sum (1/)(- 1) \quad (12)$$

όπου N, μ, α_i και d_k είναι σταθερές υλικού.

Η αρχική σταθερά διάτμησης δίνεται ως

$$=(1/2) \sum \quad (13)$$

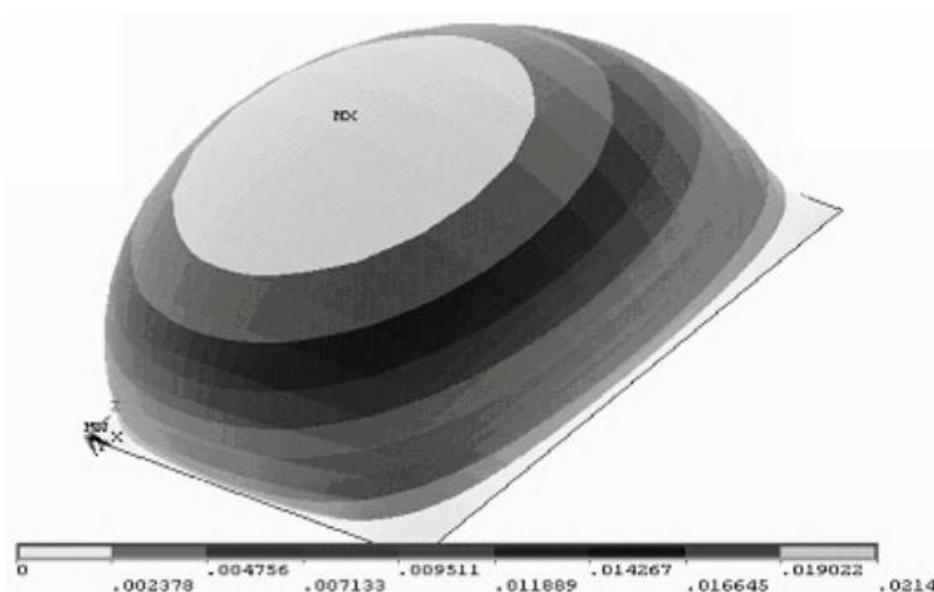
και ο αρχική σταθερά διόγκωσης είναι η

$$= 2/ \quad (14)$$

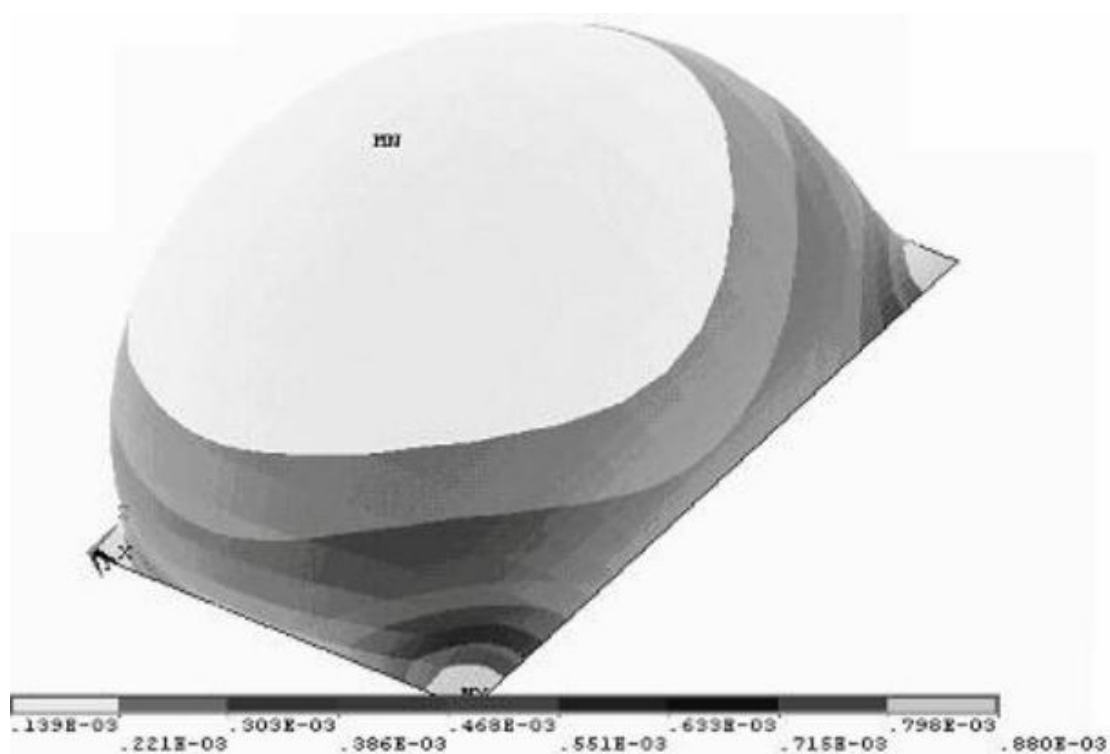
b) Αριθμητικά Αποτελέσματα Μοντελοποίησης

Για την επαλήθευση της παραπάνω υπόθεσης – η οποία στηρίζεται στο υπερελαστικό μοντέλο των Mooney-Rivlin για τη μηχανική συμπεριφορά του υπό επεξεργασία υλικού – η ελεύθερη διόγκωση του πολυμερούς φύλλου έχει μοντελοποιηθεί και τα αποτελέσματα του μοντέλου αυτά θα συγκριθούν με τα δεδομένα των παραπάνω εξισώσεων. Ένα υπό διαμόρφωση ABS φύλλο, με διαστάσεις πλάτους, μήκους και πάχους 25mm, 35mm και 0.82mm αντίστοιχα, μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μια μεμβράνη. Η ροή αερίου προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας μια ομοιόμορφη

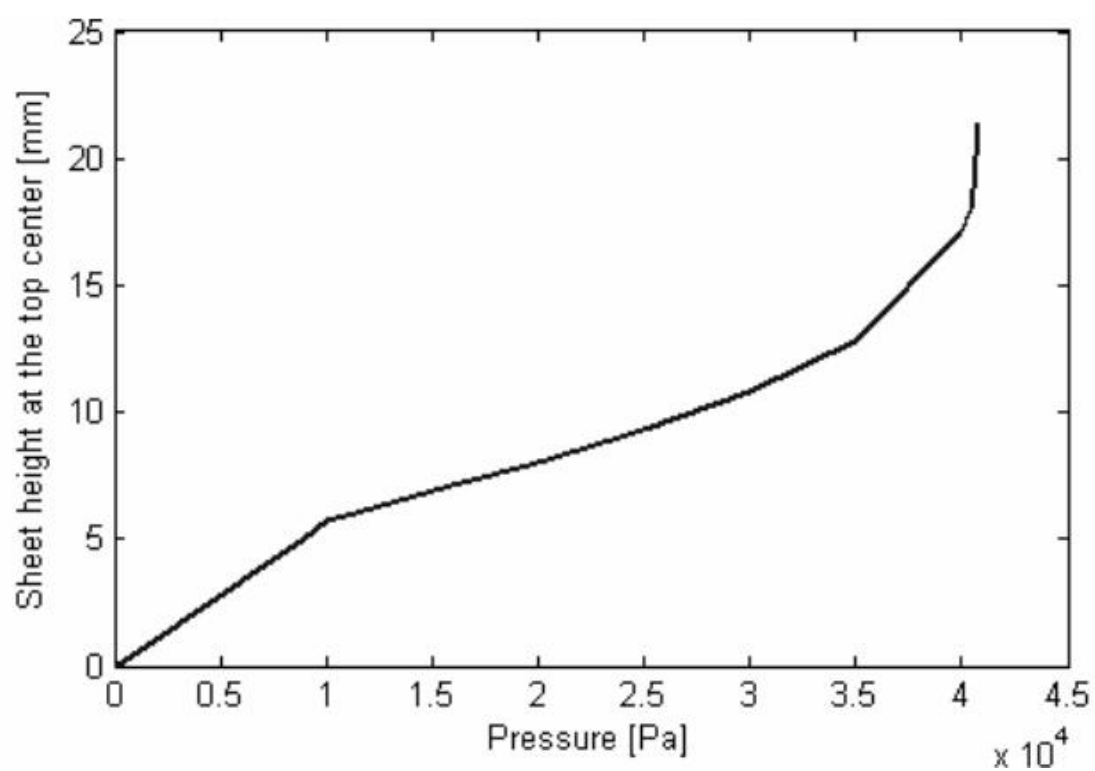
κατανομή πίεσης, η οποία εφαρμόζεται στο κάτω μέρος του φύλλου. Στις άκρες της μεμβράνης εφαρμόστηκαν σφικκτήρες προκειμένου να εξομοιωθεί το σύστημα σύσφιξης των υπό διαμόρφωση φύλλων. Η διαδικασία εξομοίωσης εκτελέστηκε με ισοθερμικές συνθήκες, υποθέτοντας τις ιδιότητες του υλικού σταθερές[5]. Ωστόσο, μπορεί να ληφθεί υπόψη μη-ισοθερμική κατανομή της θερμοκρασίας στο φύλλο, χρησιμοποιώντας διαφορετικές ιδιότητες του υλικού για κάθε ζώνη συγκεκριμένης θερμοκρασίας. Οι εικόνες 7.1 μέχρι 7.4 εμφανίζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ενώ οι 7.5 και 7.6 αποτυπώνουν μια σύγκριση του σχετικού πάχους (τελικού / αρχικού) του μοντέλου με τα αποτελέσματα των εξισώσεων[6]. Οι μικρές διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των εξισώσεων και του μοντέλου σχετίζονται με τις οριακές συνθήκες που δεχτήκαμε και την μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία. Όπως αναμενόταν, η μικρότερη τιμή του σχετικού πάχους βρέθηκε στο πάνω κέντρο του φύλλου, το οποίο δείχνει ότι εκεί έχουμε μέγιστη απομάκρυνση κατά τον y -άξονα (διεύθυνση ύψους), ενώ πρόβλημα πτυχώσεων υπήρξαν στις άκρες, εξαιτίας μικρής αύξησης του πάχους σε εκείνα τα σημεία. Ακόμα, οι εικόνες 7.3 και 7.4 αποτυπώνουν και την επιρροή της πίεσης που εφαρμόστηκε κατά το σχηματισμό τόσο στο ύψος όσο και στο πάχος. Όπως φαίνεται, αν ξεπεραστεί μια συγκεκριμένη τιμή της πίεσης που εφαρμόζεται (3500-4000Pa) το ύψος του φύλλου στο κέντρο της πάνω επιφάνειας αυξάνεται απότομα. Η ιδιαιτερότητα αυτή εξηγείται λαμβάνοντας υπόψη ότι η αντίσταση του φύλλου μειώνεται αντίστοιχα με το πάχος του.



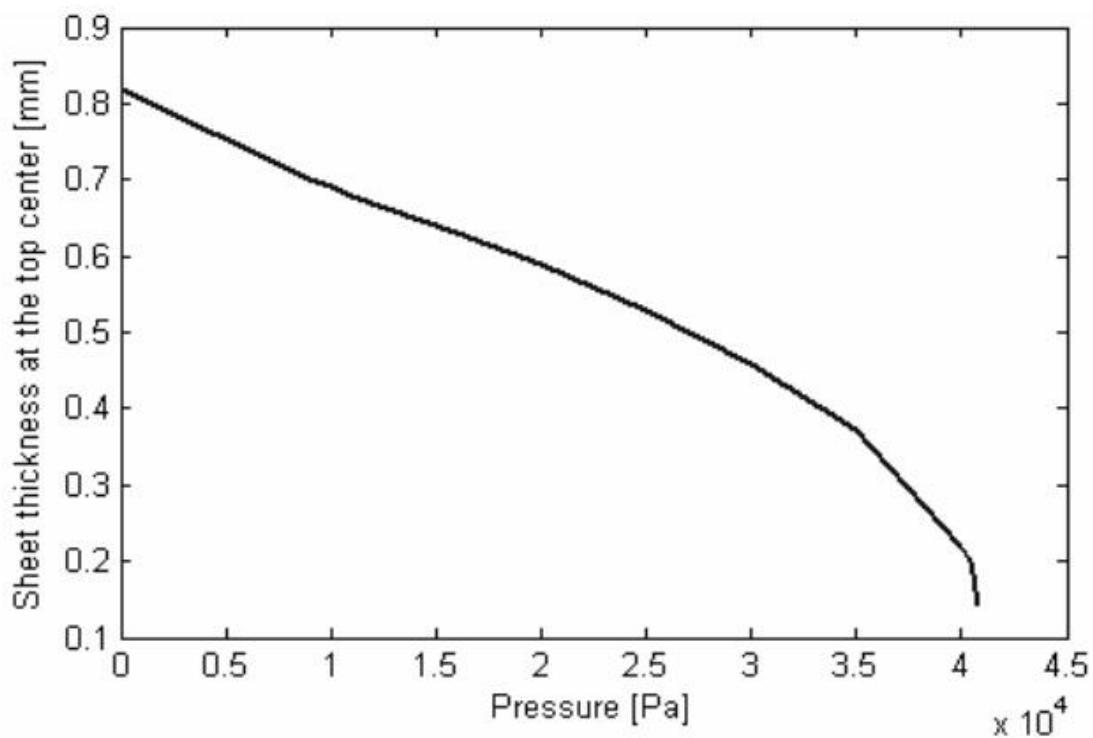
Σχήμα 7.1: Κατανομή γ -μετατόπισης του φύλλου



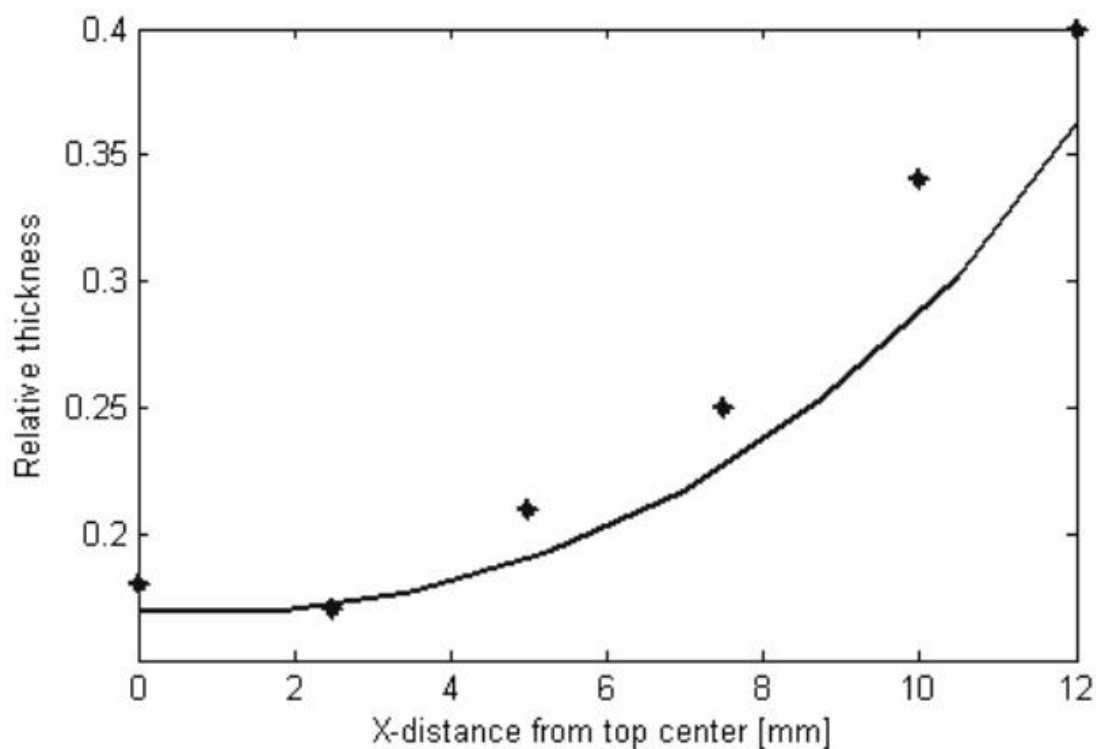
Σχήμα 7.2: Κατανομή πάχους του φύλλου



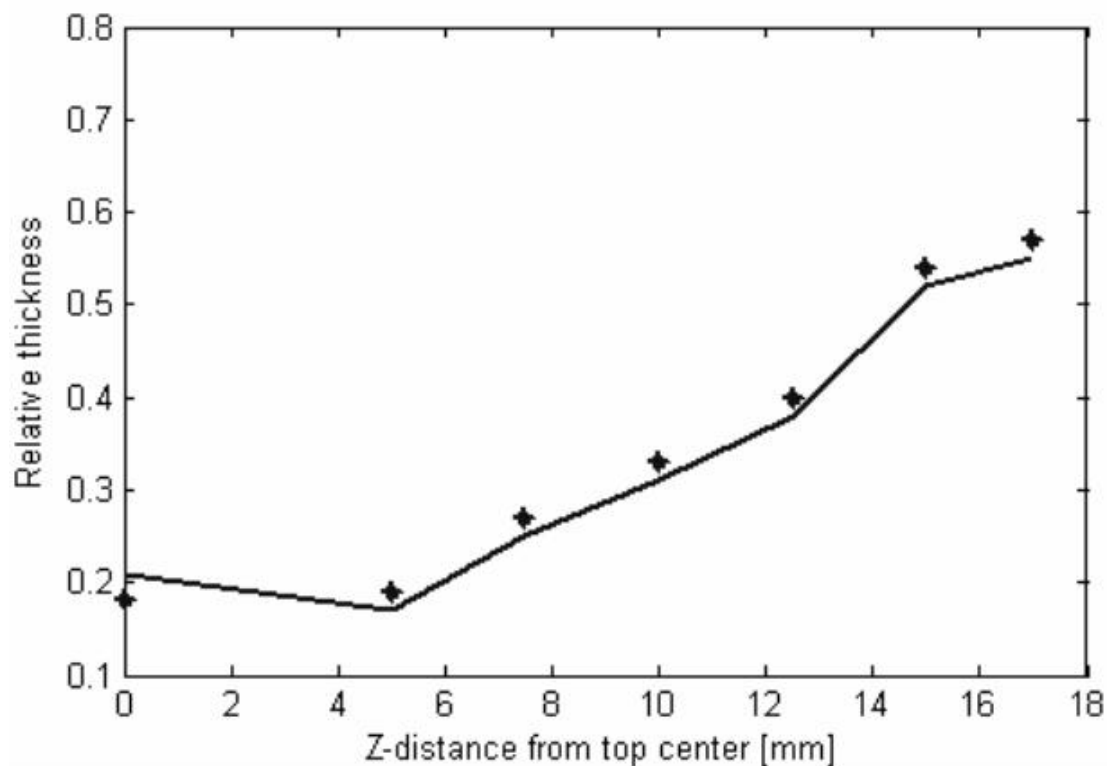
Σχήμα 7.3: Κατανομή ύψους στο κέντρο της πάνω επιφάνειας του φύλλου ανάλογα της εφαρμοζόμενης πίεσης



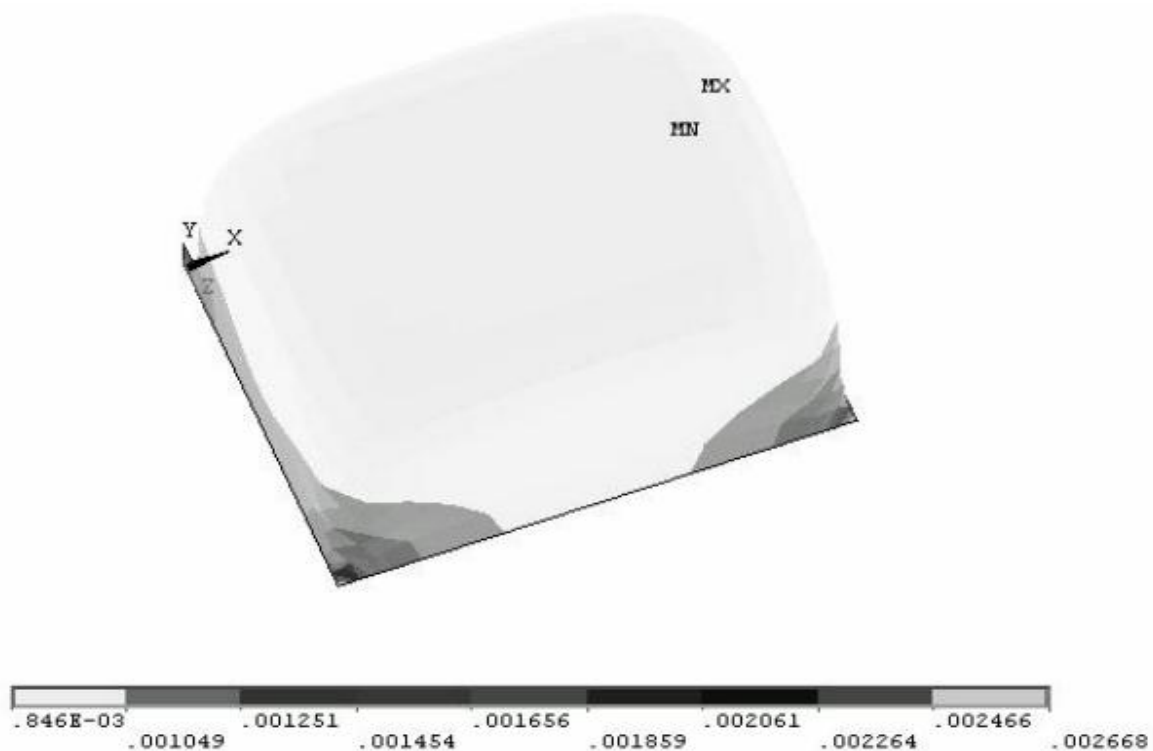
Σχήμα 7.4: Κατανομή πάχους στο κέντρο της πάνω επιφάνειας του φύλλου (ελάχιστο πάχος φύλλου) σε σχέση με την εφαρμοζόμενη πίεση



Σχήμα 7.5: Συνάρτηση σχετικού πάχους αναλογικά της απόστασης από το x-άξονα του φύλλου στο κέντρο της πάνω επιφάνειας του φύλλου (η γραμμή αποτυπώνει τα αποτελέσματα μοντέλου ενώ τα σημεία αποτελέσματα εξισώσεων)



Σχήμα 7.6: Συνάρτηση σχετικού πάχους αναλογικά της απόστασης από το z-άξονα του φύλλου στο κέντρο της πάνω επιφάνειας του φύλλου (η γραμμή αποτυπώνει τα αποτελέσματα μοντέλου ενώ τα σημεία αποτελέσματα εξισώσεων)



Σχήμα 7.7: Πάχος τελικού προϊόντος

Εν συνεχεία, γίνεται προσομοίωση ενός ορθογωνίου δοκιμίου για θερμομόρφωση. Οι διαστάσεις του δοκιμίου υποθέτονται στα 520mm, 400mm και 318mm (μήκος, πλάτος και ύψος αντίστοιχα) και το πάχος του φύλλου στα 3.2mm. Η επαφή μεταξύ του φύλλου και της μήτρας διαμόρφωσης μοντελοποιήθηκε σαν επαφή άκαμπτης επιφάνειας με εύκαμπτη επιφάνεια, με την υπόθεση ότι το φύλλο διαμόρφωσης είναι η πρωταρχική επιφάνειας επαφής ενώ της μήτρα είναι η επιδιωκόμενη. Ο αλγόριθμος που υιοθετήθηκε για την επαφή βασίζεται στη μέθοδο επαυξημένης (augmented) Langrange και ο εντοπισμός της επαφής βασίζεται στα σημεία Gauss. Η εικόνα 7.7 δείχνει το πάχος δοκιμίου στο τέλος της διαδικασίας της θερμομόρφωσης. Όπως αναμέναμε, η ελάχιστη τιμή του πάχους προσδιορίστηκε στο πάνω μέρος του φύλλου, κοντά στις άκρες του, οι οποίες είναι οι τελευταίες ζώνες της μήτρας που θα έρθει σε επαφή με το φύλλο (7.8 εικόνα). Η εικόνα αυτή δείχνει ότι η διαδικασία προσομοίωσης οδηγεί σε ένα τεμάχιο το οποίο έχει περιθώριο βελτιστοποίησης. Από την άλλη αυτό δε σχετίζεται με την πραγματική διαδικασία διαμόρφωσης του δοκιμίου, του οποίου οι γωνίες δεν «γεμίζουν» με περίσσεια υλικού [7].



Σχήμα 7.8: Απόσταση μεταξύ μήτρας και σχηματιζόμενου φύλλου.

c) Συμπεράσματα

Όπως αναφέραμε, στη διαδικασία που περιγράψαμε παραδεχτήκαμε ότι το υπό σχηματισμό υλικό υπακούει σε νόμους που διέπουν τα υπερελαστικά υλικά, σύμφωνα με τις 2 παραμέτρους των Mooney – Rivlin. Η εγκυρότητα της υιοθετημένης αυτής μηχανικής συμπεριφοράς αποδεικνύεται μέσα από την επαλήθευση των αποτελεσμάτων των μαθηματικών εξισώσεων με εκείνα του πειραματικού μοντέλου. Η προσομοίωση του ορθογωνίου δοκιμίου φανερώνει τη δυνατότητα για περαιτέρω ανάλυση της διαδικασίας και ανάπτυξη αυτής, κυρίως λαμβάνοντας υπόψη τις θερμικές διαστάσεις που είναι σχετικές με τη διαδικασία, κυρίως την ανομοιομορφη κατανομή θερμοκρασίας (σε αναλογία με το σύστημα θέρμανσης) και σε μερικές περιπτώσεις τη διαφοροποίηση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της μορφοποίησης. Επίσης, μια θερμομηχανική ανάλυση και μια πιο ακριβή μοντελοποίηση του σταδίου ψύξης, θα βοηθήσει πιθανώς σε καλύτερα αποτελέσματα όσο αφορά την μελέτη κατά την επαφή της μήτρας με το φύλλο[8].

7.3. Προσαρμογή Παραμέτρων Μοντελοποίησης

Η διαδικασία θερμομόρφωσης μεγάλων φύλλων είναι ευρέως διαδεδομένη για την παραγωγή τμημάτων όπως δεξαμενές καυσίμων, ταμπλό οργάνων και ανεμοθώρακες (φέρινγκ) οχημάτων. Αυτά τα πολύπλοκα τμήματα απαιτούν έναν ακριβή θερμοκρασιακό χάρτη για την προεργασία τους πριν τη διαδικασία της μορφοποίησης. Συγκεκριμένα, το υλικό που χρησιμοποιείται για τη μορφοποίηση δεξαμενών καυσίμων ενσωματώνει ένα στρώμα EVOH, το οποίο είναι επιρρεπές σε κατάρρευση αν δεν τηρηθούν αυστηρά οι σωστές συνθήκες της διαδικασίας. Το πρόβλημα συντίθεται από το γεγονός ότι η θερμοκρασία είναι ελεγχόμενη στα στοιχεία θέρμανσης, ενώ η θερμοκρασιακή κατανομή στο πάχος του φύλλου είναι η κυριότερη και σημαντικότερη μεταβλητή της διαδικασίας. Για το λόγο αυτό, η διαδικασία της θερμομόρφωσης είναι επιρρεπές σε δημιουργία ανωμαλιών, διαταραχών στο υπό διαμόρφωση φύλλο και γενικότερα αυξάνεται δραματικά ο αριθμός των κομματιών που απορρίπτονται. Προκειμένου να αυξηθεί η παραγωγικότητα και η ποιότητα, η θερμοκρασιακή κατανομή του φύλλου – πριν τη μορφοποίηση – πρέπει να συμμορφωθεί με το βέλτιστο θερμοκρασιακό χάρτη, όπως προκύπτει αυτός από διαδικασία εξομοίωσης ή από αποτελέσματα προηγούμενων διεργασιών. Το σύστημα που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο ελέγχει το ποσό της ενέργειας, το οποίο παραλαμβάνεται από κάθε ενεργειακή ζώνη. Αυτός ο τρόπος είναι ισοδύναμος με τον έλεγχο της θερμοκρασιακής κατανομής στο υπό διαμόρφωση φύλλο. Είναι ρυθμισμένο online με υπολογιστή, ώστε να αναγνωρίζεται η ζώνη θερμότητας από έναν πίνακα κέρδους ζωνών, με τη χρήση ενός μετρητή ροής και με τη βαθμονόμηση του πίνακα με τον ακροδέκτη ενός υπέρυθρου θερμόμετρου, το οποίο βρίσκεται στην έξοδο του φούρνου. Το σύστημα ελέγχου αντιλαμβάνεται την κατανομή του υπό διαμόρφωση φύλλου και αναλόγως ρυθμίζει την θερμοκρασία των στοιχείων θέρμανσης του φούρνου. Το σύστημα έχει εφαρμοστεί σε μια μηχανή θερμομόρφωσης Monark διπλών φύλλων, η οποία έχει διπλούς φούρνους με εμβαδόν 1,8m x 1,8m και 504 θερμοκρασιακά στοιχεία σε ζώνες με ελεύθερη διαμόρφωση.

a) Μελέτη Θερμικών Φαινομένων

Η μέθοδος της διαμόρφωσης με θερμομόρφωση μεγάλων πλαστικών τεμαχίων είναι ευρέως διαδεδομένη διαδικασία σε μεγάλο αριθμό βιομηχανιών, συμπεριλαμβανομένων και αυτοκινήτων, αεροναυπηγικής και οικιακών συσκευών. Η θερμομόρφωση είναι σχετικά μια απλή διαδικασία, κατά την οποία ένα θερμοπλαστικό φύλλο ζεσταίνεται μέσα σε φούρνο, μέχρι η θερμοκρασία του να είναι αρκετή για τη διαδικασία του καλουπώματος. Το στάδιο αυτό αναφέρεται ως επαναθέρμανση του φύλλου. Μόλις επιτευχθεί η θερμοκρασία αυτή, το φύλλο μεταφέρεται στο σταθμό μορφοποίησης, καλουπώματος. Στο σταθμό αυτόν, πιέζεται έναντι στο καλούπι, ώστε το φύλλο να αποκτήσει το επιθυμητό σχήμα. Αυτό επιτυγχάνεται είτε μέσω κενού αέρα είτε μέσω πιεσμένου αέρα, συνήθως με τη βοήθεια μηχανικού εμβόλου. Τελικώς, το τεμάχιο εκβάλλεται από το καλούπι και προχωράει στο στάδιο ψύξης. Οι θερμαντικές ζώνες στο πάνω και κάτω μέρος του φούρνου, συνήθως παρέχουν θέρμανση και στις δυο πλευρές του φύλλου. Μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους ενός φούρνου είναι η γεωμετρική ρύθμιση των θερμαντικών ζωνών, σε σχέση με το φύλλο. Η ενέργεια μέσω ακτινοβολίας από κάθε θερμαντήρα σε κάθε ζώνη του φύλλου, ρυθμίζεται στο στάδιο επαναθέρμανσης. Στο στάδιο αυτό το φύλλο κάμπτεται και μεταβάλλεται η απόσταση του φύλλου – θερμαντήρα, οπότε καινούριοι υπολογισμοί πρέπει να γίνουν.

Κάποιο ποσό θερμότητας μεταφέρεται στο φύλλο με συναγωγή, αν και είναι αρκετά δύσκολο να προσδιοριστεί το ποσό αυτό, μιας και οι φούρνοι είναι σχετικά ανοικτές κατασκευές και δύσκολο να προσδιοριστούν τα ρεύματα αέρα ή η συσσώρευση του καυτού σε συγκεκριμένες περιοχές. Έτσι, οι συντελεστές στη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, σε διάφορες περιοχές του φύλλου μπορούν να ποικίλλουν αρκετά. Το μεγαλύτερο μέρος θερμότητας στο εσωτερικό του φύλλου μεταφέρεται με συναγωγή από την επιφάνεια. Στην επιφάνεια εξάλλου του φύλλου είναι η περιοχή που λαμβάνεται η θερμότητα από το φούρνο αρχικά, είτε μέσω ακτινοβολίας είτε μέσω συναγωγής. Εντούτοις, ένα μεγάλο ποσοστό από την αύξηση θερμότητας στο εσωτερικό του φύλλου, προέρχεται από την υπέρυθη ακτινοβολία, η οποία απορροφάται απευθείας από το πλαστικό υλικό, ανεξαρτήτου βάθους, σύμφωνα με τον νόμο των Beer – Lambert [9].

b) Έλεγχος μέσω Μοντέλου και Προσομοίωσης

Ένα απλοποιημένο μονοδιάστατο δυναμικό μοντέλου επαναθέρμανσης φύλλου, αναλύεται παρακάτω. Στο μοντέλο αυτό, η μεταφορά θερμότητας υποτίθεται ότι συμβαίνει μόνο στο πάχος του φύλλου, κάθετα στην επιφάνεια. Η μονοδιάστατη εξίσωση θερμότητας για το φύλλο είναι η

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q_{abs} \quad (15)$$

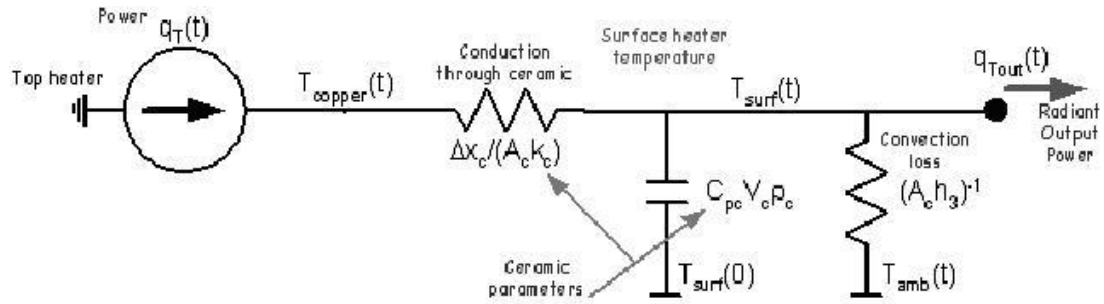
όπου ρ , C_p και k είναι η πυκνότητα του υλικού, η ειδική θερμοχωρητικότητα και ο συντελεστής αγωγιμότητας αντίστοιχα. Οι μεταβλητές T και q_{abs} είναι η θερμοκρασία του φύλλου και η θερμότητα ακτινοβολίας που παράγεται από τα θερμαντικά στοιχεία και απορροφάται σε βάθος z από το φύλλο. Η εξίσωση (15) έχει διακριτικοποιηθεί αρκετά, ώστε να αποκτήσουμε ένα πλήθος διαφορικών εξισώσεων με χωρικές μεταβλητές, και οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω (16), και (17). Αυτό το μοντέλο είναι πιο υποκείμενο στο σχεδιασμό ενός συστήματος ελέγχου κατά τη διάρκεια του κύκλου. Για μια συγκεκριμένη περιοχή i , η χωροταξική διακριτικοποιημένη ενεργειακή εξίσωση στην πάνω επιφάνεια του πρώτου στρώματος είναι η

$$\frac{dT_{i1}}{dt} = \frac{2}{\rho C_p \Delta z} \left[(Q_{T_{i1}} + Q_{B_{i1}}) + h(T_{\infty 1} - T_{i1}) + \frac{k}{\Delta z} (T_{i2} - T_{i1}) \right] \quad (16)$$

όπου T_i είναι η θερμοκρασία στην πάνω επιφάνειας του στρώματος της περιοχής i , ενώ $Q_{T_{i1}}$ και $Q_{B_{i1}}$ είναι το συνολικό ποσό θερμότητας μέσω ακτινοβολίας που έχουν απορροφηθεί από τα πάνω και κάτω θερμαντικά στοιχεία αντίστοιχα. Το $T_{\infty 1}$ είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, το h ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή και T_{i2} η θερμοκρασία του στρώματος ακριβώς κάτω από το στρώμα της επιφάνειας [10]. Η παραπάνω εξίσωση είναι αντίστοιχη με την εξίσωση (15), αλλά έχει διακριτικοποιηθεί και περιέχει τη συναγωγή. Η ενεργειακή εξίσωση για κάποιο εσωτερικό στρώμα j , συμπεριλαμβανομένης και της απορρόφησης είναι η

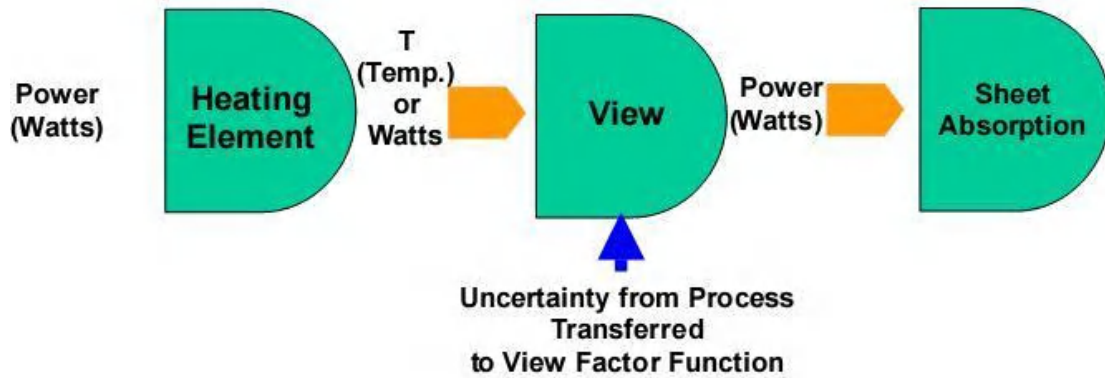
$$\frac{dT_{ij}}{dt} = \frac{1}{\rho C_p \Delta z} \left[\frac{k}{\Delta z} (T_{i(j-1)} - 2T_{ij} + T_{i(j+1)}) + (Q_{T_{ij}} + Q_{B_{ij}}) \right] \quad (17)$$

Οι θερμαντήρες, συνήθως κεραμικά στοιχεία, έχουν την δική τους δυναμική. Το μήκος κύματος της μέγιστης ακτινοβολούμενης θερμότητας από τους θερμαντήρες ποικίλλει, ανάλογα τη θερμοκρασία και το χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα θέρμανσης συμπεριφέρεται σαν μια πηγή που εκπέμπει ακτινοβολίες διαφορετικής συχνότητας, ενώ το υπό διαμόρφωση φύλλο ενεργεί σαν φίλτρο και απορροφά περισσότερες ή λιγότερες σταθερές συχνότητες. Τα θερμαντικά στοιχεία συνήθως είναι ταξινομημένα σε ζώνες, μοιράζοντας το ίδιο ηλεκτρικό κύκλωμα. Η κάθε ζώνη τυπικά ελέγχεται θερμοκρασιακά αυτόνομα από ένα θερμοηλεκτρικό ζεύγος, το οποίο είναι ενσωματωμένο σε ένα θερμαντικό στοιχείο της ζώνης. Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία στην επιφάνεια του υπό διαμόρφωση φύλλου, μπορεί να είναι διαφορετική, σε σχέση με την θερμοκρασία των θερμαντικών στοιχείων, τα οποία ακτινοβολούν θερμότητα σε κάθε σημείο μέσα στο φούρνο. Η εικόνα 7.9 παρουσιάζει μια σχηματική αναπαράσταση, η οποία αντιπροσωπεύει τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας ενός κεραμικού θερμαντικού στοιχείου.



Σχήμα 7.9: Μεταφορά θερμότητας από το θερμαντικό στοιχείο

Αυτός ο τύπος του μοντέλου μας επιτρέπει να σχηματοποιήσουμε τη διαδικασία της θερμομόρφωσης σαν μεταφορά ενέργειας από τα θερμαντικά στοιχεία στο υπό διαμόρφωση φύλλο και ταυτόχρονα είναι ικανό να επιδείξει τη μέση θερμότητα, που εκπέμπουν οι θερμαντήρες, σαν θερμοκρασίες, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.10.



Σχήμα 7.10: Μεταφορά ενέργειας/θερμοκρασίας από το θερμαντικό στοιχείο στο φύλλο

Συστήματα ελέγχου με ανάδραση, μπορούν να μειώσουν τις αβεβαιότητες που υπάρχουν σε παραμέτρους τόσο του υλικού όσο και της διαδικασίας. Ακόμα βοηθάει στη εξάλειψη φαινομένων, όπως αναταράξεις του αέρα, θερμοκρασία περιβάλλοντος ή περιεκτικότητα σε υγρασία από τα αποτελέσματα, ώστε να μην είναι λάθος αυτά. Ο έλεγχος μέσω ανάδρασης στο στάδιο της αναθέρμανσης, μπορεί να εφαρμοστεί τόσο μέσα στον ίδιο κύκλο όσο και από κύκλο σε κύκλο της διεργασίας, ανάλογα την ικανότητα των αισθητήρων. Ένα τέτοιο σύστημα ελέγχου με πολλές μεταβλητές, αναπτύσσεται αυτόν τον καιρό, για εμπορικές εφαρμογές από την MAGI Control Inc. σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο McGill και το Εθνικό Ερευνητικό Συμβούλιο (National Research Council) του Καναδά, στο Ινστιτούτο Βιομηχανικών Υλικών (Industrial Materials Institute IMI) που διαθέτει. Ο στόχος του συστήματος ελέγχου είναι να επιτευχθεί ο επιθυμητός θερμοκρασιακός χάρτης στο υπό διαμόρφωση φύλλο. Ο θερμοκρασιακός αυτός χάρτης έχει επιτευχθεί και δημιουργηθεί μετά από διαδικασίες προσομοίωσης ή από δοκιμαστικά πειράματα (trial-and-error) που έχουν γίνει κατά καιρούς.

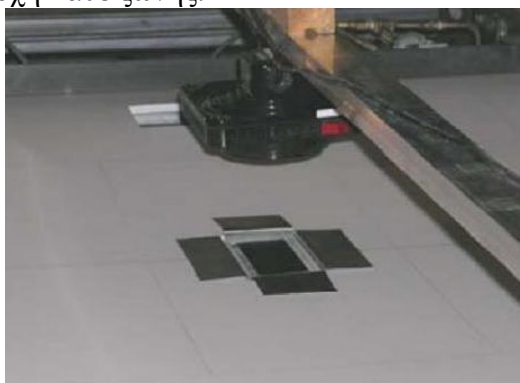
c) Μηχανές Monark

Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα, ήταν μια Monark, διπλού φύλλου, μηχανή θερμομόρφωσης, η οποία εγκαταστάθηκε στο εργαστήριο μεγάλης κλίμακας του ΙΜΙ και φαίνεται στο σχήμα 7.11. Η Monark έχει ένα διπλό 1,8m x 1,8m (6'x6') φούρνο και ο καθένας είναι εφοδιασμένος με 504 θερμαντικά στοιχεία, σε επαναπροσαρμοζόμενες ζώνες.



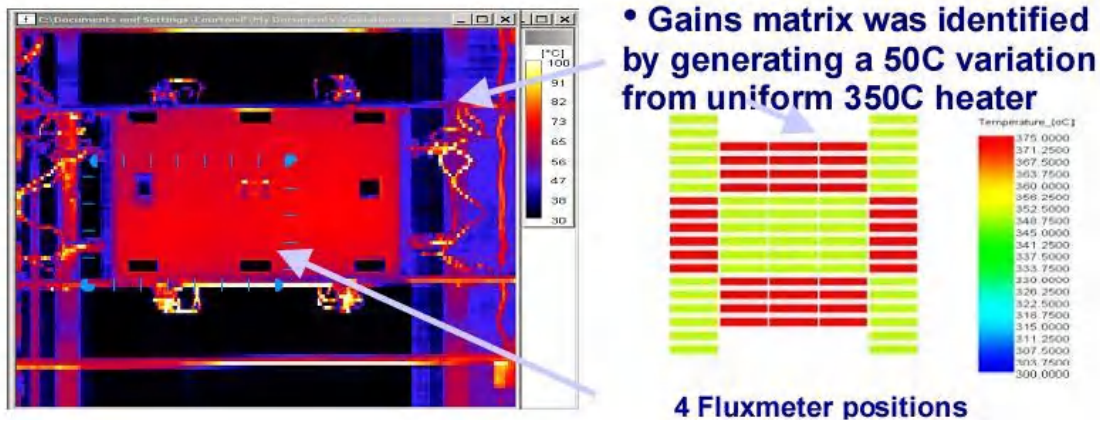
Σχήμα 7.11: Μηχανή θερμομόρφωσης Monark

Προκειμένου να ρυθμιστούν οι παράμετροι της προσομοίωσης στη μηχανή, μετρήθηκε η ρευστότητα του υπό διαμόρφωση φύλλου μέσω ενός μετρητή, ο οποίος κατασκευάστηκε από ένα μπλοκ αλουμινίου, μονωμένο σε 5 πλευρές και ενσωματώθηκαν θερμοηλεκτρικά ζεύγη, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.12 . Η ενέργεια που εισάγεται σε κάθε στοιχείο ζώνης μετρήθηκε στη μηχανή, με τη ενσωμάτωση αισθητήρων στην παροχή κάθε ζώνης.



Σχήμα 7.12: Μετρητής ρευστότητας

Το σχεδιάγραμμα που παίρνουμε από την προσομοίωση όσο αφορά το φύλλο και τα θερμαντικά στοιχεία παρουσιάζεται στο σχήμα 7.13



Σχήμα 7.13: Αναγνωριστική μήτρα κέρδους από μετρήσεις θερμοκρασίας

d) Στρατηγική Ελέγχου της Θερμοκρασίας του Φύλλου από Κύκλο σε Κύκλο

Στο σημείο αυτό θα αναφέρουμε το σχεδιασμό ενός ελεγκτή θερμοκρασίας στο υπό διαμόρφωση φύλλο μεταξύ κύκλων, για μια μεγάλη μηχανή θερμομόρφωσης [11]. Ο όρος τερματικός αναφέρεται στην θερμοκρασία επιφάνειας του φύλλου, η οποία μετρείται στο τέλος κάθε κύκλου αναθέρμανσης. Υποθέτοντας έναν σταθερό κύκλο, η προτεινόμενη στρατηγική περιλαμβάνει 4 βήματα, από τα οποία μόνο το 4^ο εφαρμόζεται μέσω υπολογιστή.

- 1) Ο πίνακας της ροής θερμότητας λαμβάνεται πειραματικά από τη μηχανή, με τη χρήση βηματικών αποτελεσμάτων, τα οποία έχουν αντληθεί από έναν μετρητή ροής.
- 2) Οι εκτιμώμενοι παράγοντες, από μια προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων, ρυθμίζονται ώστε να πετύχουμε τον ίδιο πίνακα ροής με αυτόν που λάβαμε από τις πειραματικές μετρήσεις.
- 3) Ο θερμοκρασιακός πίνακας, που συνδέει τη θερμοκρασία των θερμαντικών στοιχείων ανά ζώνη με τη τερματική θερμοκρασία στην επιφάνεια του φύλλου, λαμβάνεται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.
- 4) Η αναστροφή του θερμοκρασιακού πίνακα εφαρμόζεται στο σφάλμα μεταξύ της μετρημένης και επιθυμητής τερματικής θερμοκρασίας στην επιφάνεια του φύλλου, ώστε να διορθωθεί η εισαγωγή δεδομένων στο θερμαντικό στοιχείο, μέσω υπολογιστή, για τον επόμενο κύκλο.

Η ροή θερμότητας που έρχεται από τα θερμαντικά στοιχεία καθορίζονται εντελώς από εκτιμώμενους παράγοντες. Η θεωρία των παραγόντων εκτίμησης είναι γενικά ακριβής, ώστε οι τιμές των ροών υπολογίζονται με καλή εκτίμηση μέσω σοφιστικών μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, όπως το πακέτο που έχει αναπτυχθεί από την IMI Form View. Το άθροισμα όλων των παραγόντων εκτίμησης, ο καθένας αντιπροσωπεύει το ποσό της ενέργειας που παραλαμβάνεται από τα θερμαντικά στοιχεία της ζώνης j στη ζώνη του φύλλου i , προσδιορίζοντας τη ροή θερμότητας (λαμβανόμενη ενέργεια ανά περιοχή) που παραλήφθηκε από κάποια ζώνη.

$$Heat_Flux_{sheet_zone_i} = \sum_j V_{i,j} P_j$$

όπου P_j είναι ο μέση θερμότητα της ζώνης j .

Οι ροές θερμότητας μετρήθηκαν από μετρητή ροής. Κατά την πειραματική διαδικασία τοποθετήθηκε ο μετρητής στο φύλλο, σε μια συγκεκριμένη ζώνη, και κατόπιν εφαρμόσαμε βηματικές αλλαγές στην θερμοκρασία μιας ζώνης θερμαντικών στοιχείων που μας ενδιέφερε, ενώ παράλληλα κρατήσαμε τις θερμοκρασίες των υπόλοιπων ζωνών των θερμαντικών στοιχείων, σταθερή. Αυτό επαναλήφθηκε για κάθε ζώνη θερμαντικών στοιχείων και οι αλλαγές στη ροή καταγράφηκαν από τον μετρητή ροής, και εν συνεχεία χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστεί ένας πίνακας ο οποίος συνδέει τις αλλαγές στη θερμοκρασία των ζωνών των θερμαντικών στοιχείων με τις αλλαγές στα ποσά θερμότητας που παραλαμβάνονται στην επιφάνεια των ζωνών του υπό διαμόρφωση φύλλου. Η διαδικασία αυτή εκτελέστηκε στην μηχανή Monark, κρατώντας σταθερή τη θερμοκρασία των θερμαντικών στοιχείων στους 325°C ενώ εφαρμόστηκε βηματική αλλαγή στη θερμοκρασία των θερμαντικών στοιχείων της ζώνης που μας ενδιέφερε κατά 50°C. Ο πίνακας της ροής θερμότητας κατασκευάστηκε βάση των αποτελεσμάτων αυτών.

Μόλις τελειώσουμε τον πειραματικό πίνακα ροών, μπορούν να ρυθμιστούν οι παράγοντες εκτίμησης της προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία, ώστε να επιτευχθεί μια παρόμοια μήτρα ροής υπό τις ίδιες συνθήκες εξομοίωσης. Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει τις θερμοκρασίες των ζωνών με τα θερμαντικά στοιχεία, οι οποίες αποτελούν κύριο στοιχείο για τον επιθυμητό χάρτη θερμοκρασιών στην επιφάνεια του φύλλου στο τέλος τους σταδίου αναθέρμανσης. Αυτό επιτυγχάνεται είτε χρησιμοποιώντας τεχνική βελτιστοποίησης είτε πειραματικά με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος (trial-and-error procedure).

Τέλος, πρέπει να αποκτηθεί και άλλος ένας τύπος πίνακα, από τον οποίο θα μπορούμε να μετράμε θερμοκρασίες, όχι ροές, στην επιφάνεια του υπό διαμόρφωση φύλλο με το πέρας του σταδίου αναθέρμανσης κατά τη διάρκεια παραγωγής. Η μήτρα αυτή μπορεί να παραχθεί μέσω της προσομοίωσης ρυθμίζοντας τις κατάλληλες παραμέτρους, μέσω κάποιας διαδικασίας παρόμοιας της παραπάνω που περιγράψαμε για τις ροές θερμότητας, με τη διαφορά ότι στην προσομοίωση αυτή, κάνουμε χρήση των θερμοκρασιών στις ζώνες του φύλλου, στο τέλος του επιθυμητού κύκλου. Θα αναφερθούμε στον πίνακα αυτό, σαν πίνακα θερμοκρασιών Ψ [12].

e) Έλεγχος Θερμοκρασίας Φύλλου σε Πραγματικό Χρόνο

Κατά την παραγωγή, μπορεί να εφαρμοστεί μια στρατηγική ελέγχου της θερμοκρασίας από κύκλο σε κύκλο με τον τρόπο που παρουσιάζουμε παρακάτω. Ένας γραμμικός ανιχνευτής μετράει τον θερμοκρασιακό χάρτη του φύλλου στο τέλος του φούρνου μετά την αναθέρμανση [13]. Ο θερμοκρασιακός δισδιάστατος χάρτης αφαιρείται από τον επιθυμητό χάρτη ώστε να παραχθεί ένας θερμοκρασιακός χάρτης σφαλμάτων. Η μήτρα θερμοκρασιών τότε αναστρέφεται και εφαρμόζεται στον θερμοκρασιακό χάρτη σφαλμάτων. Με τον τρόπο αυτό παράγεται ένα διάνυσμα των αλλαγών της θερμοκρασίας των θερμαντικών στοιχείων, το οποίο εφαρμόζεται στη

διεργασία του επόμενου φύλλου για μορφοποίηση, του οποίου ο χάρτης της τερματικής θερμοκρασίας στην επιφάνεια του θα είναι πλησιέστερα στον επιθυμητό και ιδανικό. Για παράδειγμα, υποθέτοντας έναν απλό φούρνο με ένα θερμαντικό στοιχείο και ένα σύστημα θερμοκρασίας, μετά από τον κύκλο $i-1$, η διόρθωση της θερμοκρασίας του θερμαντικού στοιχείου που θα γίνει για τον επόμενο κύκλο i , υπολογίζεται ως εξής

$$\Delta T_h(i) = \Psi^{-1}(T_{sh_des} - T_{sh}(i-1))$$

όπου T_{sh_des} , $T_{sh}(i-1)$ είναι η επιθυμητή και η πραγματική τιμή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του φύλλου στο τέλος του κύκλου $i-1$. Για φούρνο με περισσότερα από 1 θερμαντικά στοιχεία και περισσότερα συστήματα θερμοκρασίας, η μεταβλητή Ψ^{-1} είναι η αναστροφή της μήτρας θερμοκρασιών, εάν είναι ορθογώνιος τετράγωνη ή η ψευδοαναστροφή εάν ο πίνακας δεν είναι ορθογώνιος, και η επιθυμητή θερμοκρασία T είναι το ανάπτυγμα της στήλης του Ψ .

Κατά συνέπεια, μετά από έναν κύκλο, τα ενημερωμένα στοιχεία που θα εισαχθούν στα θερμαντικά στοιχεία θα βελτιώσουν την ποιότητα των υπό κατασκευή τεμαχίων. Αυτή η απλή στρατηγική ελέγχου μπορεί να δημιουργήσει πιο “υγιή”, όσο αφορά αλλαγές στις ιδιότητες του φύλλου ή στα ροή των θερμαντικών στοιχείων, με την πρόσθεση του ολοκληρώματος του σφάλματος της θερμοκρασίας, στον υπολογισμό της διόρθωσης της θερμοκρασίας των θερμαντικών στοιχείων. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε έναν επαναληπτικό ολοκληρωτικό σύστημα ελέγχου της τερματικής θερμοκρασίας (I-ILC) [14]. Για παράδειγμα, δεχόμαστε τον απλούστερο φούρνο με ένα θερμαντικό στοιχείο και ένα σύστημα θερμοκρασίας. Έτσι μετά από τον κύκλο $i-1$, η εκτιμώμενη θερμοκρασία του θερμαντικού στοιχείου $T_h(i)$ για τον επόμενο κύκλο

$$T_h(i) = T_h(i-1) + k_{ILC}(T_{sh_des} - T_{sh}(i-1))$$

όπου T_{sh_des} , $T_{sh}(i-1)$ είναι η επιθυμητή και η πραγματική θερμοκρασία στην επιφάνεια του φύλλου αντίστοιχα, μετά το τέλος του κύκλου $i-1$, και k_{ILC} είναι το κέρδος από τον ελεγκτή I-ILC. Για ένα φούρνο με περισσότερα από 1 θερμαντικά στοιχεία και περισσότερα συστήματα θερμοκρασίας, το κέρδος k_{ILC} θα είναι στην πραγματικότητα ο ανάστροφος ή ο ψευδοανάστροφος Ψ^{-1} του θερμοκρασιακός πίνακας.

f) Συμπεράσματα

Το σύστημα που αναφέρθηκε παραπάνω, βασίζεται στη χρήση ενός υπέρυθρου θερμόμετρου, για να συγκρίνει τον θερμοκρασιακό χάρτη του φύλλου στην έξοδο του φούρνου αναθέρμανσης με τον επιθυμητό θερμοκρασιακό χάρτη όπως διαμορφώθηκε από την προσομοίωση ή από τα αποτελέσματα πειραμάτων.

- Επιτρέπει τον έλεγχο από κύκλο σε κύκλο και σε online ρύθμιση του μοντέλου προσομοίωσης
- Ελέγχει πραγματικά τη θερμοκρασία επιφάνειας του υπό διαμόρφωση φύλλου, αντί τις θερμοκρασίες των θερμαντικών στοιχείων, όπως γινόταν πριν

- Επιτρέπει στο σύστημα ελέγχου να προσαρμόζει τις μεταβλητές των ιδιοτήτων του υλικού και των περιβαλλοντικών συνθηκών από παρτίδα σε παρτίδα.

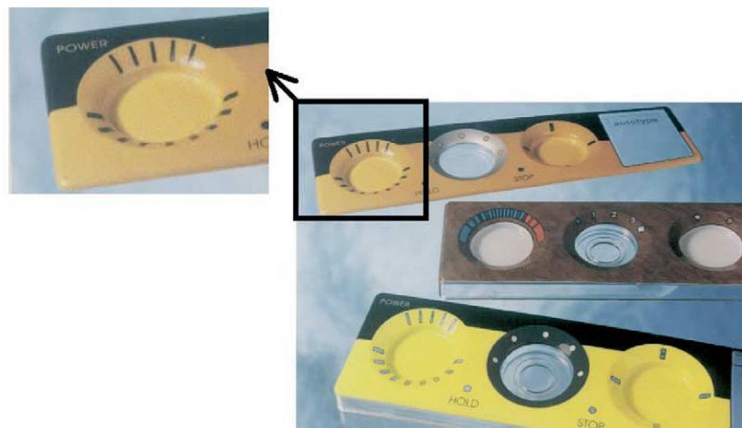
Σε μελλοντικές εξελίξεις, το σύστημα θα επεκταθεί στον εντός κύκλου έλεγχο μέσω του συσχετισμού του θερμοκρασιακού χάρτη στην έξοδο του φούρνου με τους υπέρυθρους αισθητήρες μέσα στο φούρνο [15]. Στην προσέγγιση αυτή που αναφέραμε, μοντέλα με γρήγορη απόκριση εποπτεύονται από εξειδικευμένους παράγοντες, οι οποίοι ανιχνεύουν και ενεργούν σε οποιαδήποτε απόκλιση από το επιθυμητό πρότυπο.

7.4. Μοντελοποίηση με Πεπερασμένα Στοιχεία

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται το πρόβλημα της μοντελοποίησης και προσομοίωσης, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, της διαδικασίας της θερμομόρφωσης για πολυμερή φύλλα σε διάφορες θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, η διαδικασία μορφοποίησης με κενό, για θερμοκρασίες της τάξεως των 200°C και η διαδικασία Niebling για φύλλα σε θερμοκρασία των 100°C εφαρμόζοντας υψηλή πίεση, περιγράφεται παρακάτω. Αναφέρονται υποθέσεις σχετικά με τη συμπεριφορά των πολυμερών και των φυσικών περιστατικών που διέπουν τη διαδικασία, ώστε να μπορούν να παραχθούν φυσικά μοντέλα προσομοίωσης για την κάθε διαδικασία. Παράγονται καμπύλες τάσης από πειραματικά δεδομένα, σε ποικίλες εφαρμογές τάσεων και θερμοκρασιών. Περιγράφεται ένα μοντέλο ελαστικής-πλαστικής παραμόρφωσης και χρησιμοποιείται το πλαίσιο των πεπερασμένων στοιχείων, για να προσομοιώσει το διογκωμένο τμήμα της διαδικασίας Niebling. Παρουσιάζονται κατόπιν αριθμητικά αποτελέσματα για την παραμόρφωση του φύλλου από το καλούπι, από τη Niebling μέθοδο.

a) Περιγραφή της διαδικασίας Niebling

Στο κεφάλαιο αυτό αναφερόμαστε στην μοντελοποίηση μέσω υπολογιστή, της διαδικασίας της θερμομόρφωσης για πολυμερή φύλλα. Στη διαδικασία αυτή, τα λεπτά θερμαινόμενα συμπαγή φύλλα, τα οποία στερεώνονται στις άκρες τους, είναι υποκείμενα σε πιέσεις, ώστε να υποστούν μεγάλη παραμόρφωση από τα καλούπια, και να μετατραπούν σε λεπτές κατασκευές, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.14.

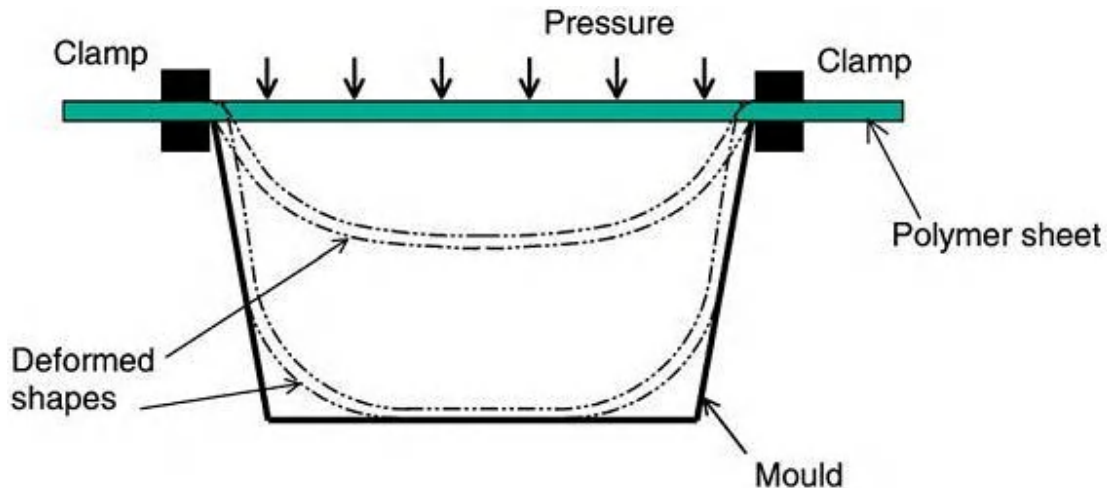




Σχήμα 7.14: Τυπικά προϊόντα παραγωγής θερμομόρφωσης με τη μέθοδο Niebling

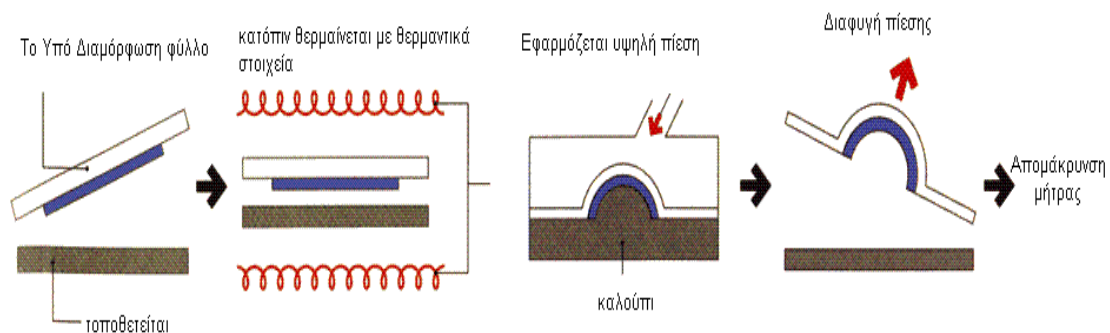
Η συνολική διαδικασία της θερμομόρφωσης περιγράφεται σε όρους με την ακόλουθη σειρά φάσεων

- i) Το φύλλο, στερεωμένο στις άκρες του, θερμαίνεται. Εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας του, το φύλλο διαστέλλεται και γίνεται λιγότερο άκαμπτο και μπορεί να κρεμάσει λόγω του βάρους του, όπως δείχνει το σχήμα 7.15.
- ii) Τα θερμαντικά στοιχεία απομακρύνονται.
- iii) Εφαρμόζεται αμέσως πίεση (είτε στην πάνω επιφάνεια του φύλλου – θερμομόρφωση με εφαρμογή πίεσης – είτε με εκκένωση του όγκου μεταξύ του φύλλου και του καλουπιού – θερμομόρφωση με εφαρμογή κενού), οπότε έχουμε πραγματοποίηση παραμόρφωσης. Η καυτή επιφάνεια του φύλλου έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του καλουπιού, η οποία είναι πιο κρύα (αποτελεσματικά κρυώνει το φύλλο) και το φύλλο αποκτά το σχήμα του καλουπιού.
- iv) Η πίεση διατηρείται, και ενώ ψύχεται το λεπτό στρώμα τοίχου του φύλλου έχει παρατηρηθεί ότι η δομή παραμένει σε επαφή με τη μήτρα.
- v) Η πίεση απομακρύνεται. Και σε αυτό το στάδιο, έχουμε επαφή φύλλου και μήτρας.
- vi) Το φύλλο απομακρύνεται με φύσημα αέρα από το καλούπι, πιθανώς να επηρεάζεται ελαφρώς το σχήμα του λόγω της αναπήδησης από τη μήτρα, και αποκτά τη τελική μορφή.



Σχήμα 7.15: Στάδιο θερμομόρφωσης υπό πίεση

Οι παραπάνω φάσεις της διαδικασίας Niebling αποτυπώνονται στην εικόνα 7.16



Σχήμα 7.16: Φάσεις της διαδικασίας Niebling

Τα τελευταία χρόνια, έχουν γίνει αρκετές μελέτες στην προσομοίωση μέσω υπολογιστή για τη διαδικασία θερμομόρφωσης και συγκεντρώνονται κυρίως στην παραμόρφωση που συμβαίνει στη φάση (iii) που αναφέραμε πιο πάνω [16]. Η παραμόρφωση και το τελικό πάχος είναι οι περιοχές που μας ενδιαφέρουν περισσότερο και υποθέτουμε ότι αυτές συμβαίνουν στην φάση (iii). Στην αριθμητική προσομοίωση της φάσης αυτής είναι η κύρια αναφορά του κεφαλαίου αυτού. Αν και αναφέρουμε την επιρροή της προσομοίωσης αυτής, τα αποτελέσματα που παίρνουμε από την μοντελοποίηση της φάσης αυτής συγκρίνονται με το τελικό σχήμα και το πάχος της θερμομορφώμενης δομής, τα οποία πάρθηκαν από πειράματα και φυσικά περιέχουν όλα τα φυσικά δεδομένα των φάσεων (i) έως (vi).

Η αναφορά μας στη φάση (iii) επικεντρώνεται σε 2 σημεία. Στη διαδικασία μορφοποίησης υπό κενό, με τη θερμοκρασία του φύλλου να φτάνει τους 180°C-200°C και η διαδικασία κάτω από την οποία πραγματοποιείται η παραμόρφωση. Η τελευταία διαδικασία πραγματοποιείται κάτω από υψηλή πίεση, συνήθως στα 120 bar, και με τη θερμοκρασία του φύλλου αισθητά χαμηλότερα, στους 100°C περίπου, η οποία ονομάζεται διαδικασία Niebling.

Γενικά επιδιώκουμε μοντέλα, τα οποία θα προσομοιώνουν ένα εύρος από τις διάφορες διαδικασίες θερμομόρφωσης που υπάρχουν, και για το λόγο αυτό παίρνουμε κάποιες απλοποιήσεις.

Οι δύο πιο σημαντικές είναι

- Η διαδικασία παραμόρφωσης είναι ημιστατική
- Τα φύλλα προσκολλώνται στην μήτρα κατά την επαφή

Παρακάτω θα αναφερθούμε στην εφαρμογή της διαδικασίας Niebling σε υλικό γνωστό ως BAYFOL (ένα μίγμα διφαινόλ-Α-πολυκαρβονικό οξύ και πολυβουτυλένιο-τερεφθαλικό οξύ) και στην προσομοίωση μέσω υπολογιστή της φάσης (iii) [17].

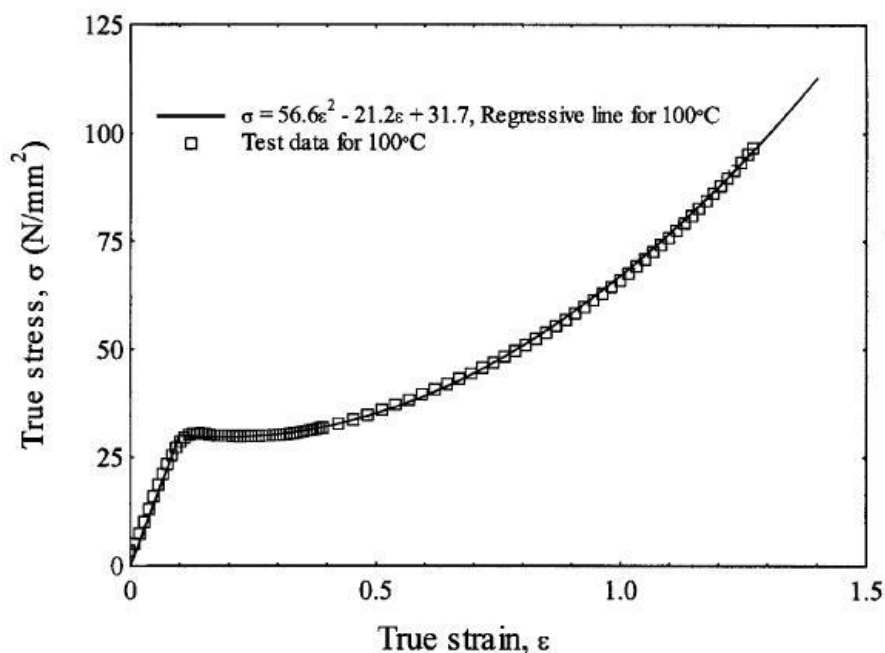
Τα αποτελέσματα των πειραμάτων για BAYFOL συνιστούν ότι είναι λογικό σε αυτήν την περίπτωση να κάνουμε την εξής παραδοχή

❖ *Η παραμόρφωση της φάσης (iii) είναι ελαστική-πλαστική*

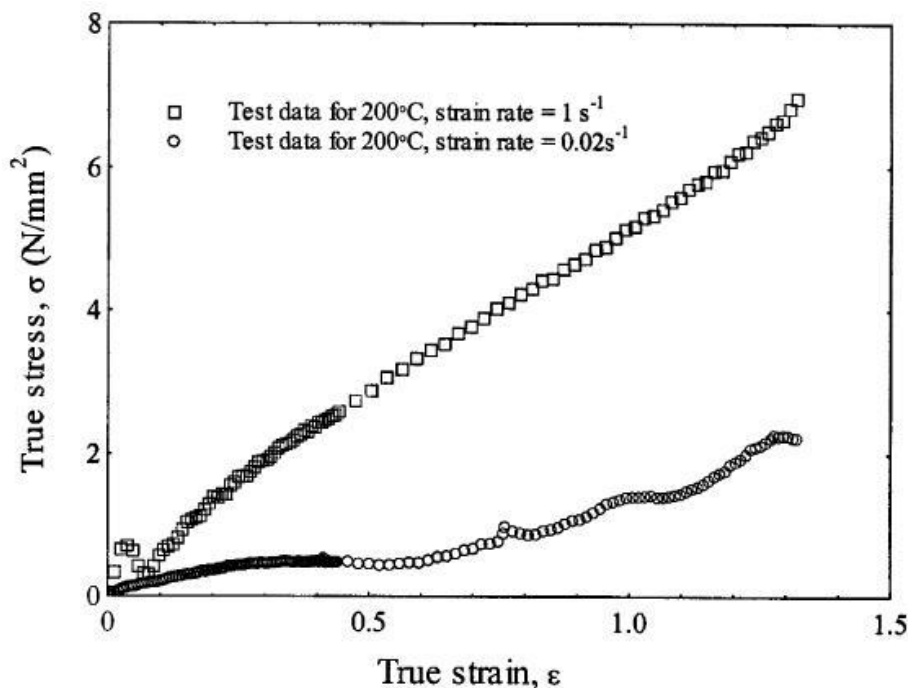
Το ελαστικό-πλαστικό μοντέλο για μεγάλη παραμόρφωση/τάση περιγράφεται σε επόμενη παράγραφο. Οι αρχικοί άγνωστοι του μοντέλου είναι το εκτόπισμα u σε κάποια σημεία σε όλη την επιφάνεια για συγκεκριμένη πίεση που εφαρμόζουμε. Η διακριτικότητα των πεπερασμένων στοιχείων του μοντέλου, παράγει εκτιμήσεις των μετατοπίσεων που είναι άγνωστες [18].

b) Πειραματικά Αποτελέσματα για BAYFOL

Μια σειρά μονοαξονικών σταθερών πειραμάτων κατανομής τάσης για BAYFOL έχουν πραγματοποιηθεί κάτω από ελεγχόμενες ισοθερμικές συνθήκες, με τη θερμοκρασία να κυμαίνεται από τους 100°C στους 200°C και με το ρυθμό παραμόρφωσης να κυμαίνεται από 0.02s⁻¹ έως 1.00s⁻¹. Έχει βρεθεί ότι στους 100°C, θερμοκρασία κατάλληλη για το φαινόμενο Niebling, οι καμπύλες τάσης δεν είναι ευαίσθητες στον ρυθμό με τον οποίο εφαρμόζονται οι τάσεις αυτές. Για τη διακύμανση της τάσης που αναφέρθηκε, στους 100°C, το γράφημα που έχουμε από τα αποτελέσματα του πειράματος φαίνεται στο σχήμα 7.17. Στο γράφημα αυτό βλέπουμε ότι ταιριάζουν τα πειραματικά με τα πραγματικά αποτελέσματα, κάτι που δεν συμβαίνει σε υψηλότερη θερμοκρασία στο BAYFOL, όπως φαίνεται στο γράφημα που παρουσιάζεται στην εικόνα 7.18, στο οποίο η καμπύλη των πειραματικών αποτελεσμάτων ανεβαίνει με διαφορετικό ρυθμό σε σχέση με την αντίστοιχη της εξίσωσης.



Σχήμα 7.17: Διαφοροποιήσεις πραγματικής τάσης – παραμόρφωσης στους 100° C



Σχήμα 7.18: Διαφοροποιήσεις πραγματικής τάσης – παραμόρφωσης στους 200° C

Το γράφημα του σχήματος 7.17 δείχνει ότι στους 100°C, κατά τη διάρκεια της φάσης (iii), το φύλλο BAYFOL παραμορφώνεται με έναν ελαστικό-πλαστικό τρόπο. Στην προσομοίωσή μας έχουμε επιλέξει ένα ρυθμό ανεξάρτητο του ελαστικού-πλαστικού μοντέλου, αλλά συσχετιζόμενο με την ισοτροπική και πλαστική σκλήρυνση για να αντιπροσωπεύει τη συμπεριφορά του υλικού στη θερμοκρασία των 100°C. Η εξίσωση που μας δίνει τη τάση είναι η

$$\sigma = 56.6\epsilon^2 - 21.2\epsilon + 31.7$$

όπου σ και ε είναι αντίστοιχα η αληθινή τάση και η παραμόρφωση και φυσικά είναι το ανάπτυγμα εξίσωσης δευτέρου βαθμού η οποία έχει προσαρμοστεί στα πειραματικά δεδομένα.

c) Ελαστικό-Πλαστικό Μοντέλο με χρήση Lagrangian εξίσωσης

Στη μοντελοποίηση της φάσης (iii) για το BAYFOL στο πλαίσιο Niebling, υποθέτουμε ότι το φύλλο υποβάλλεται σε πεπερασμένη, μη γραμμική γεωμετρικά, παραμόρφωση. Αρκετές από τις λεπτομέρειες της πεπερασμένης παραμόρφωσης μοιάζουν με εκείνες του τυποποιημένου μοντέλου το οποίο χρησιμοποιείται στην περίπτωση που οι παραμορφώσεις είναι απειροελάχιστες και αναπτύχθηκε περαιτέρω για την περίπτωση πεπερασμένης τάσης, η οποία αυξάνεται λογαριθμικά και αναφέρεται στη βιβλιογραφία των Bathe [17], Bathe και Eterovic [19] και Zienkiewicz και Taylor [20]. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η παραμόρφωση πλαστικά, το μοντέλο περιέχει ένα κριτήριο παραγωγής και μετα-παραγωγής, ένας κανόνας για τη ροή και το υλικό υποβάλλεται σε σκλήρυνση. Το μοντέλο ακολουθεί σχετικά κοντά το αντίστοιχο του Weber.

Στη μη-παραμορφώσιμη κατάσταση, το φύλλο καταλαμβάνει την περιοχή $\Omega \in \mathbb{R}^3$. Στην παραμόρφωση, ένα σημείο $\underline{x} \equiv (x_1, x_2, x_3) \in \Omega$ μετακινείται στο $\underline{x} + \underline{u}(\underline{x})$, όπου $\underline{u} \equiv (u_1, u_2, u_3)^T$ είναι το διάνυσμα μετατοπίσεων. Το βαθμωτό άνυσμα της κλίσης της παραμόρφωσης $\underline{\underline{F}}$ προσδιορίζεται ως εξής

$$\underline{\underline{F}} \equiv \underline{\underline{I}} + \nabla \underline{u} = \underline{\underline{I}} + \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

με $i, j = 1, 2, 3$ και έχει τις πολικές συντεταγμένες

$$\underline{\underline{F}} = \underline{\underline{R}} \underline{\underline{U}}$$

όπου $\underline{\underline{R}}$ είναι ο ορθογώνιος περιστροφικός τελεστής και το $\underline{\underline{U}}$ (θετικός συμμετρικός) τελεστής ελαστικότητας. Ο τελεστής $\underline{\underline{U}}$ επιτρέπει μια φασματική ανάλυση στις χαρακτηριστικές ρίζες $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, οι οποίες είναι οι κύριες αναλογίες ελαστικότητας και οι ορθοκανονικές χαρακτηριστικές ρίζες $\underline{u}_1, \underline{u}_2, \underline{u}_3$ του $\underline{\underline{U}}$, οι οποίες είναι οι κύριες κατευθύνσεις του $\underline{\underline{U}}$ όπως φαίνεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$\underline{\underline{U}} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \underline{u}_i \underline{u}_i^T$$

Ο λογαριθμικός τελεστής παραμόρφωσης $\underline{\underline{E}}$ προσδιορίζεται από την εξίσωση

$$\underline{\underline{E}} = \sum_{i=1}^3 (\ln(\lambda_i)) \underline{u}_i \underline{u}_i^T$$

Σε κάθε αύξηση, το φύλλο πρέπει να βρίσκεται σε ισορροπία με τις εφαρμοσμένες συνθήκες περιορισμού. Στο $(n+1)^{\circ}$ βήμα φορτίου, απαιτούμε να βρούμε την αύξηση

της μετατόπισης ${}^{(n+1)}\underline{\Delta u}$ και υποθέτοντας ότι η μετατόπιση ${}^{(n)}\underline{u}$, ο τελεστής τάσης ${}^{(n)}\underline{\sigma}$ και η παράγωγος τάση ${}^{(n)}\sigma_y$ είναι γνωστά από το προηγούμενο βηματικό στάδιο, μπορούμε να υπολογίσουμε το ${}^{(n+1)}\underline{u}$ ως εξής

$${}^{(n+1)}\underline{u} = {}^{(n)}\underline{u} + {}^{(n+1)}\underline{\Delta u}$$

Επομένως, σε κάθε βήμα φορτίων θα λύνουμε της εξής ενεργειακή εξίσωση

$$\int_{{}^{(n)}\Omega} {}^{(n+1)}S_{ij} \left({}^{(n+1)}\underline{\Delta u}, {}^{(n)}\underline{u} \right) \zeta_{ij}(\underline{u}) = G(\underline{u}) \quad (18)$$

όπου ${}^{(n+1)}\underline{\Delta u}$ είναι ο κύριος άγνωστος, η πρώτη σχετική Piola-τάση ${}^{(n+1)}S_{ij}$ προσδιορίζεται σε όρους αληθινής τάσης ${}^{(n+1)}\sigma_{ij}$ σύμφωνα με την εξίσωση

$$\underline{\underline{S}}^{(n+1)} \equiv \det \left({}^{(n+1)}\underline{\underline{\Delta F}} \right) \left({}^{(n+1)}\underline{\underline{\sigma}} \right) \left({}^{(n+1)}\underline{\underline{\Delta F}} \right)^{-T} \quad (19)$$

όπου το $(n+1)$ δείχνει το βήμα φορτίου, το $\zeta_{ij}(\underline{u})$ είναι ο συνηθισμένος απειροελάχιστος τανυστής παραμόρφωσης, ο οποίος επιδρά στο διάνυσμα \underline{u} και το G εξαρτάται από το φορτίο κατά την διάρκεια του βήματος [19].

Προκειμένου να βρεθεί το G , χρειαζόμαστε μια ουσιώδη σχέση του υλικού κατά το φορτίο βήματος. Σε κάθε βήμα φορτίου, το σύστημα των μη γραμμικών εξισώσεων που προκύπτουν από την εξ. (18) θα λυθούν επαναληπτικά, χρησιμοποιώντας τη διαδικασία του Newton-Raphson, και μόλις η επανάληψη θα φτάσει σε σύγκλιση, προχωράμε σε προσαύξηση του φορτίου.

Επομένως, χρησιμοποιούμε το πεδίο του εκτοπίσματος για μεγαλύτερα φορτία. Για το $(n+1)^{\circ}$ βήμα υποθέτουμε ότι ξέρουμε τα αρχικά

$${}^{(n)}\underline{u}, {}^{(n)}\underline{\sigma}, {}^{(n)}\underline{\underline{F}}, {}^{(n)}\sigma_y$$

Προκειμένου, να διευκρινιστεί η διαδικασία του βήματος, εργαζόμαστε σε πειραματικές ποσότητες, τις οποίες σημειώνουμε με (*). Για μια πειραματική αύξηση του εκτοπίσματος ${}^{(n+1)}\underline{\Delta u}_*$ στο βήμα φορτίου, έχουμε το πειραματικό άνυσμα της σχετικής παραμόρφωσης

$${}^{(n+1)}\underline{\underline{\Delta F}}_* = {}^{(n+1)}\underline{\underline{F}}_* \left({}^{(n)}\underline{\underline{F}} \right)^{-1}$$

το οποίο έχει πολικές συντεταγμένες

$${}^{(n+1)}\underline{\underline{\Delta F}}_* = {}^{(n+1)}\underline{\underline{\Delta R}}_* {}^{(n+1)}\underline{\underline{\Delta U}}_*$$

και προσδιορίζουμε την πειραματική αύξηση της λογαριθμικής παραμόρφωσης ως εξής

$${}^{(n+1)}\underline{\underline{\Delta E}}_* \equiv \ln \left({}^{(n+1)}\underline{\underline{\Delta U}}_* \right)$$

Η αντίστοιχη πειραματική απόκλιση της αύξηση της τάσης είναι

$$\underline{\underline{{}^{(n+1)}\Delta T_*'}} \equiv 2\mu \underline{\underline{{}^{(n+1)}\Delta E_*'}}$$

όπου μ είναι ο συντελεστής συνάφειας του υλικού και το $\underline{\underline{{}^{(n+1)}\Delta E_*'}}$ είναι η πειραματική απόκλιση της λογαριθμικής παραμόρφωσης. Εν συνεχεία, η τυπική απόκλιση της πειραματικής αύξηση τάσης προσδιορίζεται ως

$$\underline{\underline{{}^{(n+1)}\Delta T_*^m}} \equiv \frac{1}{3} tr \left(\underline{\underline{{}^{(n+1)}\Delta T_*'}} \right) = 3\kappa \underline{\underline{{}^{(n+1)}\Delta E_*^m}}$$

όπου το κ είναι ο συντελεστής μάζας του υλικού και το $\underline{\underline{{}^{(n+1)}\Delta E_*^m}}$ είναι η τυπική απόκλιση της πειραματικής αύξησης της λογαριθμικής παραμόρφωσης. Έτσι η τιμή της τάσης δίνεται

$$\underline{\underline{{}^{(n+1)}T_*}} \equiv \left(\underline{\underline{{}^{(n+1)}\Delta R_*}} \right)^T \left(\underline{\underline{\sigma}} \right) \left(\underline{\underline{{}^{(n+1)}\Delta R_*}} \right)$$

Η συνολική τάση που προκύπτει από την αύξηση φορτίου είναι η

$$\underline{\underline{{}^{(n+1)}T_*}} = \underline{\underline{{}^{(n)}T_*}} + 2\mu \underline{\underline{{}^{(n+1)}\Delta E_*'}} + 3\kappa \underline{\underline{{}^{(n+1)}\Delta E_*^m}}$$

Προκειμένου να ξεκινήσουμε τη πειραματική διαδικασία της πλαστικής παραμόρφωσης, χρειαζόμαστε ένα κριτήριο παραγωγής, με την ισοδύναμη πειραματική τάση, η οποία προσδιορίζεται ως

$$\underline{\underline{{}^{(n+1)}\bar{\sigma}_*}} \equiv \sqrt{\frac{3}{2} \underline{\underline{{}^{(n+1)}T_*'}} \underline{\underline{{}^{(n+1)}T_*'}}$$

και σύμφωνα με αυτό εξετάζουμε εάν

$$\underline{\underline{{}^{(n+1)}\bar{\sigma}_*}} \leq \underline{\underline{{}^{(n)}\sigma_y}} \quad \text{κριτήριο Von Mises}$$

Εάν $\underline{\underline{{}^{(n+1)}\bar{\sigma}_*}} \leq \underline{\underline{{}^{(n)}\sigma_y}}$, τότε η παραμόρφωση είναι ελαστική, ενώ εάν $\underline{\underline{{}^{(n+1)}\bar{\sigma}_*}} > \underline{\underline{{}^{(n)}\sigma_y}}$ ξεκινάει η πλαστικοποίηση. Σε αυτήν την περίπτωση υπολογίζεται η σωστή ισοδύναμη πειραματική τάση $\underline{\underline{{}^{(n+1)}\bar{\sigma}_*}}$ από το κανόνα σκλήρυνσης

$$\underline{\underline{{}^{(n+1)}\bar{\sigma}_*}} \equiv \underline{\underline{{}^{(n+1)}\sigma_y}} = \underline{\underline{{}^{(n)}\sigma_y}} + h \underline{\underline{{}^{(n+1)}\Delta E_*^P}} \quad (20)$$

όπου $h=h^{(n+1)}\sigma_y$ είναι η κλίση της καμπύλης σκλήρυνσης (η οποία προέρχεται από τον έλεγχο του υλικού σε εφελκυσμό) και ${}^{(n+1)}\Delta E_*^P$ είναι η πειραματική αύξηση πλαστικής παραμόρφωσης.

Υπάρχει ακόμα ο κανόνας ροής, ο οποίος είναι ο εξής

$$\sigma_*^{(n+1)} \cong {}^{(n+1)}\bar{\sigma}_* - 3\mu^{(n+1)}\Delta E_*^P \quad \text{Prandtl Reuss (21)}$$

Οι εξισώσεις (20) και (21) μπορούν να λυθούν για να βρεθεί το $\sigma_*^{(n+1)}$, η ισοδύναμη τάση, με τον ορισμό $\sigma_*^{(n+1)} \cong \sigma_y^{(n+1)}$ και η τιμή της τάσης \underline{T}_* γίνεται

$$\underline{T}_*^{(n+1)} = \left(\frac{\sigma_*^{(n+1)}}{{}^{(n+1)}\bar{\sigma}_*} \right) \underline{T}'_* + \frac{1}{3} \text{tr} \left(\underline{T}_*^{(n+1)} \right) \underline{I}$$

Η πραγματική πειραματική τάση $\underline{\sigma}_*^{(n+1)}$ γίνεται

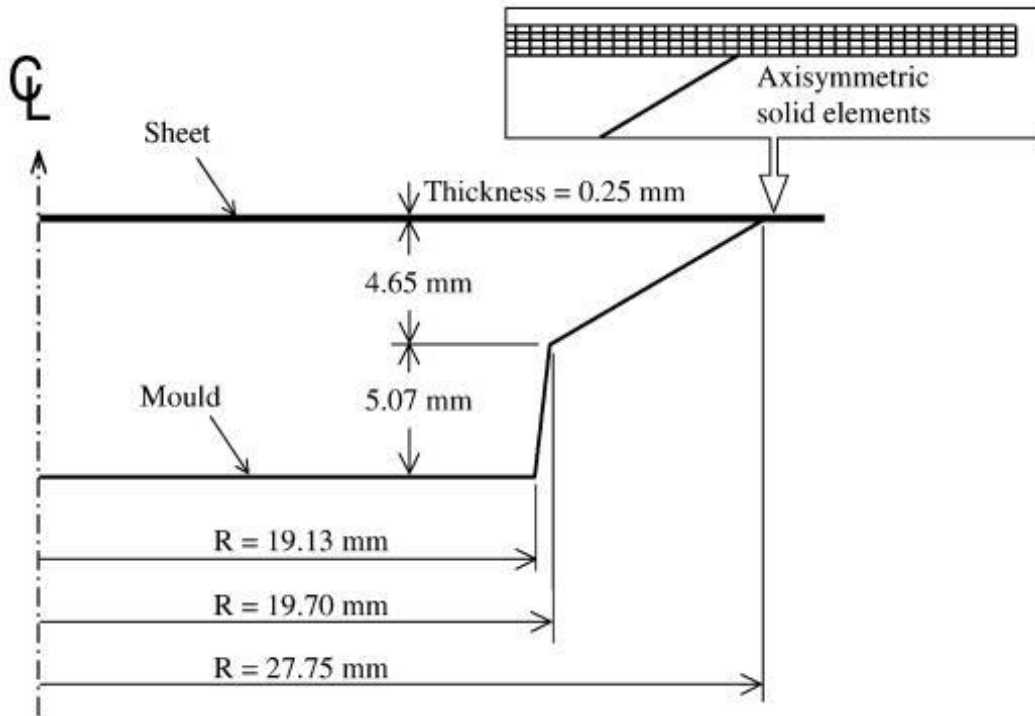
$$\underline{\sigma}_*^{(n+1)} = {}^{(n+1)}\Delta \underline{R} \underline{T}_*^{(n+1)} \left({}^{(n+1)}\Delta \underline{R} \right)^T \quad (22)$$

Η αντικατάσταση της εξίσωσης (22) στην (19), μας δίνει μια έκφραση της τάσης Piola, την οποία βάζουμε στην (18) για να αποκτήσουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα [20].

d) Εφαρμογή Πεπερασμένων Στοιχείων

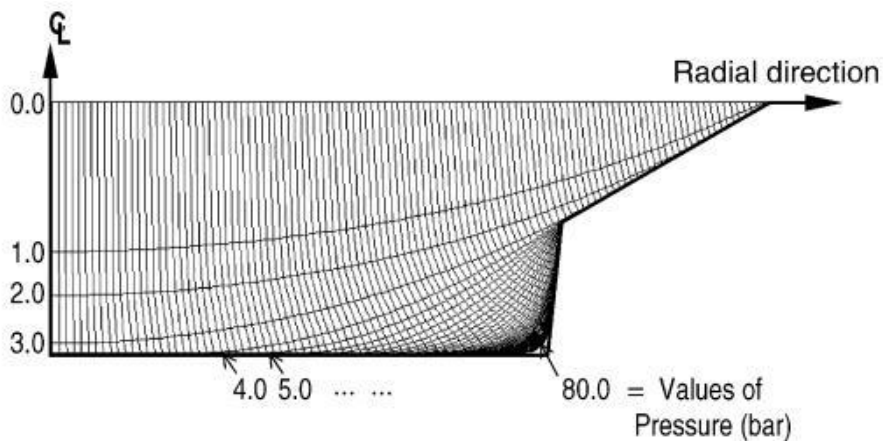
Το μοντέλο της ελαστικής-πλαστικής παραμόρφωσης έχει περιγραφτεί με όρους πειραματικούς. Στην εφαρμογή, διακριτικοποιούμε τον χώρο με πεπερασμένα στοιχεία. Για να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα του ογκομετρικού μπλοκαρίσματος υιοθετείται η τεχνική της διαστολής.

Στο παρόν κεφάλαιο, εφαρμόζεται η παραμόρφωση του φύλλου σε ένα αξονοσυμμετρικό καλούπι. Έτσι έχουμε ένα δυδιάστατο πρόβλημα με τη γεωμετρία που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Στη διακριτικοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία, ένα ομοιόμορφο πλέγμα με τέσσερα στρώματα το κάθε ένα έχει τέσσερεις κόμβους με ισοπαραμετρικά ορθογώνια στοιχεία, το οποίο μας δίνει 960 στοιχεία, σύμφωνα με το σχήμα 7.19.



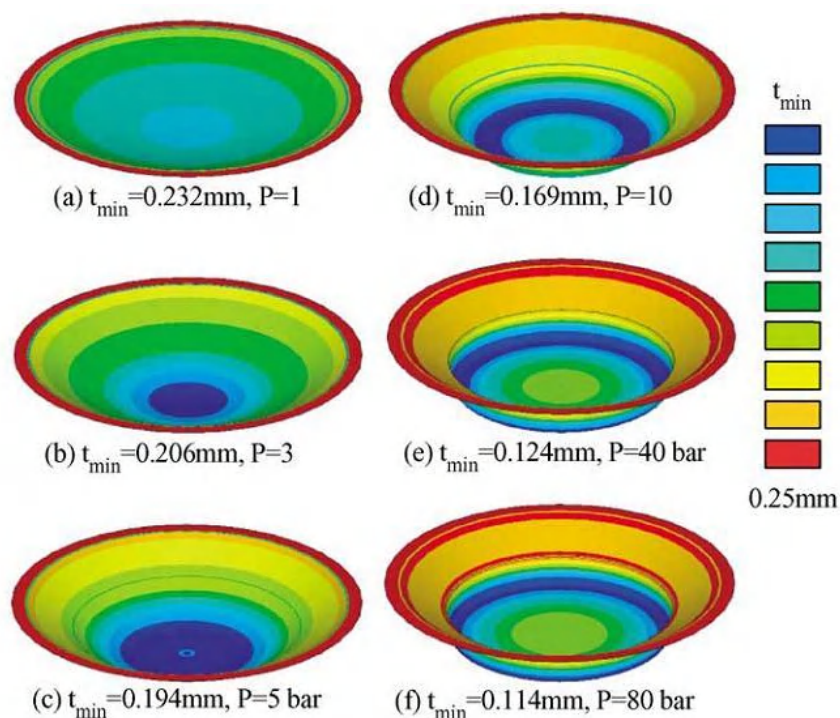
Σχήμα 7.19: Αξονοσυμμετρικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

Σημεία παραμόρφωσης της κάτω επιφάνειας του φύλλου μαζί με το προφίλ της παραμόρφωσης του φύλλου για διαφορετικά επίπεδα πίεσης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας διόγκωσης δίνονται στο σχήμα 7.20. Μπορούμε να διακρίνουμε ότι υψηλές πιέσεις χρειάζονται για να εξαναγκάσουν το φύλλο να εισχωρήσει στις αιχμηρές γωνίες της μήτρας.



Σχήμα 7.20: Διαδοχικά στάδια παραμόρφωσης κατά τη διαδικασία εμφύσησης στους 100° C.

Διάφορα προφίλ πάχους του παραμορφωμένου φύλλου για την αξονοσυμμετρική αυτή περίπτωση, δίνονται στο σχήμα 7.21, για αντίστοιχες πιέσεις του προηγούμενου σχήματος. Όπως αναμένεται το παραμορφωμένο φύλλο είναι λεπτότερο στην περιοχή των αιχμηρών γωνιών του καλουπιού [21].



Σχήμα 7.21: Κατανομή πάχους στο παραμορφωμένο υλικό, με εφαρμογή διαφορετικής πίεσης στους 100°C

e) Συμπεράσματα

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, η διαδικασία Niebling για το BAYFOL, μπορεί να μοντελοποιηθεί αποτελεσματικά με τη χρήση μοντέλου ελαστικής-πλαστικής παραμόρφωσης και τη διακριτικοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία. Τα αποτελέσματα που έχουμε από τη χρήση αυτού του μοντέλου δείχνουν ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη ενός μοντέλου για τη διαδικασία Niebling και το επόμενο βήμα θα είναι φυσικά η σύγκριση των τιμών που προέκυψαν από το μοντέλο αυτό με πραγματικές τιμές από διαδικασίες στη βιομηχανική παραγωγή.

Αναφέραμε για διαδικασίες θερμομόρφωσης γύρω στους 200°C . Τα πειραματικά αποτελέσματα για φύλλα BAYFOL σε αυτή τη θερμοκρασία δείχνουν ότι η συμπεριφορά του υλικού δεν είναι πλέον ανεξάρτητη από το ρυθμό παραμόρφωσης. Στην πραγματικότητα, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ρυθμό παραμόρφωσης. Για το λόγο αυτό, για να είμαστε σε θέση να μοντελοποιήσουμε τη φάση (iii) της διαδικασίας θερμομόρφωσης, θα πρέπει οι παράγοντες εξάρτησης του ρυθμού να περιλαμβάνονται στο μοντέλο, για να έχουμε μια ακριβή προσομοίωση της διαδικασίας.

Σαφέστατα μπορούμε να πούμε ότι το μεγαλύτερο τμήμα της έρευνας έχει επικεντρωθεί στη φάση (iii) της θερμομόρφωσης, με την προϋπόθεση ότι το υπό διαμόρφωση φύλλο προσκολλάται εντελώς στην μήτρα κατά την επαφή. Πρέπει βεβαίως να γίνει περαιτέρω έρευνα, για να διευκρινιστεί εάν οι συνθήκες προσκόλλησης είναι κατάλληλες ή αν πρέπει να περιληφθεί στο μοντέλο πιο επιστημονικές προσεγγίσεις όσο αφορά την τριβή.

Για να έχουμε ένα πλήρες μοντέλο θερμομόρφωσης για πολυμερή φύλλα, είναι προφανές ότι οι φάσεις (i) και (iv)-(vi) της διαδικασίας πρέπει να μοντελοποιηθούν. Δεν είναι ξεκάθαρο ακόμα ποια φάση από αυτές έχει τη μεγαλύτερη σημασία στην ολική παραγωγή της κατασκευής πολυμερή υλικών, μιας και η φάση (iii) έχει αποτελεσματικά μοντελοποιηθεί. Περαιτέρω έρευνες είναι απαραίτητες για την θεωρητική πτυχή αυτού του τύπου περιορισμένης παραμόρφωσης του φύλλου. Σαν σημείο εκκίνησης θα αναφερθούμε στη βιβλιογραφία του Andra, ο οποίος μοντελοποίησε το φύλλο, κάτω από απλές παραδοχές ότι είναι μια υπερελαστική μεμβράνη και ότι οι συνθήκες επαφής είναι εκείνες της τέλει προσκόλλησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 7^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1. Bourgin, P., Corneau, I., Saint-Martin, T; A First Step Towards the Modelling of the Thermoforming of Plastic Sheet. In : Journal of Material Processing Technology, Vol.54 (1995).
2. Schmidt, F.M., Agassant, J.F., Bellet, M., Desoutter, L.: Viscoelastic Simulation of PET Stretch/Blow Molding Process. In: Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 64 (1996).
3. Stephenson, M.J., Ryan, M.E.: Experimental Study of the Thermoforming of a Blend of Styrene-Butadiene Copolymer with Polystyrene. In: Polymer Engineering and Science, Vol.37, No. 2(1997).
4. Gao, D.M., Nguyen, K.T., Hetu, J.F., Laroche D., Garcia Rejon, A.: Modeling of Industrial Polymer Processes: Injection Molding and Blow Molding. In: Advanced Performance Materials, Vol.5 (1998).
5. Song, Y.H., Zhang, K.F., Wang, Z.R., Diao, F.X.: 3-D FEM Analysis of the Temperature Field and the Thermal Stress for Plastic Thermalforming. In: Journal Of Materials Processing Technology, Vol. 9 (2000).
6. Nam G.J., Ahn, K.H., Lee, J.W.: Three-Dimensional Simulation of Thermomorfing Process and Its Comparison With Experiments. In: Polymer Engineering and Science, Vol. 40, No.10 (2000).
7. Erchiqui, F., Gakwaya, A., Rachik, M.: Dynamic Finite Element Analysis of Nonlinear Isotropic Hyperelastic and Viscoelastic Materials for Thermomorfing Applications. In: Polymer Engineering and Science, Vol.45 (2005)
8. Unwin, A.P., Ward, I.M., Ugail, H., Bloor, M.I.G., Wilson, M.J.: Optimal Design and Manufacture of Thin-Walled Polystyrene Structures. In: Polymer Engineering and Science, Vol.45 (2005).
9. Gauthier, G., Ajersch, M. A., Boulet, B., Haurani, A., Girard, P., DiRaddo, R., "A New Absorption Based Model for Sheet Reheat in Thermoforming." To appear, ANTEC 2005.
10. B. Moore, B. Boulet, N. Aouf, P. Girard, R. DiRaddo, "Multivariable H₂ Control of the Thermoforming Reheat Process", Proc. 3rd DCDIS Int. Conf. on Engineering Applications and Computational Algorithms, May 15-18, 2003, Guelph, Canada, pp. 330-335.
11. Girard, P., DiRaddo, R., Thomson, V., Boulet, B., "Advanced On-Line Adaptive Control for Thermoforming Large Thermoplastic Sheets" Accepted 2005 SAE World Congress.
12. Ajersch, M., "Modeling and Real-Time Control of Sheet Reheat Phase in Thermoforming", M.Eng. thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, McGill University, 2004.

- 13.** B. Moore, "In-Cycle Control of the Thermoforming Reheat Process", M.Eng. Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, McGill University, 2002, Montreal, Quebec, Canada, 134 pages.
- 14.** Gauthier, G., Boulet, B., "Convergence Analysis of Terminal ILC in the z-Domain" To appear, 2005 ACC.
- 15.** Thomson, V., Boulet, B., Girard, P., DiRaddo, R., "An Agent-Based Architecture for Model-Based Control" 2004 IEEE Conference on Systems Man and Cybernetics, The Hague, The Netherlands, Oct. 10-13, 2004.
- 16.** H. Andra, M.K. Warby, J.R. Whiteman, Contact problems of hyperelastic membranes: existence theory, Math. Meth. Appl. Sci. 23 (2000) 865–895.
- 17.** K.-J. Bathe, Finite Element Procedures, Prentice-Hall, New Jersey, 1999.
- 18.** H.G. deLorenzi, H.F. Nied, Blow moulding and thermoforming of plastics: finite element modeling, Comp. Struct. 26 (1987) 197–206.
- 19.** A.L. Eterovic, K.-J. Bathe, A hyperelastic-based large strain elasto-plastic constitutive formulation with combined isotropic–kinematic hardening using the logarithmic stress and stain measures, Int. J. Numer. Math. Eng. 30 (1990) 1099–1114.
- 20.** Zienkiewicz O C & Taylor R L, The finite element method, Vol I. Basic formulations and linear problems, London: McGraw-Hill, 1989
- 21.** H.F. Nied, S.A. Taylor, H.G. deLorenzi, Three-dimensional finite element simulation of thermoforming, Polym. Eng. Sci. 30 (1990) 1316–1320.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

9. J. L. Throne, “Thermomorfing : From Baby Rattles to Bed Springs and Beyond” Proc. Annual Technical Conference, Society of Plastic Engineers, 2002.
10. Thermomorfing User’s Guide, “Introduction”, http://www.scudc.scu.edu/cmode/tf_doc/bm_intro.html (current Oct. 28th, 2003).
11. R. W. Ogden, Non-Linear Elastic Deformations, Dover, New York, 1997, Chapt. "7".
12. G. Gruenwald, Thermomorfing: A Plastics Processing Guide, Technomic Publishing CO., Lancaster, 1987.
13. M.L. Berins, SPI Plastics Engineering Handbook, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991.
14. P. J. Mooney, Understanding the Industrial Thermoforming Business, Plastics Custom Research Services, Advance, N.C., 2001, pp. 7–12.
15. M. J. Stevenson, Thermoforming Quarterly, Society of Plastic Engineers, Thermoforming Division, Brookfield Center, Conn., Vol. 17, No. 4 (4th Quarter 1998), pp. 9–17.
16. A. Buckel, Thermoforming Tooling, McConnell Co., Inc., Fort Worth, Tex., 2000, pp. 8–12.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

2. Δημ. Ι. Παντελής : Μη μεταλλικά Τεχνικά Υλικά, 1996

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

9. The industrial Thermomorfing Business: Review and Outlook, Plastics Custom Research Services, Advance NC,2004.
10. P. J. Mooney, Understanding the Thermoforming Packaging Business, Plastics Custom Research Services, Advance, N.C., 2002.
11. J.L. Throne, Understanding Thermomorfing, Hanser Gardner Publications, Inc., Cincinnati OH, 1999.
12. Wm. K. McConnell Jr., Ten Fundamentals of Thermoforming: Companion Volume, Society of Plastic Engineers, Brookfield, Conn., 2001.
13. J.L. Throne, Technology of Thermomorfing, Hanser Verlag, Munich, 1996.
14. J. L. Throne, Plastics Process Engineering, Marcel Dekker, New York, 1979, pp. 850–859.
15. K. J. Susnjara, Three Dimensional Trimming & Machining: The Five Axis CNC Router, Thermwood Corp., Dale, Ind., 1999.
16. J. L. Throne, Advances in Thermoforming, Rapra Review Report, Vol. 8, No. 9, London, 1997.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

14. A. Illig, Thermomorfing: A Practical Guide, Hanser Publishers, Munich, 2000.
15. J. Throne, Technology of Thermomorfing, Hanser Publications, Munich 1996.
16. G. Gruenwald, Thermomorfing: A Plastic Processing Guide, Technomic Publishing CO., Lancaster, 1987.
17. Hsiao SW, Chuang JC. A reverse engineering based approach for product form desing. Des Stud 2003.
18. Thompson WB, Owen JC, de St Germain HJ. Feature based reverse engineering of mechanical parts. IEEE Trans Robotics Automat 1999.
19. Poldermann B, Horváth I. Surface design based on parameterized surface features. Proceedings of first international symposium on tools and methods of competitive engineering, Budapest, Hungary, 1996.
20. Fontana M, Giannini F, Meirana M. A free form feature taxonomy Comput Graph Forum 1999.
21. Vergeest JSM, Horváth I, Jeloer J. Practical and computational issues of reverse/forward engineering of shape. In: Meiritz B, editor. Reverse Engineering - 3D scanning and a shortcut to modeling. Aarhus: Danish Technological Institute, 1999.
22. Tam KW, Chan KW. Case study: a novel surface scanning system, J Robotics Syst, 2005.
23. Berg E, Bronsvort WF, Vergeest JSM. Techniques for freeform feature modeling. Proceedings of fourth international symposium on tools and methods of competitive engineering, Wuhan, China, 2002.
24. Gruenwald G. Thermomorfing: a plastic processing guide. 2nd ed. Lancaster: Technomic Pub. Co. Inc., 1998.
25. Vollmer J, Mencl R, Muller H. Improved Laplacian smoothing of noisy surface meshes. Comput Graph Forum 1999.
26. Jang D, Kim K, Jeong J. Adaptive Gregory patch approximation to Z-map data. Int Adv. Manuf. Technol 1999.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

6. J. L. Throne, Understanding Thermomorfing, Hanser Publishers, Munich 1999.
7. K. H. Hartmann, Kunststoffe, Bild 3, 1998.
8. J. L. Throne, Technology of Thermomorfing, Hanser Publishers, Munich, 1996.
9. K. J. Susnjara, Three Dimensional Trimming & Machining: The Five Axis CNC Router, Thermwood Corp., Dale, Ind., 1999.
10. P.J. Mooney, Understanding the Industrial Thermomorfing Business, Plastics Custom Research Services, Advance, N.C., 2001.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- 10.** J. Frados, ed., *Plastics Engineering Handbook*, 4th Edition, Van Nostrand Reinhold, New York, 1976.
- 11.** F. Kreith, *Principles of Heat Transfer*, 2nd Edition, International Textbook, Co., Scranton, 1965.
- 12.** D.G. Keith and A. E. Flecknoe – Brown, *Mod. Plast.*, 1979.
- 13.** G. Kochhahn, Diploma-thesis at the IKV, no D 7354/.
- 14.** W. Predöhl, *Kunststoffe*, 1971.
- 15.** G. Wübken, “Thermisches Verhalten und thermische Auslegung von Spritzgießwerkzeugen” *Technischwissenschaftlicher Bericht des IKV, DS 76/09*, Aachen, Germany.
- 16.** R.F. Craig, “Thermomorfing HDPE in Basic Principles of Thermomorfing” Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1973.
- 17.** G. Wübken, *Thermolog, Bedienungshandbuch*.
- 18.** H.S. Carslaw and I.C. Jaeger “Conduction of Heat in Solids” 2nd Ed. Clarendon Press, 1973.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 7^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1. Bourgin, P., Corneau, I., Saint-Martin, T; A First Step Towards the Modelling of the Thermoforming of Plastic Sheet. In : Journal of Material Processing Technology, Vol.54 (1995).
2. Schmidt, F.M., Agassant, J.F., Bellet, M., Desoutter, L.: Viscoelastic Simulation of PET Stretch/Blow Molding Process. In: Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 64 (1996).
3. Stephenson, M.J., Ryan, M.E.: Experimental Study of the Thermoforming of a Blend of Styrene-Butadiene Copolymer with Polystyrene. In: Polymer Engineering and Science, Vol.37, No. 2(1997).
4. Gao, D.M., Nguyen, K.T., Hetu, J.F., Laroche D., Garcia Rejon, A.: Modeling of Industrial Polymer Processes: Injection Molding and Blow Molding. In: Advanced Performance Materials, Vol.5 (1998).
5. Song, Y.H., Zhang, K.F., Wang, Z.R., Diao, F.X.: 3-D FEM Analysis of the Temperature Field and the Thermal Stress for Plastic Thermalforming. In: Journal Of Materials Processing Technology, Vol. 9 (2000).
6. Nam G.J., Ahn, K.H., Lee, J.W.: Three-Dimensional Simulation of Thermomorfing Process and Its Comparison With Experiments. In: Polymer Engineering and Science, Vol. 40, No.10 (2000).
7. Erchiqui, F., Gakwaya, A., Rachik, M.: Dynamic Finite Element Analysis of Nonlinear Isotropic Hyperelastic and Viscoelastic Materials for Thermomorfing Applications. In: Polymer Engineering and Science, Vol.45 (2005)
8. Unwin, A.P., Ward, I.M., Ugail, H., Bloor, M.I.G., Wilson, M.J.: Optimal Design and Manufacture of Thin-Walled Polystyrene Structures. In: Polymer Engineering and Science, Vol.45 (2005).
9. Gauthier, G., Ajersch, M. A., Boulet, B., Haurani, A., Girard, P., DiRaddo, R., "A New Absorption Based Model for Sheet Reheat in Thermoforming." To appear, ANTEC 2005.
10. B. Moore, B. Boulet, N. Aouf, P. Girard, R. DiRaddo, "Multivariable H² Control of the Thermoforming Reheat Process", Proc. 3rd DCDIS Int. Conf. on Engineering Applications and Computational Algorithms, May 15-18, 2003, Guelph, Canada, pp. 330-335.
11. Girard, P., DiRaddo, R., Thomson, V., Boulet, B., "Advanced On-Line Adaptive Control for Thermoforming Large Thermoplastic Sheets" Accepted 2005 SAE World Congress.
12. Ajersch, M., "Modeling and Real-Time Control of Sheet Reheat Phase in Thermoforming", M.Eng. thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, McGill University, 2004.

- 13.** B. Moore, "In-Cycle Control of the Thermoforming Reheat Process", M.Eng. Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, McGill University, 2002, Montreal, Quebec, Canada, 134 pages.
- 14.** Gauthier, G., Boulet, B., "Convergence Analysis of Terminal ILC in the z-Domain" To appear, 2005 ACC.
- 15.** Thomson, V., Boulet, B., Girard, P., DiRaddo, R., "An Agent-Based Architecture for Model-Based Control" 2004 IEEE Conference on Systems Man and Cybernetics, The Hague, The Netherlands, Oct. 10-13, 2004.
- 16.** H. Andra, M.K. Warby, J.R. Whiteman, Contact problems of hyperelastic membranes: existence theory, Math. Meth. Appl. Sci. 23 (2000) 865–895.
- 17.** K.-J. Bathe, Finite Element Procedures, Prentice-Hall, New Jersey, 1999.
- 18.** H.G. deLorenzi, H.F. Nied, Blow moulding and thermoforming of plastics: finite element modeling, Comp. Struct. 26 (1987) 197–206.
- 19.** A.L. Eterovic, K.-J. Bathe, A hyperelastic-based large strain elasto-plastic constitutive formulation with combined isotropic–kinematic hardening using the logarithmic stress and stain measures, Int. J. Numer. Math. Eng. 30 (1990) 1099–1114.
- 20.** H.F. Nied, S.A. Taylor, H.G. deLorenzi, Three-dimensional finite element simulation of thermoforming, Polym. Eng. Sci. 30 (1990) 1316–1320.