

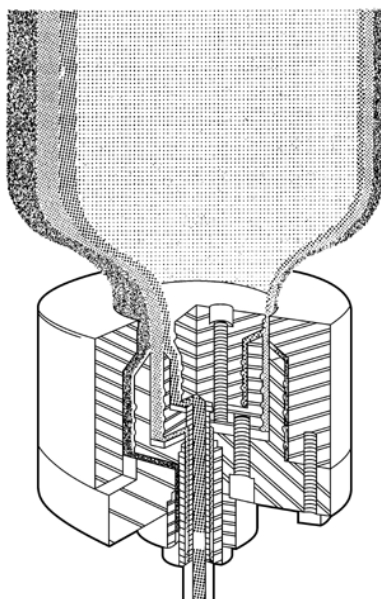


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ IV: ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ

Σημειώσεις μαθήματος:
**“ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ-
ΡΕΟΛΟΓΙΑ”**

Π.Α. ΤΑΡΑΝΤΙΛΗ
Καθηγήτρια ΕΜΠ



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
1. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ - ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΣΤΗ ΡΕΟΛΟΓΙΑ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ	
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	1
1.2 ΙΞΩΔΕΣ	3
1.2.1 Εξάρτηση του ιξώδους από τη Θερμοκρασία και την Πίεση	7
1.2.2 Ιξώδες επιμήκυνσης	9
1.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΛΩΝ ΡΟΩΝ	10
1.3.1 Αρχή διατήρησης μάζας και ορμής	11
1.3.2 Ροή ρευστού υπό πίεση μεταξύ παράλληλων πλακών	17
1.3.3 Ροή ρευστού υπό πίεση σε κυλινδρικό αγωγό (Ροή Poiseuille)	19
1.3.4 Ανάλυση τριχοειδούς ιξωδομέτρου	22
1.3.5 Ροή οπισθέλκουσας μεταξύ επίπεδων πλακών	26
1.3.6 Ροή επιμήκυνσης	27
1.4 ΔΙΟΓΚΩΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΚΑΙ ΑΣΤΑΘΕΙΕΣ ΡΟΗΣ ΤΗΓΜΑΤΟΣ	29
1.4.1 Κάθετε τάσεις	29
1.4.2 Διόγκωση τήγματος	29
1.4.3 Θραύση τήγματος	31
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	34
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	39
2. ΕΚΒΟΛΗ	
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	40
2.2 ΜΟΝΟΚΟΧΛΙΟΣ ΕΚΒΟΛΕΑΣ	40
2.3 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΤΕΡΕΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	44
2.3.1 Ανάπτυξη θερμότητας λόγω τριβής	48
2.3.2 Ζώνη κυλίνδρου με αυλακώσεις	49
2.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΛΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ	51
2.4.1 Θεωρητικό μοντέλο της τήξης κλίνης στερεών (Contiguous Solids Melting, CSM)	52
2.4.2 Τήξη διεσπαρμένων στερεών (Dispersed Solids Melting, DSM)	59
2.5 ΤΥΠΟΙ ΚΟΧΛΙΩΝ	60
2.5.1 Τροποποιήσεις στον κοχλία τυπικού εκβολέα	60
2.5.2 Απαεριούμενος εκβολέας	62
2.6 ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΚΟΧΙΟ ΕΚΒΟΛΕΑ	64
2.6.1 Ροή μεταξύ επίπεδων πλακών	64

2.6.2 Μονοκόχλιος εκβολέας ως αντλία πίεσης	68
2.6.3 Ανάλυση ροής σε μονοκόχλιο εκβολέα (I)	73
2.6.4 Σύνδεση εκβολέα και μήτρα μορφοποίησης	75
2.6.5 Ανάλυση ροής σε μονοκόχλιο εκβολέα (II)	78
2.7 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΚΒΟΛΗΣ ΔΥΟ ΚΟΧΛΙΩΝ	96
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	98
3. ΕΓΧΥΣΗ	
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	99
3.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΓΧΥΣΗΣ	100
3.2.1 Μονάδα έγχυσης	100
3.2.2 Καλούπι μορφοποίησης	104
Αγωγοί διανομής	105
Ζυγοστάθμιση αγωγών διανομής	107
Καλούπια με θερμαινόμενους αγωγούς έγχυσης	109
Ανάπτυξη στερεοποιημένου οριακού στρώματος	110
Πύλη εισόδου κοιλότητας	111
Κοιλότητες μορφοποίησης	112
Σύστημα εξώλκευσης	112
3.2.3 Κλειστικό σύστημα	113
3.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΥΚΛΟΥ ΕΓΧΥΣΗΣ	114
3.3.1 Ο κύκλος έγχυσης	114
3.3.2 Συρρίκνωση	115
3.3.3 Βασικές παράμετροι κύκλου έγχυσης	118
3.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ	121
3.4.1 Πλήρωση καλουπιού	121
3.4.2 Το φαινόμενο πίδακα	123
3.4.3 Γραμμές συγκόλλησης (weld lines)	124
3.4.4 Συρρίκνωση	127
3.4.5 Επίδραση της ροής στη συρρίκνωση	128
3.4.6 Σκέβρωση	131
3.4.7 Επίδραση της παραγωγικής διαδικασίας στις μηχανικές ιδιότητες του μορφοποιημένου αντικειμένου	132
3.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ	134
3.5.1 Περιοχή πλήρους αναπτυγμένης ροής	135
3.5.2 Περιοχή μετώπου	138
3.5.3 Συνολική ροή	140
3.5.4 Ψύξη μορφοποιημένου αντικειμένου	141

3.6 ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΤΗΣ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ	142
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	145
4. ΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΦΥΣΗΜΑ	
4.1 ΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΕΚΒΟΛΗ ΚΑΙ ΦΥΣΗΜΑ	146
4.1.1 Ασυνεχής εκβολή	148
4.1.2 Συνεχής εκβολή	150
4.1.3 Μόρφωση με συνεκβολή και φύσημα	150
4.1.4 Μήτρες	151
4.2 ΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ ΚΑΙ ΦΥΣΗΜΑ	152
4.3 ΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ, ΕΚΤΑΣΗ ΚΑΙ ΦΥΣΗΜΑ	153
4.4 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΦΙΛΜ ΜΕ ΕΚΒΟΛΗ ΚΑΙ ΦΥΣΗΜΑ	155
4.4.1 Συνεκβολή	161
4.4.2 Παραγωγή φιλμ με διαξονικό προσανατολισμό	162
5. ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΜΟΡΦΩΣΗ	163
5.1 ΕΙΔΗ ΜΗΧΑΝΩΝ	164
5.2 ΥΛΙΚΑ	165
5.2.1 Πλαστιζόλες	165
5.2.2 Κονιοποιημένα πολυμερή	166
5.3 ΜΗΤΡΕΣ	166
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ 4,5	167
6. ΙΞΩΔΟΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ	
6.1 ΙΞΩΔΟΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ	168
6.1.1 Μοντέλο Maxwell	169
6.1.2 Μοντέλο Voight	173
6.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟΝ ΕΡΠΥΣΜΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΧΑΛΑΡΩΣΗ ΤΑΣΗΣ	175
6.3 ΔΥΝΑΜΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ	178
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 6ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	181
7. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ	182
7.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ	182
7.2 ΔΟΚΙΜΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ	185
7.3 ΔΟΚΙΜΗ ΣΕ ΚΡΟΥΣΗ	187
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 7ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	194

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ - ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΣΤΗ ΡΕΟΛΟΓΙΑ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Είναι γνωστό ότι η τεράστια διάδοση των πλαστικών υλικών και η εκτόπιση άλλων παραδοσιακών υλικών από τις τεχνικές και κοινόχρηστες εφαρμογές έγκειται στην τεράστια ευελιξία που προσφέρει ο σχετικά νέος αυτός κλάδος των υλικών. Πράγματι, τα πολυμερή μπορούν να συντεθούν με μεγάλη ποικιλία χημικών αντιδράσεων πολυμερισμού και από μεγάλη ποικιλία πρώτων υλών (μονομερή). Αποτέλεσμα αυτού του χαρακτηριστικού είναι η διαθεσιμότητα πολλών προϊόντων και μάλιστα, για κάθε ένα από αυτά διατίθενται εμπορικά και πολλοί εναλλακτικοί τύποι που μπορεί να διαφέρουν σε μοριακό βάρος ή άλλη παράμετρο δομής του υλικού. Όμως η ευελιξία των πλαστικών δεν περιορίζεται στη δυνατότητα που περιγράφεται πιο πάνω. Η ευελιξία επεκτείνεται σημαντικά με την ευχέρεια που παρουσιάζουν τα πλαστικά να ενσωματώνουν διάφορα πρόσθετα και με τον τρόπο αυτό να εμφανίζουν διαφοροποιημένες ιδιότητες, οι οποίες μάλιστα μπορούν να προσχεδιασθούν ανάλογα με το είδος και την αναλογία του προσθέτου.

Οι τροποποιήσεις των πλαστικών που επιτυγχάνονται με την ενσωμάτωση προσθέτων καθώς και η μορφοποίησή τους εξετάζονται από την Επεξεργασία Πολυμερών. Οι σχετικές τεχνολογίες χρησιμοποιούν διαδικασίες τήγματος, εκμεταλλεύονται δηλαδή την ιδιότητα των θερμοπλαστικών να τήκονται με θέρμανση και να στερεοποιούνται με ψύξη σε θεωρητικά άπειρους κύκλους. Με την τήξη και τη ρευστοποίηση του πλαστικού παραλαμβάνεται ένα υλικό με σημαντικά μειωμένο ιξώδες και η κατάσταση αυτή επιτρέπει αφενός την ευχερή του παραμόρφωση με την επιβολή τάσεων ώστε να μορφοποιηθεί και αφετέρου την ενσωμάτωση προσθέτων και την ομοιόμορφη διασπορά τους μέσα στη μάζα του τήγματος.

Βασικοί παράγοντες για την παραλαβή προϊόντος καλής ποιότητας αλλά και για υψηλούς ρυθμούς παραγωγής σε μία πορεία επεξεργασίας πλαστικών, είναι η σταθερότητα του τήγματος, η τιμή των ιξώδους του και το μέγεθος των τριβών μεταξύ πλαστικού και μεταλλικών επιφανειών του μηχανήματος στο οποίο γίνεται η επεξεργασία. Η θερμική σταθερότητα του τήγματος αποκλείει την απόσυνθεσή του, άρα και την αλλοίωση του προϊόντος. Με τον όρο αποσύνθεση εννοείται κάθε χημική αντίδραση που μεταβάλλει τη δομή του πλαστικού και υποβαθμίζει έτσι τις φυσικές του ιδιότητες. Παράλληλα, η θερμική σταθερότητα ενός πλαστικού δίνει την δυνατότητα της επεξεργασίας σε υψηλότερη θερμοκρασία οπότε μειώνεται το ιξώδες και αυξάνεται ο ρυθμός παραγωγής.

Επίσης, οι τριβές μεταξύ του πλαστικού και των μεταλλικών τμημάτων των μηχανών επεξεργασίας, καθορίζουν το χρόνο παραμονής των μορίων του πλαστικού στη διεπιφάνεια και έτσι επιδρούν άμεσα στη θερμική αποσύνθεση του πλαστικού. Η

ρύθμιση των παραμέτρων που αναφέρθηκαν γίνεται με την προσθήκη σταθεροποιητών και λιπαντικών.

Το πλαστικά, ως οργανικά υλικά, παρουσιάζουν ευπάθεια σε διάφορες καταπονήσεις όπως κατά την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες ιδίως με την παρουσία οξυγόνου, κατά την προσβολή τους από την υπεριώδη ακτινοβολία κλπ. Στην περίπτωση λοιπόν που γίνεται επεξεργασία ενός τήγματος σε υψηλή θερμοκρασία σε συνδυασμό μάλιστα με μηχανική καταπόνηση (διάτμηση) και συχνά μάλιστα σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα, είναι αναπόφευκτο να λαμβάνει χώρα μια μείωση του μοριακού του βάρους λόγω σχάσης των πολυμερικών αλυσίδων καθώς και άλλες θερμοοξειδωτικές επιδράσεις στη μάζα του τήγματος. Όλα αυτά τα φαινόμενα οδηγούν σε προϊόν με υποβαθμισμένες ιδιότητες και για το λόγο αυτό, δίνεται πάντοτε προσοχή να εφαρμόζεται οι χαμηλότερες δυνατές θερμοκρασίες και οι μικρότεροι χρόνοι έκθεσης του τήγματος σε αυτές, καθώς επίσης και οι κατά το δυνατόν μικρές διατμητικές καταπονήσεις που μπορούν να προκαλέσουν υπερθέρμανση. Προσοχή δίνεται επίσης στο σχεδιασμό των μηχανών επεξεργασίας πολυμερικών τηγμάτων ώστε να αποφεύγονται τα στάσιμα στρώματα, γεγονός που επιταχύνει τον αποπολυμερισμό. Βεβαίως, στις περιπτώσεις των πιο ευπαθών πολυμερών και όταν είναι αναπόφευκτη η έντονη καταπόνησή τους χρησιμοποιούνται οι θερμικοί σταθεροποιητές που ανήκουν κι αυτοί στην κατηγορία των προσθέτων.

Μια εναλλακτική προς την τήξη διεργασία είναι η διάλυση των πολυμερών. Με την διάλυση επιτυγχάνεται και πάλι μείωση του ιξώδους του πολυμερούς και κατά συνέπεια είναι δυνατόν να γίνουν με άνεση οι διαδικασίες μορφοποίησης και τροποποίησης με ενσωμάτωση προσθέτων. Πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι οι τεχνολογίες διαλύματος, αν και μας εξασφαλίζουν πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες από αυτές που απαιτούνται για την κατεργασία των αντίστοιχων πολυμερών με τήξη, παρουσιάζουν σημαντικές ιδιομορφίες και περιορισμούς σε σχέση με αυτές του τήγματος. Πράγματι, τα εμπορικά πολυμερή, λόγω των σχετικά υψηλών τιμών μοριακού βάρους που παρουσιάζουν, μπορούν συνήθως να διαλυθούν σε οργανικούς διαλύτες σε αναλογίες μέχρι 10-15%. Πάνω από τις αναλογίες αυτές εμφανίζονται πολύ υψηλά ιξώδη και, κατά συνέπεια, νέες δυσχέρειες στην διακίνηση και επεξεργασία τους. Εκτός λοιπόν από τη χρήση διαλυτών και την ανάγκη ανακύκλωσής τους, διαδικασία που συνεπάγεται ιδιαίτερο κόστος, οι σχετικά μικρές συγκεντρώσεις έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση τεράστιας συρρίκνωσης όγκου όταν ένα αντικείμενο μορφοποιηθεί και στη συνέχεια απομακρυνθεί ο διαλύτης. Για το λόγο η τεχνολογία διαλύματος περιορίζεται στις περιπτώσεις όπου το τελικό αντικείμενο έχει μια τουλάχιστον διάσταση πολύ μικρή, όπως παραγωγή φιλμ, ινών κλπ. Συνηθισμένη μάλιστα εφαρμογή διαλυμάτων πολυμερών γίνεται με τα βερνίκια που εφαρμόζονται σε μια επιφάνεια και με την απομάκρυνση του διαλύτη ξηραίνεται η επικάλυψη και παίρνει την μορφή ενός λεπτού φιλμ προσκολλημένου επάνω στην επιφάνεια επίστρωσης.

Με βάση τις ανωτέρω δυνατότητες για την επεξεργασία και μορφοποίηση των πολυμερών καθίσταται προφανής η ανάγκη της μελέτης και γνώσης των ρεολογικών χαρακτηριστικών καθώς και της αντίστοιχης συμπεριφοράς των τηγμάτων. Για το

λόγο αυτό παρουσιάζονται στη συνέχεια ορισμένα κεφάλαια που αναφέρονται στα χαρακτηριστικά αυτά των πολυμερών.

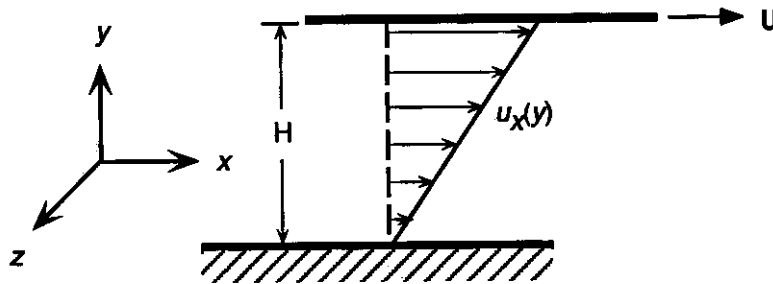
1.2 ΙΞΩΔΕΣ

Το ιξώδες αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα ενός ρευστού και αντιπροσωπεύει την αντίστασή του στη ροή. *Νευτωνικά* είναι τα ρευστά στα οποία η διατμητική τάση και ο ρυθμός παραμόρφωσης συνδέονται με μια γραμμική σχέση:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad [1.1] \quad \text{ή}$$

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [1.2]$$

όπου τ η ασκούμενη διατμητική τάση, μ ο συντελεστής του νευτωνικού (διατμητικού) ιξώδους και $\dot{\gamma}$ ($\dot{\gamma} \equiv d\gamma/dt$) ο ρυθμός διατμητικής παραμόρφωσης του υλικού.



Σχήμα 1.1: Ροή διάτμησης μεταξύ επίπεδων παράλληλων πλακών, όπου η πάνω πλάκα κινείται με σταθερή ταχύτητα U .

Για τον ορισμό του ιξώδους θεωρούμε ότι ρευστό βρίσκεται μεταξύ δύο επίπεδων πλακών εκ των οποίων η μια είναι ακίνητη και η άλλη κινείται με σταθερή ταχύτητα U , όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Για την ανάλυση της απλής αυτής ροής χρησιμοποιούμε σύστημα ορθογώνιων συντεταγμένων όπου ο x άξονας είναι προσανατολισμένος κατά τη φορά της διάτμησης και ο y άξονας είναι κάθετος στην επιφάνεια των επιπέδων. Η ροή είναι μονοδιάστατη κατά τον άξονα x (η συνιστώσα της ταχύτητας u_x είναι συνάρτηση μόνο του y). Η διατμητική παραμόρφωση γ ορίζεται ως ο λόγος της παραμόρφωσης ενός στοιχειώδη όγκου στην x -κατεύθυνση (dx) προς αυτή στην y -κατεύθυνση (dy), κατά τη διάρκεια της διατμητικής παραμόρφωσης. Αποδεικνύεται ότι στη γεωμετρία αυτή ο ρυθμός διάτμησης $\dot{\gamma}$ είναι ίσος με τη βαθμίδα της ταχύτητας:

$$\dot{\gamma} \equiv \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dy} \right) = \frac{d}{dy} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{du_x}{dy} \quad [1.3]$$

όπου η u_x είναι η ταχύτητα του ρευστού στην x -κατεύθυνση.

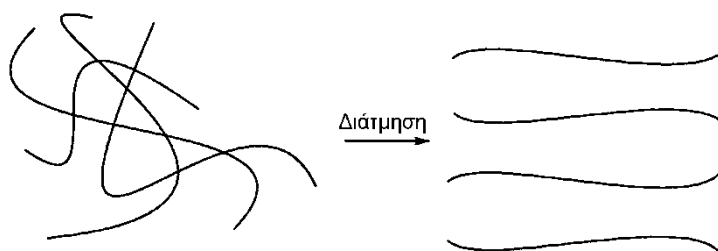
Ο μέγιστος ρυθμός διάτμησης αναπτύσσεται στην επιφάνεια της κινούμενης πλάκας και είναι ίσος με U/H όπου U η σταθερή ταχύτητα της πάνω πλάκας που κινείται στη x -κατεύθυνση και H η απόσταση μεταξύ των δύο παράλληλων πλακών. Ο ελάχιστος

ρυθμός διάτμησης συμβαίνει στην ακίνητη κάτω πλάκα ($y=0$) με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει ολίσθηση του ρευστού στην επιφάνειά της, επομένως $u_x(0)=0$.

Στα νευτωνικά ρευστά το ιξώδες αποτελεί σταθερά (ανεξάρτητη από το ρυθμό διάτμησης), η τιμή της οποίας εξαρτάται από τη μοριακή φύση και την κατάσταση (θερμοκρασία και πίεση) του ρευστού.

Στα *μη νευτωνικά ρευστά*, η σχέση μεταξύ τάσης και ρυθμού παραμόρφωσης δεν είναι γραμμική, για το λόγο αυτό εισάγεται η έννοια του *φαινομενικού ιξώδους* η_ϕ οι τιμές του οποίου μπορεί να είναι συνάρτηση του ρυθμού παραμόρφωσης ή/και της τάσης ή/και του χρόνου.

Σε πολυμερικά διαλύματα και τήγματα παρατηρείται το φαινόμενο το ιξώδες να μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης (du/dy) και το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *διατμητική λέπτυνση* (shear-thinning). Η εξήγηση σε μοριακό επίπεδο της διατμητικής λέπτυνσης βασίζεται στην επίδραση της διατμητικής παραμόρφωσης στις *μοριακές εμπλοκές* (entanglements) όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2. Σε χαμηλούς ρυθμούς διάτμησης οι μοριακές εμπλοκές των πολυμερικών αλυσίδων αποτελούν εμπόδιο στη ροή διάτμησης με αποτέλεσμα το ιξώδες να είναι υψηλό. Με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης, οι αλυσίδες αρχίζουν να προσανατολίζονται προς την κατεύθυνση της ροής με αποτέλεσμα την απεμπλοκή της μιας από την άλλη, και κατά συνέπεια την πτώση του ιξώδους. Τέλος, σε υψηλούς ρυθμούς διάτμησης οι μοριακές αλυσίδες προσανατολίζονται πλήρως στην κατεύθυνση της ροής. Στο σημείο αυτό οι μοριακές εμπλοκές δεν είναι δυνατό να παραμείνουν περαιτέρω σταθερές και το ιξώδες αποκτά χαμηλές τιμές, οι οποίες είναι ανεξάρτητες από το ρυθμό διάτμησης. Η δεύτερη αυτή περιοχή Νευτωνικής συμπεριφοράς παρατηρείται σε κάποιες περιπτώσεις διαλυμάτων πολυμερών αλλά είναι πολύ σπάνια σε τήγματα. Στην τελευταία περίπτωση απαιτούνται τόσο υψηλοί ρυθμοί διάτμησης για τον προσανατολισμό των πολυμερικών αλυσίδων ώστε αυτές να υφίστανται αποικοδόμηση.



Σχήμα 1.2: Ιδανική παρουσίαση της επίδρασης της διάτμησης στις μοριακές εμπλοκές πυκνών πολυμερικών διαλυμάτων και τηγμάτων.

Σε σπάνιες περιπτώσεις το ιξώδες αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης. Ρευστά που παρουσιάζουν αυτή τη συμπεριφορά περιορίζονται σε πάστες πολυβινυλοχλωριδίου (PVC) και πολυμερικά τήγματα στα οποία αναπτύσσεται κρυσταλλικότητα με την επιβολή διατμητικών τάσεων (shear induced crystallization).

Χαρακτηριστική τιμή του ιξώδους αποτελεί το *οριακό ιξώδες για μηδενικό ρυθμό διάτμησης* (η_0), το οποίο είναι συνάρτηση του μοριακού βάρους του πολυμερούς. Ορίζεται επίσης μια *κρίσιμη τιμή του μοριακού βάρους* M_{cr} όπου αρχίζουν να γίνονται αισθητές οι επιδράσεις των μοριακών εμπλοκών.

Υπάρχουν πολλές σχέσεις που συνδέουν το φαινομενικό ιξώδες με το ρυθμό παραμόρφωσης, οι περισσότερες από τις οποίες είναι εμπειρικές. Μια απλή σχέση προσαρμογής δεδομένων ιξώδους για πολυμερικά τήγματα αποτελεί ο *εκθετικός νόμος* (power-law) των *Ostwald-de Waele*:

$$\tau = m\dot{\gamma}^n \quad [1.4] \quad \text{ή}$$

$$\eta_\phi = m\dot{\gamma}^{n-1} \quad [1.5]$$

όπου ο συνετελεστής m ονομάζεται *δείκτης συνοχής* (σε $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$) και ο εκθέτης n ονομάζεται *δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς* (σταθερά αδιάστατη) και εκφράζει το βαθμό της απόκλισης από τη νευτωνική συμπεριφορά του ρευστού.

Για $n=1$ το ρευστό είναι νευτωνικό, ενώ για τιμές $n<1$ τα πολυμερή παρουσιάζουν συμπεριφορά διατμητικής λέπτυνσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόκλιση του δείκτη n από τη μονάδα τόσο πιο έντονη είναι η μη νευτωνική συμπεριφορά του ρευστού.

Ο δείκτης συνοχής m εξαρτάται εκθετικά από τη θερμοκρασία. Μια σχέση που περιγράφει αυτή την εξάρτηση είναι η εξής:

$$m(T) = m_0 e^{-\alpha(T-T_0)} \quad [1.6]$$

όπου m_0 είναι η τιμή του δείκτη συνοχής σε θερμοκρασία αναφοράς T_0 .

Από τον εκθετικό νόμο λαμβάνεται:

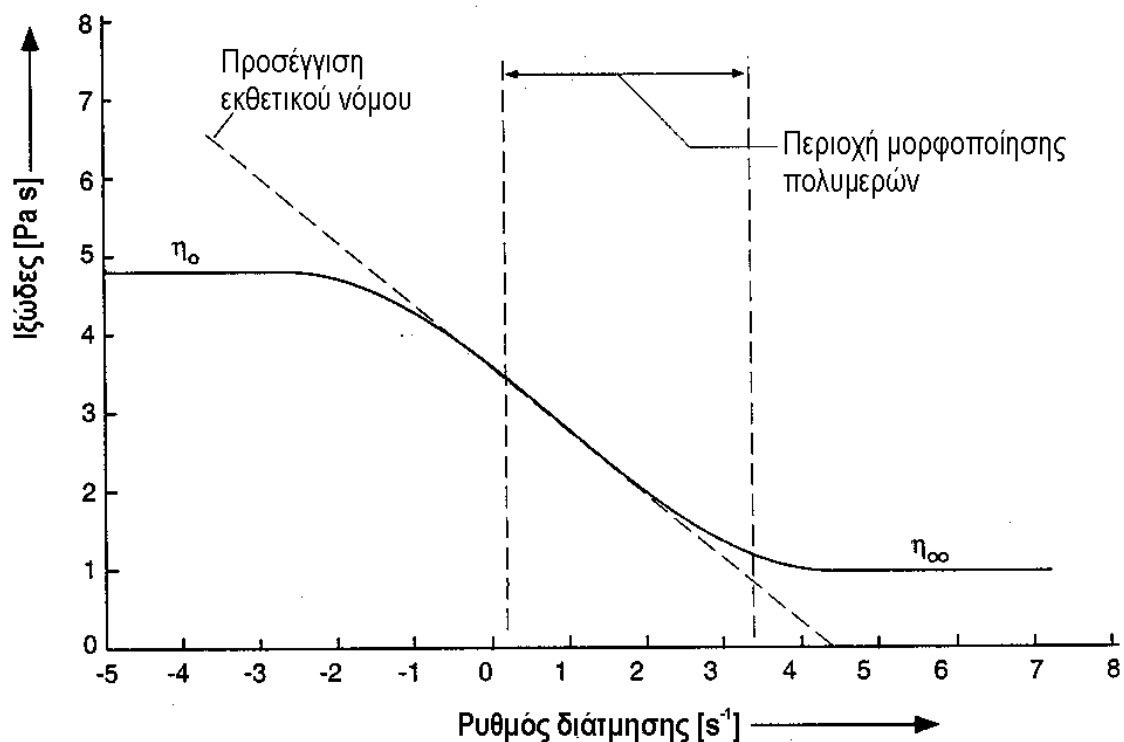
$$\log \eta = \log m + (n-1) \log \dot{\gamma} \quad [1.7]$$

Αντιπροσωπευτικές τιμές των παραμέτρων m και n του εκθετικού νόμου και η περιοχή των ρυθμών διάτμησης $\dot{\gamma}$ που μπορούν να εφαρμοσθούν για μερικά σημαντικής εμπορικής σημασίας πολυμερή παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Το γενικό σχήμα της καμπύλης ιξώδες-ρυθμός παραμόρφωσης για ένα ψευδοπλαστικό τήγμα πολυμερούς παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.3. Σε χαμηλούς ρυθμούς διατμητικής παραμόρφωσης, το ιξώδες είναι ανεξάρτητο του ρυθμού διάτμησης. Η περιοχή των τιμών του ρυθμού διάτμησης που αναπτύσσονται στις περισσότερες διεργασίες μορφοποίησης πολυμερών είναι $1-10,000\text{s}^{-1}$. Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 1.3 σε αυτή την περιοχή η καμπύλη ιξώδους-ρυθμού διάτμησης προσεγγίζεται με γραμμική σχέση, γεγονός που είναι αληθινό για πολλά πολυμερή. Η γραμμική σχέση σε διάγραμμα με λογαριθμικούς άξονες υποδεικνύει ότι οι μεταβλητές συνδέονται με εξίσωση εκθετικού νόμου.

Πολυμερές	Θερμοκρασία (°C)	Περιοχή $\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	m (Ns ⁿ m ⁻²)	n
Πολυστυρένιο	190	100-4500	4.47x10 ⁴	0.22
	210	100-4500	2.38x10 ⁴	0.25
	225	100-5000	1.56x10 ⁴	0.28
Πολυπροπυλένιο	180	100-400	6.79x10 ³	0.37
	190	100-3500	4.89x10 ³	0.41
	200	100-4000	4.35x10 ³	0.41
Πολυανθρακικά	180	100-1000	8.39x10 ³	0.64
	200	100-1000	4.31x10 ³	0.67
	220	100-1000	1.08x10 ³	0.80

Πίνακας 1.1: Παράμετροι του εκθετικού νόμου για αντιπροσωπευτικά πολυμερή.



Σχήμα 1.3: Εξέλιξη του ιξώδους σε συνάρτηση με το ρυθμό διάτμησης για ψευδοπλαστική συμπεριφορά.

Η εξίσωση 1.5 αποτελεί αντιπροσωπευτική έκφραση για την εξάρτηση του ιξώδους από το ρυθμό διάτμησης μόνο στην περιοχή διατμητικών τάσεων όπου η γραφική παράσταση $[\log \eta]$ σε συνάρτηση προς $\log \dot{\gamma}$ είναι γραμμική. Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 1.2, στις περισσότερες από τις σημαντικές διεργασίες μορφοποίησης, όπως η εκβολή και η έγχυση, η περιοχή των ρυθμών διάτμησης που αναπτύσσονται βρίσκονται στην περιοχή που ισχύει ο εκθετικός νόμος.

Διεργασία	Περιοχή ρυθμού διάτμησης $\dot{\gamma}$ (s^{-1})
Θερμή συμπίεση	1-10
Κυλίνδρωση	$10-10^2$
Εκβολή	10^2-10^3
Έγχυση	10^3-10^4

Πίνακας 1.2: Τυπικές τιμές ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για διεργασίες μορφοποίησης πολυμερών.

1.2.1 Εξάρτηση του ιξώδους από τη Θερμοκρασία και την Πίεση

Σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. 100°C πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T_g), η εξάρτηση του φαινομενικού ιξώδους των πολυμερών από τη θερμοκρασία ακολουθεί τη *σχέση του Arrhenius* :

$$\eta = \eta_r \exp \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right] \quad [1.8]$$

όπου η_r είναι το ιξώδες σε κάποια θερμοκρασία αναφοράς T_r ,

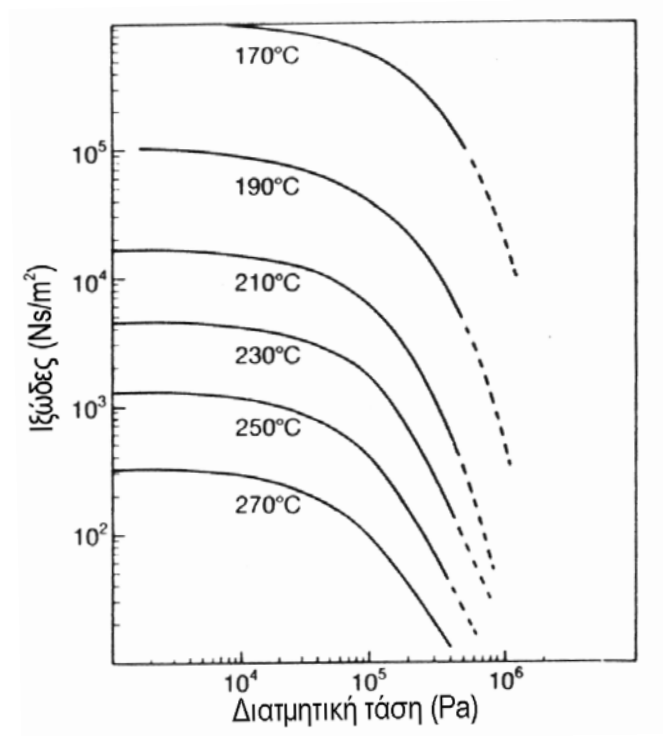
E η ενέργεια ενεργοποίησης (τυπικές τιμές 21 με 210 kJ/mol) και

R η παγκόσμια σταθερά των αερίων με τιμές 1.987 cal/mol K ή 8.314 J/mol K.

Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες στην περιοχή της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης, $T_g < T < T_g + 100^\circ\text{C}$, το ιξώδες αυξάνει πολύ πιο γρήγορα με τη μείωση της θερμοκρασίας από αυτό που προβλέπεται από τη σχέση του Arrhenius. Στην περίπτωση αυτή η εξάρτηση του ιξώδους δίνεται από τη σχέση των Williams, Landell και Ferry, *εξίσωση WLF* :

$$\log \eta = \log \eta_{T_g} - \left[\frac{17.44(T - T_g)}{51.6 + T - T_g} \right] \quad [1.9]$$

Στο Σχήμα 1.4 φαίνεται η εξάρτηση του φαινομενικού ιξώδους του πολυ(μεθακρυλικού μεθυλίου) (PMMA) από τη διατμητική τάση, για θερμοκρασίες από 170 μέχρι 270°C .



Σχήμα 1.4: Εξάρτηση του φαινομενικού ιξώδους από την τάση για θερμοκρασίες μεταξύ 170 και 270°C πολύ(μεθακρυλικού μεθυλίου).

Η εξάρτηση του ιξώδους από την πίεση είναι πολύ σημαντική παράμετρος κατά το σχεδιασμό των διεργασιών μορφοποίησης των πολυμερών, όπως στην περίπτωση της έγχυσης όπου ασκούνται πολύ υψηλές πιέσεις. Για σταθερή θερμοκρασία η επίδραση της πίεσης στο ιξώδες προσεγγίζεται με τη σχέση:

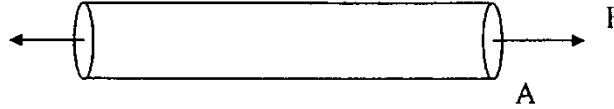
$$\ln\left(\frac{\eta}{\eta_r}\right) = \beta(P - P_r) \quad [1.10]$$

όπου η_r είναι το ιξώδες αναφοράς το οποίο αντιστοιχεί σε πίεση αναφοράς P_r , και β είναι ένας συντελεστής πίεσης με τιμές στην περιοχή $0.87\text{-}4.93 \times 10^{-8} \text{Pa}^{-1}$.

Για παράδειγμα το ιξώδες τήγματος πολυστυρενίου (PS) στους 250°C περίπου διπλασιάζεται με την αύξηση της πίεσης από 13.8 σε 27.6 MPa.

1.2.2 Ιξώδες επιμήκυνσης

Για τον ορισμό του *ιξώδους επιμήκυνσης* (extensional viscosity) θα θεωρήσουμε ρευστό κυλινδρικού σχήματος το οποίο υφίσταται μονοαξονική έκταση:



Σχήμα 1.5: Στοιχείο ρευστό σε αξονική επιμήκυνση

Τα πολυμερικά τήγματα έχουν σημαντική αντοχή και μπορούν να υποστούν μονοαξονική έκταση χωρίς να επέλθει θραύση, και σε αυτή την ιδιότητα στηρίζεται η παραγωγική διαδικασία ινών και άλλων καταναλωτικών προϊόντων.

Το ιξώδες επιμήκυνσης ορίζεται ως:

$$\eta_e = \frac{\sigma_{11}}{\dot{\epsilon}} \quad [1.11]$$

όπου σ_{11} είναι η τάση επιμήκυνσης: $\sigma_{11} = F / A$ και

ο ρυθμός επιμήκυνσης $\dot{\epsilon}$ ορίζεται ως: $\dot{\epsilon} = \frac{\partial u_x}{\partial x}$

Για τα νευτωνικά ρευστά αποδεικνύεται ότι ισχύει η ακόλουθη σχέση μεταξύ ιξώδους διάτμησης και ιξώδους επιμήκυνσης:

$$\eta_e = 3\eta \quad \text{σχέση του Trouton} \quad [1.12]$$

Για τα πολυμερή όμως η σχέση Trouton δεν ισχύει.

$$\text{Συνήθως } \eta_e = 10\eta \approx 10^2 \eta \quad [1.13]$$

Ένας άλλος όρος χρήσιμος κατά την μορφοποίηση πολυμερών είναι η *αντοχή τήγματος* (melt strength) που αποτελεί μέτρο των ιδιοτήτων επιμήκυνσης πολυμερικών τηγμάτων. Αντιπροσωπεύει τη μέγιστη τάση που μπορεί να εφαρμοσθεί σε τήγμα χωρίς αυτό να υποστεί ρήξη. Η ιδιότητα αυτή συνδέεται αντίστροφα με την ικανότητα να επιμηκυνθεί το τήγμα όταν υφίσταται τανυσμό κατά την έξοδό του από οπές μικρής διατομής. Γραμμικές πολυολεφίνες όπως το γραμμικό πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LLDPE), το υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE) και το πολυπροπυλένιο (PP) έχουν γενικά χαμηλή αντοχή τήγματος.

1.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΛΩΝ ΡΟΩΝ

Στο μεγαλύτερο μέρος των τεχνικών μορφοποίησης τα πολυμερή βρίσκονται στην κατάσταση του τήγματος. Επομένως γίνεται φανερό ότι για την ανάλυση και το σχεδιασμό μιας διεργασίας μορφοποίησης πρέπει να γνωρίζουμε τις βασικές αρχές της ρεολογίας τηγμάτων πολυμερών.

Η ρεολογία περιγράφει την παραμόρφωση ενός στερεού, υγρού ή αερίου υπό την επίδραση τάσεων. Τα ιδανικά στερεά παραμορφώνονται ελαστικά, δηλαδή η ενέργεια που απαιτείται για την παραμόρφωσή τους ανακτάται πλήρως όταν αφαιρούνται οι τάσεις.

Τα ιδανικά ρευστά παραμορφώνονται αναντίστρεπτα, η ενέργεια που απαιτείται για την παραμόρφωσή τους μεταπίπτει σε θερμική, μη ανακτήσιμη ενέργεια στο ρευστό. Τα τήγματα των πολυμερών εμφανίζουν τόσο ιξώδη όσο και ελαστική συμπεριφορά, ιξωδοελαστική συμπεριφορά.

Οι διαδικασίες μορφοποίησης πολυμερών όπως η εκβολή, η έγχυση, η εμφύσηση καθώς και άλλες είναι αρκετά σύνθετες και η μοντελοποίησή τους αποτελεί επίπονη εργασία. Για το λόγο αυτό, πολλές διεργασίες μορφοποίησης αναλύονται σε απλούστερες διεργασίες ροής στις οποίες μπορεί να επιτευχθεί μαθηματική ανάλυση και αριθμητική επίλυση με τη χρήση απλοποιημένων προσεγγίσεων και περιορισμών. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να γίνει κατανοητό πως οι διάφορες παράμετροι μιας παραγωγικής διαδικασίας επηρεάζουν την τελική απόδοση της διεργασίας.

Όλες οι διεργασίες μορφοποίησης πολυμερών περιλαμβάνουν τη ροή πολυμερικών τηγμάτων ή διαλυμάτων υπό την επίδραση βαθμίδας πίεσης ή/και διατμητικών τάσεων. Λόγω ότι τα πυκνά διαλύματα και τα τήγματα πολυμερών είναι μη Νευτώνικά ρευστά, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την ακριβή σχέση που συνδέει την τάση και την παραμόρφωση, ούτως ώστε να γίνει ανάλυση της ροής ακόμα και στην περίπτωση της απλούστερης γεωμετρίας.

Παραδείγματα αποτελούν η ροή υπό πίεση σε μεγάλου μήκους κυλινδρικούς αγωγούς καθώς και μεταξύ παράλληλων πλακών.

Η επίλυση ενός απλού προβλήματος ροής περιλαμβάνει την έκφραση της ταχύτητας ως συνάρτηση των συντεταγμένων του συστήματος που μελετάται.

Σε γενικές γραμμές η επίλυση ενός προβλήματος ροής μπορεί να περιγραφεί με τις τρεις εξισώσεις των φαινομένων μεταφοράς δηλαδή της εξίσωσης συνέχειας, κίνησης και ενέργειας που βασίζονται στις αρχές διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας αντίστοιχα.

1.3.1 Αρχή διατήρησης μάζας και ορμής

i. Εξίσωση συνέχειας (Αρχή διατήρησης μάζας)

Αν ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού και u_x, u_y, u_z οι συνιστώσες της ταχύτητάς του σε ένα σημείο, η αρχή διατήρησης της μάζας σε ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων (x, y, z) γράφεται ως εξής:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho u_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho u_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z) \right] \quad [1.14]$$

Με εκτέλεση των πράξεων στο δεξιό σκέλος της παραπάνω εξίσωσης λαμβάνουμε:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left(u_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + u_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + u_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) = -\rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \quad [1.15]$$

Και οι δύο αυτές εξισώσεις αποτελούν εκφράσεις της εξίσωσης της συνέχειας.

Χρησιμοποιώντας το ανάδελτα $\nabla = \delta_x \frac{\partial}{\partial x} + \delta_y \frac{\partial}{\partial y} + \delta_z \frac{\partial}{\partial z}$,

όπου $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ οι συνιστώσες του μοναδιαίου ανύσματος, η εξίσωση [1.14] γράφεται:

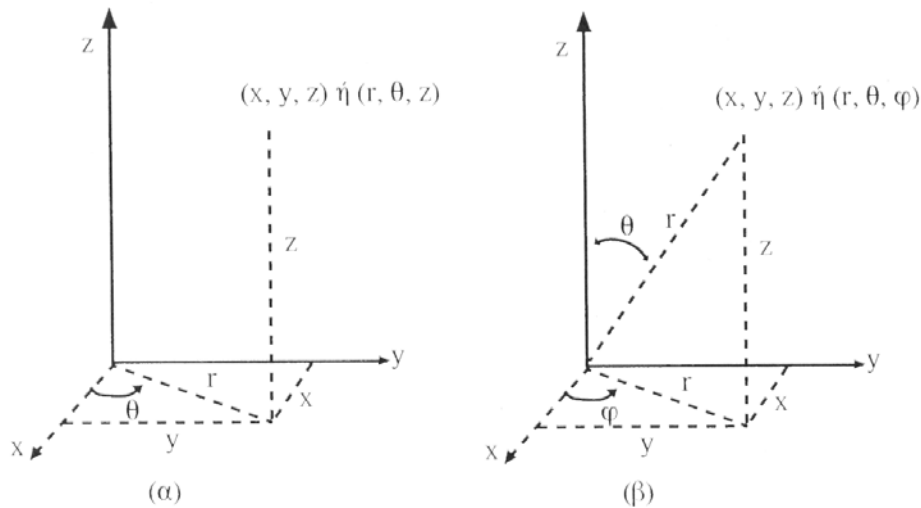
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho \mathbf{u}) = -\text{div}(\rho \mathbf{u}) \quad [1.16]$$

Με τη χρήση της “ουσιαστικής παραγώγου” (“substantial derivative”): $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla$, η εξίσωση [1.15] γράφεται :

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho(\nabla \cdot \mathbf{u}) \quad [1.17]$$

Για ασυμπίεστα ρευστά η πυκνότητα ρ είναι ανεξάρτητη από τις συντεταγμένες x, y, z και το χρόνο t και επομένως οι εξισώσεις [1.15] & [1.17] παίρνουν τη μορφή:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad [1.18]$$



Σχήμα 1.6: Κυλινδρικές (α) και σφαιρικές (β) συντεταγμένες.

Ορθογώνιες συντεταγμένες (x, y, z)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0$$

Κυλινδρικές συντεταγμένες (r, θ, z)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0$$

Σφαιρικές συντεταγμένες (r, θ, ϕ)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r^2 v_r) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho v_\theta \sin \theta) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi}(\rho v_\phi) = 0$$

Πίνακας 1.3: Η εξίσωση συνέχειας σε διάφορα συστήματα συντεταγμένων.

Ορθογώνιες συντεταγμένες (x, y, z)

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

Κυλινδρικές συντεταγμένες (r, θ, z)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

Σφαιρικές συντεταγμένες (r, θ, ϕ)

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}(r^2 v_r) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta}(v_\theta \sin \theta) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} = 0$$

Πίνακας 1.4: Η εξίσωση συνέχειας σε διάφορα συστήματα συντεταγμένων για ασυμπίεστα ρευστά.

ii. Η εξίσωση κίνησης (Αρχή διατήρησης της ορμής)

Η εξίσωση κίνησης προκύπτει από την αρχή διατήρησης της ορμής και έχει τη μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) = -[\nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u}] + [\nabla \cdot \boldsymbol{\pi}] + \rho \mathbf{g} \quad [1.19] \quad (\text{εξίσωση Cauchy})$$

όπου $\boldsymbol{\pi}$ είναι ο τανυστής των συνολικών τάσεων και $\mathbf{g}$ είναι το άνωσμα της τοπικής επιτάχυνσης της βαρύτητας.

Ο πρώτος όρος στο δεξιό σκέλος της εξίσωσης είναι ο όρος συναγωγής (convection) και οφείλεται στη ροή του ρευστού. Ο δεύτερος όρος είναι ο όρος αγωγής (conduction) και οφείλεται στις διαμοριακές δυνάμεις που ασκούνται στο υλικό σημείο του ρευστού από την υπόλοιπη μάζα του ρευστού. Ο τρίτος όρος οφείλεται σε εξωτερικά πεδία δυνάμεων, όπως το πεδίο βαρύτητας.

Ο τανυστής των συνολικών τάσεων $\boldsymbol{\pi}$ απαρτίζεται από δύο όρους:

$$\boldsymbol{\pi} = -P\boldsymbol{\delta} + \boldsymbol{\tau} \quad [1.20]$$

όπου $\boldsymbol{\tau}$ είναι ο τανυστής των διατμητικών τάσεων που ασκούνται στο ρευστό, P οι δυνάμεις πίεσης και $\boldsymbol{\delta}$ ο μοναδιαίος τανυστής.

$$\boldsymbol{\delta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad [1.21]$$

Με αντικατάσταση την εξίσωση [1.20] στις [1.18] και [1.19] λαμβάνονται αντίστοιχα:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) = -[\nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u}] - \nabla P + [\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}] + \rho \mathbf{g} \quad [1.22]$$

ή διαφορετικά:

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla P + [\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}] + \rho \mathbf{g} \quad [1.23]$$

Ορθογώνιες συντεταγμένες (x, y, z)
$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x$
$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g_y$
$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z$
Κυλινδρικές συντεταγμένες (r, θ, z)
$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\tau_{rr})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \right) + \rho g_r$
$\rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \tau_{r\theta})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} \right) + \rho g_\theta$
$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\tau_{rz})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z$
Σφαιρικές συντεταγμένες (r, θ, φ)
$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{v_\phi}{r \sin \theta} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} - \frac{v_\theta^2 + v_\phi^2}{r} \right) =$ $-\frac{\partial P}{\partial r} + \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \tau_{rr})}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tau_{r\theta} \sin \theta) - \frac{\tau_{\theta\theta} + \tau_{\phi\phi}}{r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \tau_{r\phi}}{\partial \phi} \right) + \rho g_r$
$\rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_\phi}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\theta}{\partial \phi} + \frac{v_r v_\theta}{r} - \frac{v_\phi^2 \cot \theta}{r} \right) =$ $-\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \tau_{r\theta})}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial (\tau_{\theta\theta} \sin \theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \tau_{\theta\phi}}{\partial \phi} + \frac{\tau_{r\theta}}{r} - \frac{\cot \theta}{r} \tau_{\phi\phi} \right) + \rho g_\theta$
$\rho \left(\frac{\partial v_\phi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\phi}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\phi}{\partial \theta} + \frac{v_\phi}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} + \frac{v_r v_\phi}{r} + \frac{v_\theta v_\phi}{r} \cot \theta \right) =$ $-\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial P}{\partial \phi} + \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\phi}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta\phi}}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \tau_{\phi\phi}}{\partial \phi} + \frac{\tau_{r\phi}}{r} + \frac{2 \cot \theta}{r} \tau_{\theta\phi} \right) + \rho g_\phi$

Πίνακας 1.5: Η εξίσωση κίνησης σε διάφορα συστήματα συντεταγμένων.

Για τα πολυμερή, στις συνήθεις συνθήκες επεξεργασίας τους ο αριθμός Reynolds είναι πολύ μικρός ($Re: 10^{-4} \sim 10^{-1}$), με αποτέλεσμα η ροή των πολυμερικών τηγμάτων να είναι στρωτή (laminar).

Επίσης ισχύουν τα εξής:

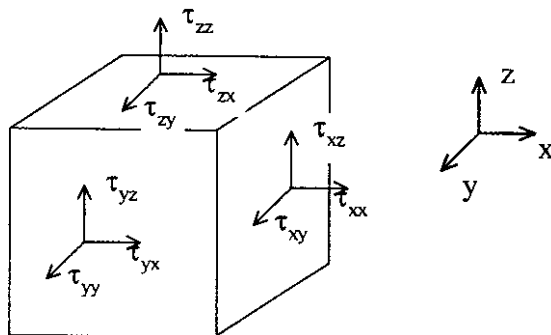
- Οι δυνάμεις συναγωγής δεν είναι σημαντικές
- Οι δυνάμεις βαρύτητας είναι συνήθως αμελητέες
- Η ροή κυριαρχείται από την ισορροπία δυνάμεων πίεσης και ιξώδους:

$$0 = -\nabla P + \nabla \cdot \tau \quad [1.24]$$

- Η πίεση P είναι βαθμωτό μέγεθος
- Οι τάσεις μπορεί να είναι κάθετες ή διατμητικές
- Οι τάσεις αποτελούν τανυστή τ που αναλύεται ως εξής:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix}$$

Για τη γραφή των τάσεων τ_{ij} : ο πρώτος δείκτης είναι κάθετος στο επίπεδο όπου δρα η τάση, ενώ ο δεύτερος αναφέρεται στην κατεύθυνση της τάσης.



$\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}, \tau_{zx}, \tau_{xz}$: διατμητικές τάσεις

$\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}$: κάθετες τάσεις

Στην περίπτωση των κάθετων τάσεων, ορίζονται οι ακόλουθοι δύο όροι της διαφοράς των κάθετων τάσεων:

i. η πρώτη διαφορά κάθετων τάσεων (first normal-stress difference) N_1 :

$$N_1 = \tau_{xx} - \tau_{yy} = \Psi_1(\gamma, T)\dot{\gamma}^2$$

ii. τη δεύτερη διαφορά κάθετων τάσεων (second normal-stress difference) N_2 :

$$N_2 = \tau_{yy} - \tau_{zz} = \Psi_2(\gamma, T)\dot{\gamma}^2$$

όπου Ψ_1 και Ψ_2 ο πρώτος και ο δεύτερος, αντίστοιχα, συντελεστής κάθετων τάσεων.

Για διδιάστατες ροές (σε ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων, στις κατευθύνσεις x και y) η αρχή διατήρησης της ορμής γράφεται ως εξής:

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \quad [1.25]$$

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \quad [1.26]$$

Η αρχή διατήρησης της μάζας δίνει:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad [1.27]$$

Για ροές μονής κατεύθυνσης (Unidirectional flows) στην x -κατεύθυνση αποδεικνύεται ότι τελικά απομένει μόνο μια εξίσωση, αυτή στην κατεύθυνση ροής:

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0, \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0, \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} = 0 \quad [1.28]$$

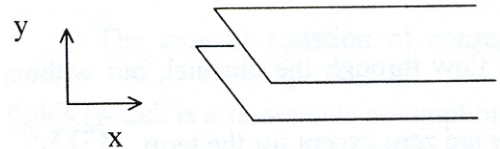
$$\text{επομένως } 0 = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \quad [1.29]$$

Παρακάτω αναλύονται δύο σημαντικού τύποι ροών μονής κατεύθυνσης, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την ανάλυση διεργασιών μορφοποίησης πολυμερικών τηγμάτων:

i. Επίπεδη ροή (Planar flow) στην x -κατεύθυνση

$$x\text{-κατεύθυνση: } 0 = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \quad [1.30]$$

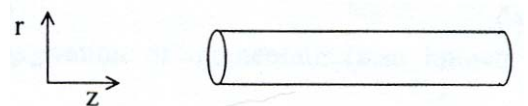
$$\text{όπου } \tau_{yx} = \eta \frac{\partial v_x}{\partial y} \quad [1.31]$$



ii. Αξονοσυμμετρική ροή

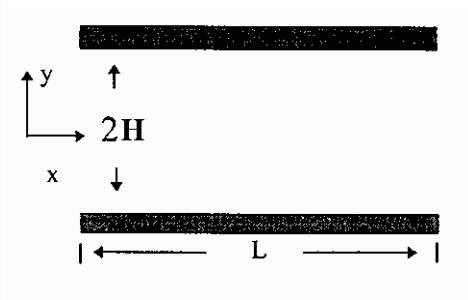
$$z\text{-κατεύθυνση: } 0 = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) \quad [1.32]$$

$$\text{όπου } \tau_{rz} = \eta \frac{\partial v_z}{\partial r} \quad [1.33]$$



1.3.2 Ροή ρευστού υπό πίεση μεταξύ παράλληλων πλακών

Θεωρούμε ροή ρευστού υπό πίεση μεταξύ δύο παράλληλων πλακών.



Σχήμα 1.7: Γεωμετρία ροής μεταξύ παράλληλων πλακών.

Από την αρχή διατήρησης της ορμής λαμβάνεται:

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \quad [1.34]$$

$$\text{Επίσης ισχύει: } -\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\Delta P}{L} \quad [1.35]$$

$$\text{Επομένως: } \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = -\frac{\Delta P}{L} \quad [1.36]$$

$$\text{Με ολοκλήρωση λαμβάνεται: } \tau_{yx} = -\frac{\Delta P}{L} y + C_1 \quad [1.37]$$

Για ρευστό που ακολουθεί τον εκθετικό νόμο ισχύει:

$$\tau_{yx} = \eta \frac{\partial u_x}{\partial y} = m \dot{\gamma}^{n-1} \frac{\partial u_x}{\partial y} = m \left| \frac{\partial u_x}{\partial y} \right|^{n-1} \frac{\partial u_x}{\partial y} \quad [1.38]$$

Η απόλυτη τιμή $\left| \frac{\partial u_x}{\partial y} \right|$ χρειάζεται γιατί μερικές φορές για πολυμερή ο όρος $\partial u_x / \partial y$ παίρνει αρνητικές τιμές και $n-1 < 1$.

Με αντικατάσταση της [1.38] στην εξίσωση [1.37]:

$$m \left| \frac{\partial u_x}{\partial y} \right|^{n-1} \frac{\partial u_x}{\partial y} = -\frac{\Delta P}{L} y + C_1 \quad [1.39]$$

Η σταθερά C_1 προσδιορίζεται από την οριακή συνθήκη για $y=0$, $\frac{\partial u_x}{\partial y} = 0$ (συμμετρία)

$$C_1 = 0$$

$$m \left| \frac{\partial u_x}{\partial y} \right|^{n-1} \frac{\partial u_x}{\partial y} = -\frac{\Delta P}{L} y \quad [1.40]$$

Το δεξί σκέλος της εξίσωσης [1.40] είναι αρνητικό επομένως και ο όρος $\partial v_x / \partial y$ θα πρέπει να είναι αρνητικός.

$$\frac{\partial v_x}{\partial y} = - \left(\frac{1}{m} \frac{\Delta P}{L} \right)^{\frac{1}{n}} y^{\frac{1}{n}} \quad [1.41]$$

$$v_x = - \frac{n}{n+1} \left(\frac{1}{m} \frac{\Delta P}{L} \right)^{\frac{1}{n}} y^{\frac{n+1}{n}} + C_2 \quad [1.42]$$

Η σταθερά C_2 προσδιορίζεται με τη χρήση της οριακής συνθήκης: για $y=H$, $v_x=0$ (συνθήκη μη-ολίσθησης).

$$v_x = \frac{n}{n+1} \left[\frac{H^{n+1}}{m} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \left[1 - \left(\frac{y}{H} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad [1.43]$$

Η μέγιστη ταχύτητα $v_{\max}$ αναπτύσσεται στο κέντρο για $y=0$ και δίνεται από τη σχέση:

$$v_{\max} = \frac{n}{n+1} \left[\frac{H^{n+1}}{m} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \quad [1.44]$$

Με βάση την έκφραση του $v_{\max}$ η ταχύτητα v_x υπολογίζεται ως εξής:

$$v_x = v_{\max} \left[1 - \left(\frac{y}{H} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad [1.45]$$

Η ογκομετρική παροχή δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q = \frac{2n}{2n+1} W \left[\frac{1}{m} \frac{\Delta P}{L} \right]^{\frac{1}{n}} H^{\frac{1}{n}+2} \quad [1.46]$$

Για την πτώση πίεσης ΔP προκύπτει:

$$\Delta P = mL \left[\frac{2n+1}{2n} \frac{Q}{W} H^{\frac{2n+1}{n}} \right]^n \quad [1.47]$$

Ο ρυθμός διάτμησης δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial v_x}{\partial y} = - \frac{n+1}{n} v_{\max} \frac{1}{H} \left(\frac{y}{H} \right)^{\frac{1}{n}} \quad [1.48]$$

Ο ρυθμός διάτμησης στο τοίχωμα προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{n+1}{n} \frac{v_{\max}}{H} \quad [1.49]$$

$$\dot{\gamma}_w = \frac{2n+1}{n} \frac{2Q}{4WH^2} \quad [1.50]$$

Η διατμητική τάση τ μεταβάλλεται γραμμικά:

$$\tau_{yx} = -\frac{\Delta P}{L} y \quad [1.51]$$

και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή στο τοίχωμα:

$$\tau_w = -\frac{\Delta P}{L} H \quad [1.52]$$

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι όταν η τάση αυτή πολλαπλασιάζεται με το εμβαδόν, δίνει τη δύναμη που εξασκείται από την πλάκα στο ρευστό και η οποία έχει φορά στην αρνητική κατεύθυνση του άξονα x . Η δύναμη που εξασκείται από το ρευστό στην πλάκα είναι θετική.

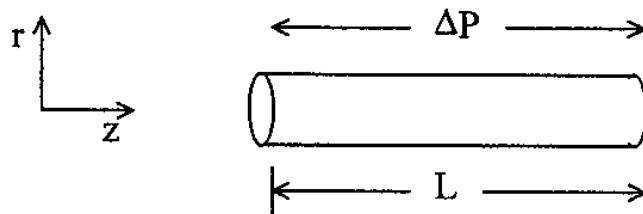
$$\tau_w = \eta \dot{\gamma}_w = m \dot{\gamma}^n = m \left[\frac{n+1}{n} \frac{v_{\max}}{H} \right]^n = m \left[\frac{2n+1}{n} \frac{2Q}{4WH^2} \right]^n \quad [1.53]$$

Στις παραπάνω εξισώσεις θέτοντας όπου $n=1$ λαμβάνονται οι αντίστοιχες σχέσεις για νευτωνικό ρευστό.

1.3.3 Ροή ρευστού υπό πίεση σε κυλινδρικό αγωγό (Ροή Poiseuille)

Θεωρούμε την περίπτωση αξονικής στρωτής ροής σε οριζόντιο αγωγό κυλινδρικής διατομής, γνωστή ως *ροή Poiseuille*. Η κίνηση του ρευστού γίνεται προς την κατεύθυνση z κατά μήκος του άξονα του σωλήνα. Η κλίση της ταχύτητας κατευθύνεται ακτινικά από τον άξονα προς την περιφέρεια του κυλίνδρου. Η επίδραση της εισόδου στη διαμόρφωση της ροής θεωρείται αμελητέα. Επομένως η ανάλυση που ακολουθεί αναφέρεται σε πλήρως αναπτυγμένη ροή από την είσοδο του αγωγού.

Λόγω της γεωμετρίας του προβλήματος το καταλληλότερο σύστημα συντεταγμένων είναι το κυλινδρικό.



Σχήμα 1.8: Γεωμετρία ροής σε κυλινδρικό αγωγό.

Για λόγους συμμετρίας ο άξονας του κυλίνδρου συμπίπτει με τον άξονα του αγωγού. Οι ασκούμενες δυνάμεις σε κυλινδρικό στοιχείο κατά τη διεύθυνση z οφείλονται στην

πτώση πίεσης του ρευστού κατά μήκος του κυλίνδρου και στη διατμητική τάση στην επιφάνεια του στοιχειώδους κυλίνδρου.

Από την αρχή διατήρησης της ορμής έχουμε:

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) \quad [1.54]$$

$$-\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\Delta P}{L} \quad [1.55]$$

$$\tau_{rz} = -\frac{\Delta P}{L} \frac{r}{2} + C_1 \quad [1.56]$$

Χρησιμοποιώντας τον εκθετικό νόμο :

$$\tau_{rz} = m \left| \frac{\partial v_z}{\partial r} \right|^{n-1} \frac{\partial v_z}{\partial r} \quad [1.57]$$

και ολοκληρώνοντας με οριακές συνθήκες:

$$\begin{aligned} r=0 & \quad \frac{\partial v_z}{\partial r} = 0 \\ r=R & \quad v_z = 0 \end{aligned}$$

Η επίλυση δίνει:

$$v_z = v_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad [1.58]$$

$$v_{\max} = \frac{n}{n+1} \left[\frac{R^{n+1}}{2m} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \quad [1.59]$$

$$Q = \pi \frac{n}{3n+1} \left[\frac{1}{2m} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \right]^{\frac{1}{n}} R^{\frac{1}{n}+3} \quad [1.60]$$

$$\Delta P = 2mL \left[\frac{3n+1}{n} \frac{Q}{\pi} R^{-\frac{(3n+1)}{n}} \right]^n \quad [1.61]$$

για $n=1$ παίρνουμε τη γνωστή σχέση Hagen-Poiseuille για νευτωνικά ρευστά.

Για τη διατμητική τάση προκύπτει ότι είναι γραμμική συνάρτηση της ακτίνας:

$$\tau_{rz} = -\frac{\Delta P}{L} \frac{r}{2} \quad [1.62]$$

Από την εξίσωση αυτή παρατηρείται ότι η τάση τ_{rz} είναι 0 στον άξονα του αγωγού ($r=0$) και παίρνει τη μέγιστη τιμή τ_w στην επιφάνεια των τοιχωμάτων ($r=R$).

Η μέγιστη διατμητική τάση στα τοιχώματα αποδεικνύεται ότι υπολογίζεται και από τη σχέση:

$$\tau_w = m \left[\left(\frac{3n+1}{4n} \right) \frac{4Q}{\pi R^3} \right]^n \quad [1.63]$$

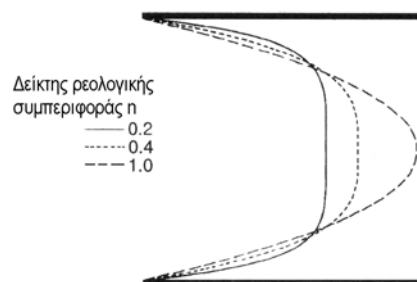
Ο όρος $4Q/\pi R^3$, που χρησιμοποιείται στην παραπάνω εξίσωση, αντιπροσωπεύει το ρυθμό διάτμησης για νευτωνικά ρευστά ($n=1$). Για μη νευτωνικά ρευστά αναφέρεται συνήθως σαν *φαινομενικός ρυθμός διάτμησης*.

	Εκθετικός νόμος $\tau_{rz} = m \left \frac{dv_z}{dr} \right ^{n-1} \frac{dv_z}{dr}$	Νόμος του Newton $\tau_{rz} = \mu \frac{dv_z}{dr}$
Διατμητική τάση	$\tau = \tau_w \left(\frac{r}{R} \right)$	$\tau = \tau_w \left(\frac{r}{R} \right)$
Διατμητική τάση στα τοιχώματα του κυλίνδρου	$\tau_w = -\frac{\Delta P}{2L} R$	$\tau_w = -\frac{\Delta P}{2L} R$
Μέγιστη ταχύτητα (στο κέντρο του κυλίνδρου)	$v_{\max} = \frac{n}{n+1} \left[\frac{R^{n+1}}{2m} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \right]^{\frac{1}{n}}$	$v_{\max} = \left(\frac{R^2 \Delta P}{4\mu L} \right)$
Ταχύτητα	$v_z = v_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]$	$v_z = v_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$
Ρυθμός διάτμησης	$\dot{\gamma} = - \left(\frac{v_{\max}}{R} \right) \left(\frac{n+1}{n} \right) \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}}$	$\dot{\gamma} = - \left(\frac{2v_{\max}}{R} \right) \left(\frac{r}{R} \right)$
Ρυθμός διάτμησης στα τοιχώματα του κυλίνδρου	$\dot{\gamma}_w = \left(\frac{3n+1}{4n} \right) \frac{4Q}{\pi R^3}$	$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3}$
Ογκομετρική παροχή	$Q = \pi \frac{n}{3n+1} \left[\frac{1}{2m} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \right]^{\frac{1}{n}} R^{\frac{1}{n}+3}$	$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8\mu L}$

Πίνακας 1.6: Σύνοψη των εξισώσεων που ισχύουν για ισοθερμοκρασιακή ροή υπό πίεση σε κυλινδρικό αγωγό, για νευτωνικό ρευστό και ρευστό που το ιξώδες του υπακούει στον εκθετικό νόμο.

Στο Σχήμα 1.9 φαίνεται το προφίλ της ταχύτητας κατά τη ροή σε κυλινδρικό αγωγό ρευστού που υπακούει στον εκθετικό νόμο. Παρατηρείται ότι όσο μειώνονται οι τιμές του δείκτη ρεολογικής συμπεριφοράς n (αύξηση της συμπεριφοράς διατμητικής λέπτυνσης του ρευστού) το προφίλ γίνεται πιο επίπεδο (ροή με περισσότερο εμβολικό χαρακτήρα).

Σχήμα 1.9: Το προφίλ της ταχύτητας ρευστού που ακολουθεί τον εκθετικό νόμο κατά ισοθερμοκρασιακή ροή υπό πίεση σε κυλινδρικό αγωγό, για διάφορες τιμές του δείκτη ρεολογικής συμπεριφοράς n .



1.3.4 Ανάλυση τριχοειδούς ιξωδόμετρου

Για ροή νευτωνικού ρευστού σε κυλινδρικό αγωγό η εξίσωση Hagen-Poiseuille δίνει:

$$\Delta P = \mu L \frac{8Q}{\pi} R^{-4} \quad [1.64]$$

Η εξίσωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του ιξώδους μ , από τη μέτρηση της πτώσης πίεσης ΔP για ογκομετρική παροχή Q , που πραγματοποιείται σε κυλινδρικό αγωγό μήκους L και ακτίνας R .

Για μη-νευτωνικά ρευστά το ιξώδες $\eta(\dot{\gamma})$ αποτελεί συνάρτηση του ρυθμού διάτμησης και απαιτείται ειδική διαδικασία για τον προσδιορισμό του. Για τον προσδιορισμό του ιξώδους θα χρησιμοποιηθεί η βασική εξίσωση του ορισμού του:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [1.65]$$

Η διατμητική τάση στα τοιχώματα λαμβάνεται από τη σχέση:

$$\tau_w = -\frac{\Delta P}{2L} R \quad [1.66]$$

Επίσης ειδική διαδικασία απαιτείται για τον προσδιορισμό του ρυθμού διάτμησης. Για νευτωνικά ρευστά ($n=1$), με παραγωγή της εξίσωσης που δίνει το προφίλ της ταχύτητας προκύπτει:

$$\dot{\gamma}_w = \left(\frac{dv_z}{dr} \right)_w = \frac{\Delta P}{2\mu L} R \quad [1.67]$$

και χρησιμοποιώντας την εξίσωση Hagen-Poiseuille λαμβάνεται:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (\text{νευτωνικό ρευστό}) \quad [1.68]$$

Η ογκομετρική παροχή δίνεται επίσης από τη σχέση:

$$Q = v_{\text{avg}} \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{και} \quad D = 2R, \quad [1.69]$$

$$\dot{\gamma}_w = \frac{8v_{\text{avg}}}{D} \quad [1.70]$$

Για μη-νευτωνικά ρευστά θα αναπτυχθεί μια γενική έκφραση για το ρυθμό διάτμησης στα τοιχώματα, ξεκινώντας από τον ορισμό της ογκομετρικής παροχής σε κυλινδρικό αγωγό:

$$Q = 2\pi \int_0^R r v_z dr \quad [1.71]$$

Με ολοκλήρωση κατά μέρη λαμβάνεται:

$$Q = \pi r^2 v_z \Big|_0^R - \pi \int_0^R r^2 \left(\frac{dv_z}{dr} \right) dr \quad [1.72]$$

Εφαρμόζοντας την οριακή συνθήκη “μη-ολίσθησης” για $r = R, v_z = 0$ έχουμε:

$$Q = -\pi \int_0^R r^2 \left(\frac{dv_z}{dr} \right) dr \quad [1.73]$$

Λόγω ότι $r/R = \tau_{rz} / \tau_w$, μπορούμε να παραλείψουμε το r από την παραπάνω έκφραση για να πάρουμε:

$$\frac{\tau_w^3 Q}{\pi R^3} = \int_0^{\tau_w} \tau_{rz}^2 \left(\frac{dv_z}{dr} \right) d\tau_{rz} \quad [1.74]$$

Με παραγωγή και στα δύο μέρη ως προς τ_w και χρησιμοποιώντας τον κανόνα του Leibnitz καταλήγουμε στην ακόλουθη έκφραση:

$$\left(\frac{dv_z}{dr} \right)_w = \frac{1}{\pi R^3} \left(\tau_w \frac{dQ}{d\tau_w} + 3Q \right) \quad \text{ή} \quad [1.75]$$

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3} \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{d \ln Q}{d \ln \tau_w} \right) \quad [1.76]$$

Η εξίσωση αυτή συνήθως αναφέρεται ως εξίσωση *Rabinowitsch*, η οποία δίνει το ρυθμό διάτμησης ως συνάρτηση των Q , R και τ_w . Ο όρος στην παρένθεση μπορεί να θεωρηθεί ως “διόρθωση” στη νευτωνική έκφραση του ρυθμού διάτμησης στα τοιχώματα ($4Q/\pi R^3$). Για τον προσδιορισμό του $\dot{\gamma}_w$ γίνεται γραφική παράσταση σε λογαριθμικούς άξονες του Q σε συνάρτηση του τ_w και για κάθε σημείο της καμπύλης υπολογίζεται η παράγωγος $d \ln Q / d \ln \tau_w$.

Για μη-νευτωνικά ρευστά τα οποία υπακούουν στον εκθετικό νόμο:

$$\tau = m \dot{\gamma}^n \quad [1.77]$$

μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια εμπειρική έκφραση:

$$\tau_w = m \left(\frac{4Q}{\pi R^3} \right)^n \quad [1.78]$$

στην οποία n είναι η κλίση του γραφήματος: $\log \tau_w$ σε συνάρτηση με τον όρο $\log(4Q/\pi R^3)$, και είναι:

$$n = \frac{d \log \tau_w}{d \log \left(\frac{4Q}{\pi R^3} \right)} \quad [1.79]$$

Με βάση τα παραπάνω, η έκφραση για το ρυθμό διάτμησης μπορεί να ξαναγραφεί ως εξής:

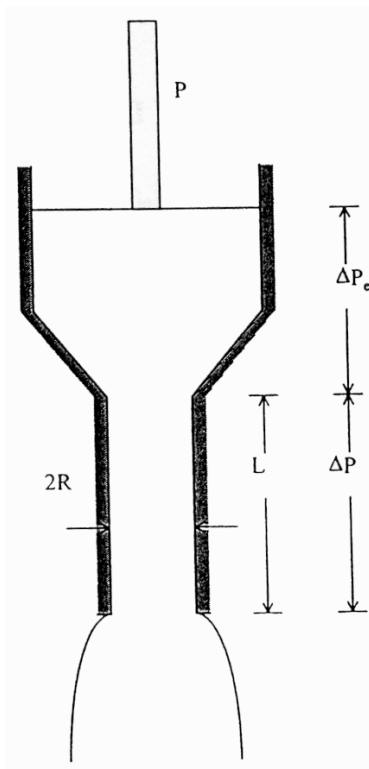
$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3} \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4n} \right) \quad [1.80]$$

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3} \left(\frac{3n+1}{4n} \right) \quad [1.81]$$

Αυτό σημαίνει ότι η έκφραση μεταξύ “φαινομενικού” m' και “πραγματικού” m είναι:

$$m = m' \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n \quad [1.82]$$

Το τριχοειδές ιξωδόμετρο είναι μια διάταξη στην οποία το εξεταζόμενο ρευστό αρχικά αποθηκεύεται σε κυλινδρικό δοχείο (δεξαμενή) και στη συνέχεια εξαναγκάζεται να διέλθει ισοθερμοκρασιακά μέσω ενός κυλινδρικού τριχοειδούς σωλήνα. Το αποθηκευτικό δοχείο και ο τριχοειδής σωλήνας είναι ευθυγραμμισμένα με κοινό άξονα.



Σχήμα 1.10: Γεωμετρία τριχοειδούς ιξωδόμετρου.

Συνοψίζοντας, όπως αναπτύχθηκε προηγούμενα:

$$\tau_w = -\frac{\Delta P}{2L} R \quad \text{και} \quad \dot{\gamma}_\phi = \frac{4Q}{\pi R^3}$$

Με τη διόρθωση Rabinowitsch, λαμβάνεται ο πραγματικός ρυθμός διάτμησης :

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3} \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{d \ln Q}{d \ln \tau_w} \right)$$

και επομένως το ιξώδες : $\eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w}$

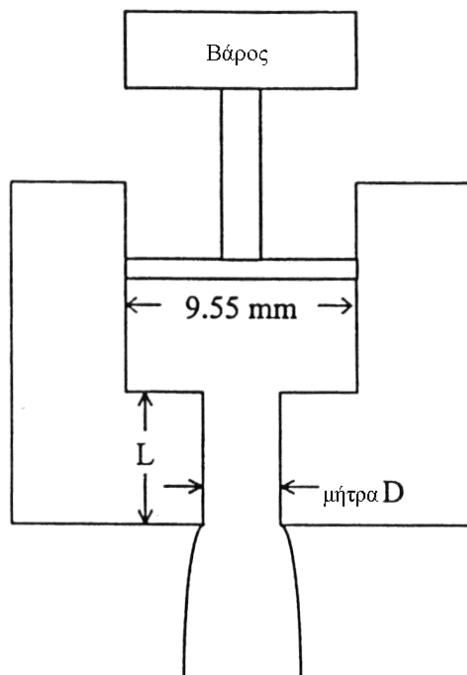
Η ανάλυση με τριχοειδή ιξωδομετρία δίνει καλά αποτελέσματα για ρυθμούς διάτμησης ($\dot{\gamma}$) στην περιοχή $10^0 \sim 10^3$.

Όταν γίνονται πειραματικές μετρήσεις σε τριχοειδής αγωγούς, συνήθως μετράται η πίεση στη δεξαμενή από τη δύναμη στο έμβολο. Επομένως

$\Delta P_{\text{συνολικό}} = \Delta P_{\text{δεξαμ}} + \Delta P_{\text{τριχ}}$, αλλά $\Delta P_{\text{δεξαμ}} \approx 0$ (μεγάλου όγκου δεξαμενή).

Ο δείκτης ροής τήγματος (MFI)

Ο δείκτης ροής τήγματος (Melt Flow Index, MFI) είναι μια ιδιότητα που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην πράξη κατά την επεξεργασία των πολυμερών. Η διάταξη που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του MFI είναι ένα τριχοειδές ιξωδόμετρο ή ακριβέστερα ένας εμβολοφόρος εκβολέας. Το δείγμα του πολυμερούς θερμαίνεται στο κυλινδρικό αποθηκευτικό δοχείο και στη συνέχεια εξωθείται μέσω προτύπου τριχοειδούς μήτρας χρησιμοποιώντας ένα πρότυπο βάρος στο έμβολο. Ο δείκτης ροής τήγματος είναι το ποσό του πολυμερούς τήγματος σε γραμμάρια, το οποίο εξέρχεται από τον τριχοειδή κύλινδρο σε 10 λεπτά από την εφαρμογή του πρότυπου βάρους.



Σχήμα 1.11: Διάταξη μέτρησης δείκτη ροής τήγματος.

Το MFI δίνει μια ένδειξη για το μοριακό βάρος και το ιξώδες των πολυμερών, αλλά δεν αποτελεί θεμελιώδη ιδιότητα. Υπάρχουν πολυμερή που έχουν την ίδια τιμή MFI αλλά διαφορετικές τιμές ιξώδους.

Παρόλα αυτά οι πολυμερικές ρητίνες κατηγοριοποιούνται με βάση τις τιμές του MFI.

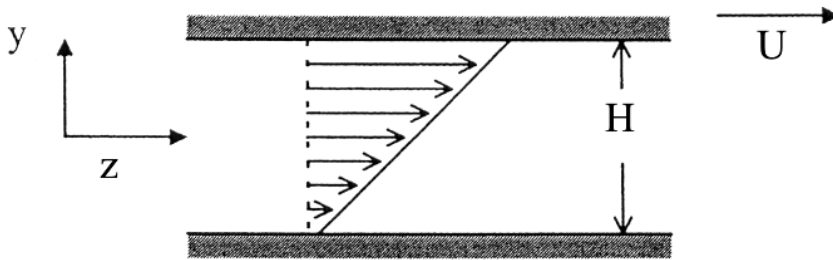
Σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ο Δείκτης Ροής Τήγματος Υψηλού βάρους (High Load Melt Flow Index, HLMFI) όπου για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται αντί του πρότυπου βάρους των 2.16kg βάρους 10kg.

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D1238 οι διαστάσεις της μήτρας είναι: $D=2.095 \text{ mm}$, $L=8 \text{ mm}$.

1.3.5 Ροή οπισθέλκουσας μεταξύ επίπεδων πλακών

Η ροή οπισθέλκουσας (drag flow ή ροή Couette) αναπτύσσεται όταν ρευστό βρίσκεται ανάμεσα σε δύο παράλληλες πλάκες, σε απόσταση H , και η πάνω πλάκα κινείται με σταθερή ταχύτητα U , στην z -διεύθυνση ενώ η κάτω πλάκα παραμένει ακίνητη.

Στην περίπτωση αυτή δεν είναι απαραίτητη η ανάπτυξη βαθμίδας πίεσης για τη δημιουργία του πεδίου ροής.



Σχήμα 1.12: Γεωμετρία ροής μεταξύ επίπεδων πλακών, εκ των οποίων η μία κινείται με ταχύτητα U .

Από την αρχή διατήρησης της ορμής λαμβάνεται:

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} \quad [1.83]$$

$$\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} = 0 \Rightarrow \tau_{yz} = \text{σταθ.} \quad [1.84]$$

$$m \left| \frac{dv_z}{dy} \right|^{n-1} \frac{dv_z}{dy} = \text{σταθ.} \quad [1.85]$$

$$\frac{dv_z}{dy} = \text{σταθ.} \Rightarrow v_z = C_1 y + C_2 \quad [1.86]$$

Θεωρώντας ότι δεν υπάρχει ολίσθηση του ρευστού στην επιφάνεια των δύο επίπεδων πλακών και ότι η ταχύτητα του ρευστού για $y=H$ είναι $u_z=U$, ενώ η ταχύτητα στην κάτω πλάκα ($y=0$) είναι μηδενική ($u_z=0$), προκύπτει ότι η ταχύτητα για κάθε στοιχειώδη όγκο του ρευστού δίνεται από τη σχέση:

$$v_z = \frac{U}{H} y \quad [1.87]$$

Η μέση ταχύτητα δίνεται από τη σχέση: $\bar{v} = (1/2)U$ [1.88]

Η ογκομετρική παροχή σε όλο το ύψος H και πλάτος W του επίπεδου αγωγού δίνεται από τη σχέση:

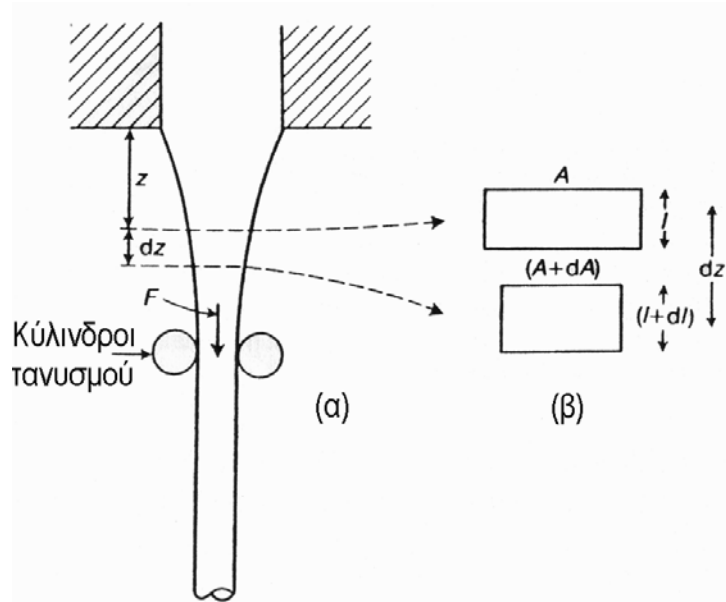
$$Q = \frac{1}{2} UHW$$
 [1.89]

Η έκφραση αυτή δίνει το ποσό του ρευστού που σύρεται από την κινούμενη πλάκα.

1.3.6 Ροή επιμήκυνσης

Η *ροή επιμήκυνσης* (elongational, stretching, tensile ή free surface flow) έχει πολύ μεγάλη σημασία στα τήγματα πολυμερών γιατί συναντάται όχι μόνο κατά τη μορφοποίηση του φιλμ αλλά και στην παραγωγή ινών, στη μόρφωση με φύσημα και στη μορφοποίηση υπό κενό.

Να θεωρηθεί ρευστό το οποίο “εξωθείτε” συνεχώς υπό σταθερή θερμοκρασία στη μορφή ράβδου μεγάλου μήκους όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.13.



Σχήμα 1.13: (α) Ίνα από τήγμα πολυμερούς η οποία υφίσταται συνεχώς δύναμη τανυσμού F . (β) Σε απόσταση z από την έξοδο ένας στοιχειώδης όγκος τήγματος μήκους l και εμβαδού A , σε χρονικό διάστημα dt μετακινείται στη θέση $z+dz$, όπου $dz=vdt$. Ο όγκος του παραμένει σταθερός αλλά οι διαστάσεις του μεταβάλλονται σε $l+dl$ και $A+dA$.

Η δύναμη τανυσμού F η οποία διατηρεί τη συνεχή ροή προέρχεται από κυλίνδρους έλξης. Ο ρυθμός της ογκομετρικής παροχής Q είναι σταθερός. Λόγω ότι η εγκάρσια επιφάνεια μειώνεται με την αύξηση της απόστασης z , μειώνεται αντίστοιχα και η εφελκυστική δύναμη που εξασκείται στο τήγμα.

Θεωρούμε ένα στοιχειώδη όγκο του ρευστού μήκους l στη θέση z από την έξοδο της ροής του τήγματος. Στο σημείο αυτό το τήγμα μετακινείται προς την κάτω κατεύθυνση με ταχύτητα v : επομένως μετά από χρόνο dt θα έχει μετακινηθεί σε απόσταση $z+dz$:

$$dz = v dt \quad [1.90]$$

Κατά τη μετάβαση από τη θέση z στη θέση $z+dz$, η εγκάρσια επιφάνεια μεταβάλλεται από A σε $A+dA$ και το μήκος από l σε $l+dl$. Με δεδομένο ότι ο όγκος παραμένει σταθερός, ισχύει:

$$Al = (A + dA)(l + dl) \quad [1.91]$$

$$\frac{dA}{A} = -\frac{dl}{l} \quad [1.92]$$

Ο ρυθμός ογκομετρικής παροχής είναι ανεξάρτητος της θέσης z :

$$Q = vA = \text{σταθερός} \quad [1.93]$$

και επομένως:

$$\frac{dA}{A} = -\frac{dv}{v} \quad [1.94]$$

Η μεταβολή της παραμόρφωσης του στοιχειώδη όγκου που κινείται μεταξύ z και dz είναι:

$$d\varepsilon_t = \frac{dl}{l} = \frac{dv}{v} \quad [1.95]$$

Από τις εξισώσεις [1.92] και [1.94]

$$\frac{d\varepsilon_t}{dt} = \frac{1}{dt} \left(\frac{dv}{v} \right) \quad [1.96]$$

$dt = dz/v$, λαμβάνεται:

$$\frac{d\varepsilon_t}{dt} = \frac{dv}{dz} \quad [1.97]$$

Σύμφωνα με τον ορισμό του Trouton για το ιξώδες επιμήκυνσης, όταν ένα ρευστό επιμηκύνεται κατά $d\varepsilon_t/dt$, δημιουργεί εφελκυστική τάση $\sigma_t = F/A$

$$\sigma_t = \eta_e \frac{d\varepsilon_t}{dt} \quad [1.98]$$

$$\text{επομένως } \eta_e = \frac{F/A}{d\varepsilon_t/dt} = \frac{F/A}{dv/dz} \quad [1.99]$$

Από την εξίσωση [1.94] παίρνουμε για το ιξώδες επιμήκυνσης:

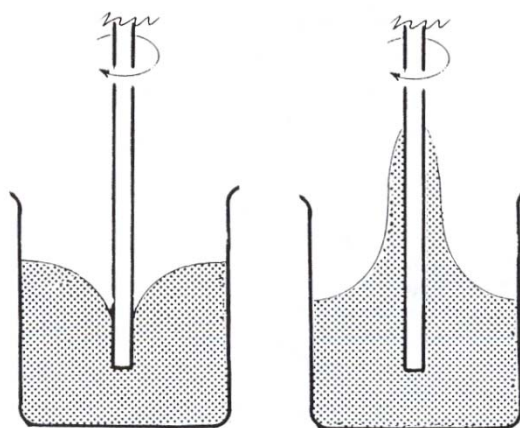
$$\eta_e = -\frac{F/v}{dA/dz} \quad [1.100]$$

Ο υπολογισμός του η_e περιλαμβάνει πειράματα όπου για παράδειγμα μετράται η F, v και dA/dz κατά την επιμήκυνση εκβαλλόμενου τήγματος κυλινδρικού σχήματος, το οποίο επιμηκύνεται με εφαρμογή εφελκυστικής δύναμης.

1.4 ΔΙΟΓΚΩΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΚΑΙ ΑΣΤΑΘΕΙΕΣ ΡΟΗΣ ΤΗΓΜΑΤΟΣ

1.4.1 Κάθετες τάσεις

Θεωρούμε ότι οι μοριακές αλυσίδες μεγάλου μήκους συμπεριφέρονται ως ελαστικά ή ελατήρια. Με έκταση, τα ελατήρια τεντώνονται γύρω από περιστρεφόμενο στέλεχος και εξασκούν θλιπτική δύναμη κατά μήκος του άξονα περιστροφής του που αναγκάζει το ρευστό να αναρριχηθεί σε αυτόν (Σχήμα 1.14). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *αναρρίχηση στελέχους* ή *φαινόμενο Weissenberg* και οφείλεται στη διαφορά των κάθετων τάσεων (normal stresses difference). Το αντίστροφο φαινόμενο παρατηρείται σε νευτωνικά ρευστά και οφείλεται σε φυγόκεντρες δυνάμεις.



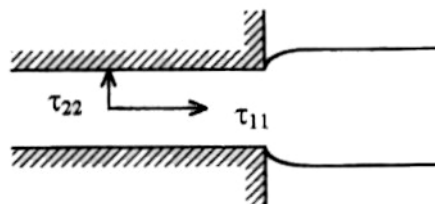
Σχήμα 1.14: Περιστευρόμενη ράβδος σε ρευστό: (α) Νευτωνικό (β) Ελαστικό ρευστό.

Η διαφορά των κάθετων τάσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το χαρακτηρισμό των πολυμερών. Παρουσιάζει διαφοροποίηση στις τιμές της ανάλογα με το πολυμερές και εξαρτάται κυρίως από την κατανομή των μοριακών βαρών. Πολυμερή με ευρεία κατανομή μοριακών βαρών έχουν μεγάλες τιμές κάθετων τάσεων N_1 .

Η διαφορά των κάθετων τάσεων N_1 είναι μια από τις βασικές αιτίες που προκαλούν τη διόγκωση πολυμερών κατά την έξοδό τους από μήτρες μορφοποίησης ή αγωγούς. Κατά τη διαδρομή ενός πολυμερούς μέσα από ένα αγωγό, οι πολυμερικές αλυσίδες επεκτείνονται και αναπτύσσουν τάσεις.

Αποδεικνύεται ότι $\tau_{11} > \tau_{22}$ και $N_1 = \tau_{11} - \tau_{22} > 0$.

Με την έξοδο του πολυμερούς από τον αγωγό, οι τάσεις χαλαρώνουν με αποτέλεσμα το ρευστό να διαστέλλεται και να διογκώνεται.



Επομένως ισχύει: $\frac{D}{D_0} = f(N_1)$

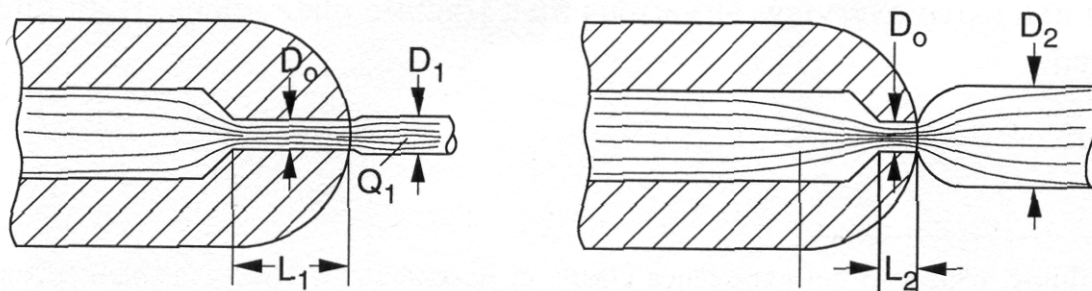
1.4.2 Διόγκωση τήγματος

Η *διόγκωση πολυμερών* (extrudate or die swelling) είναι το φαινόμενο που παρατηρείται κατά την εκβολή πολυμερικών τηγμάτων ή διαλυμάτων, όπου

αναπτύσσονται πολύ μεγαλύτερες διαστάσεις στην εγκάρσια διατομή του εκβαλλόμενου προϊόντος, σε σύγκριση με την αρχική ροή του ρευστού.

Ο λόγος D/D_0 εξαρτάται από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Τη διατμητική τάση που αναπτύσσεται στο τοίχωμα του αγωγού τ_w
- Την κατανομή του μοριακού βάρους
- Το λόγο μήκος προς διάμετρο L/D_0 της μήτρας εκβολής



Σχήμα 1.15: Σχηματική παράσταση της διόγκωσης τήγματος που εξέρχεται από αγωγό.

Ο λόγος διόγκωσης για σταθερή τ_w , μειώνεται εκθετικά με την αύξηση του λόγου L/D_0 και γίνεται σταθερός για $L/D_0 > 30$. Η εξήγηση για αυτή τη συμπεριφορά είναι η εξής:

Η διόγκωση του εκβαλλόμενου τήγματος σχετίζεται με την ικανότητα του πολυμερικού τήγματος ή διαλύματος να υφίσταται, με κάποια υστέρηση, ελαστική επαναφορά της παραμόρφωσης. Όσο περισσότερο έχει παραμορφωθεί και όσο περισσότερες είναι οι μοριακές εμπλοκές του ρευστού στην έξοδο του τριχοειδούς, τόσο περισσότερο αυτό θα διογκωθεί.

Με βάση τα παραπάνω, η μείωση της διόγκωσης με την αύξηση του λόγου L/D_0 αποδίδεται σε δύο λόγους:

- i. σε τριχοειδές μεγάλου μήκους το τήγμα επανέρχεται στις αρχικές του διαστάσεις από την εφελκυστική παραμόρφωση που υφίσταται στην είσοδο, λόγω της αξονικής επιτάχυνσης στην περιοχή αυτή
- ii. η διατμητική παραμόρφωση η οποία εξασκείται στο πολυμερές από το τριχοειδές, επιφέρει απεμπλοκή των μοριακών αλυσίδων.

Επομένως εξάγεται το συμπέρασμα ότι η *διαφορά των κάθετων τάσεων* ($N_1 = \tau_{11} - \tau_{22}$), η οποία αποτελεί μέτρο της επιπλέον τάσης στην κατεύθυνση της ροής σε τριχοειδές μεγάλου μήκους, αντανakλά το μέγεθος της διόγκωσης του εκβαλλόμενου τήγματος. Ο προσδιορισμός της σχέσης μεταξύ N_1 και D/D_0 είναι αρκετά σύνθετος.

Ακολουθούν ορισμένοι χρήσιμοι τύποι:

Για ρευστά εκβαλλόμενα από κυλινδρικούς αγωγούς:

$$\text{i. } N_1 = 2\sqrt{3}\tau_w \left[\left(\frac{D}{D_0} \right)^4 + 2 \left(\frac{D}{D_0} \right)^{-2} - 3 \right]^{\frac{1}{2}} \quad [1.101]$$

από τη θεωρία της ελαστικότητας ελαστομερούς.

$$\text{ii. } N_1 = 2\sqrt{2}\tau_w \left[\left(\frac{D}{D_0} \right)^6 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad [1.102]$$

από τη θεωρία του Tanner για ρευστό Maxwell.

Για ρευστά εκβαλλόμενα από επίπεδους αγωγούς:

$$\text{i. } N_1 = 2\sqrt{5}\tau_w \left[\left(\frac{H}{H_0} \right) + 2 \left(\frac{H}{H_0} \right)^{-2} - 3 \right]^{\frac{1}{2}} \quad [1.103]$$

από τη θεωρία της ελαστικότητας ελαστομερούς.

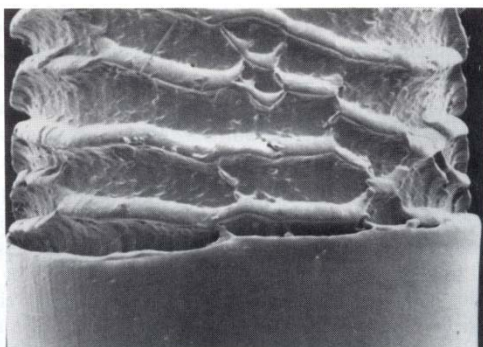
$$\text{ii. } N_1 = 2\sqrt{3}\tau_w \left[\left(\frac{H}{H_0} \right)^4 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad [1.104]$$

από τη θεωρία του Tanner για ρευστό Maxwell.

Η θερμοκρασία επίσης επηρεάζει τη διόγκωση του τήγματος κατά την έξοδό του από τη μήτρα. Στην περίπτωση που τα τοιχώματα της μήτρας είναι πιο ψυχρά από το πολυμερικό τήγμα, το ιξώδες κοντά στα τοιχώματα της μήτρας θα είναι υψηλότερο από αυτό στο κέντρο. Κατά συνέπεια το ρευστό “περιορίζεται” και καθώς εξέρχεται από τη μήτρα η διόγκωσή του αυξάνεται. Το αντίστροφο συμβαίνει αν τα τοιχώματα της μήτρας είναι θερμότερα από αυτά του πολυμερικού τήγματος που ρέει μέσα σε αυτή. Το χαμηλότερο ιξώδες κοντά στα τοιχώματα διευκολύνει τη ροή με αποτέλεσμα η διόγκωση να μειώνεται.

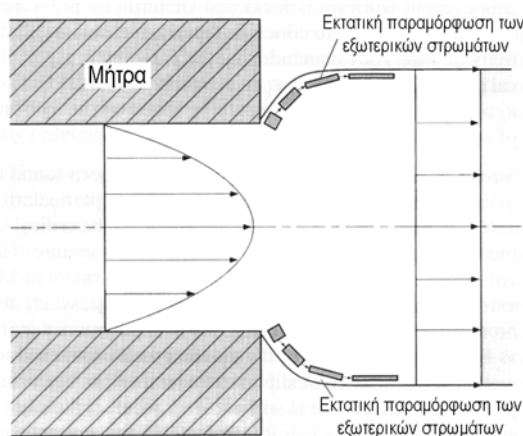
1.4.3 Θραύση τήγματος

Όταν τα πολυμερή εκβάλλονται σε χαμηλούς ρυθμούς ογκομετρικής παροχής, το εκβαλλόμενο προϊόν έχει λεία επιφάνεια. Όταν η διατμητική τάση στο τοίχωμα του αγωγού τ_w ξεπερνά την τιμή των 0.09 MPa, τα περισσότερα πολυμερή παρουσιάζουν τάση για ολίσθηση. Επίσης τα περισσότερα πολυμερή όταν εκβάλλονται σε υψηλούς ρυθμούς ογκομετρικής παροχής παρουσιάζουν τραχύτητα στην επιφάνειά τους η οποία καλείται “*δέρμα καρχαρία*” (“sharkskin”). Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται για τάσεις $\tau_w = 0.14 \text{ MPa}$.



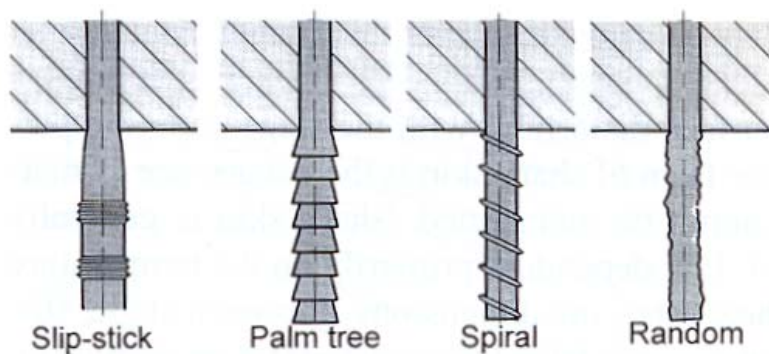
Σχήμα 1.16: Φωτογραφία από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σε εκβαλλόμενο κύλινδρο LLDPE, που δείχνει την έναρξη αστοχίας στην επιφάνειά του με τη μορφή “*δέρματος καρχαρία*”.

Η επιφανειακή αυτή αστοχία συνήθως δημιουργείται λίγο πριν ή στην έξοδο από τη μήτρα μορφοποίησης. Εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία και τη γραμμική ταχύτητα εκβολής. Ο μηχανισμός της δημιουργίας της επιφάνειας τύπου “δέρμα καρχαρία” συσχετίζεται με την απότομη επιτάχυνση των στρωμάτων της επιφάνειας του εκβαλλόμενου τήγματος καθώς το πολυμερές απομακρύνεται από τη μήτρα (Σχήμα 1.17). Στην περίπτωση που ο ρυθμός εκτατικής παραμόρφωσης είναι υψηλός, η επιφάνεια του πολυμερούς αστοχεί και σχηματίζει τις χαρακτηριστικές “αβλακώσεις” της επιφάνειας με αστοχία τύπου “δέρμα καρχαρία”. Πολυμερή με υψηλό ιξώδες και στενή κατανομή του μοριακού βάρους συνήθως είναι πιο ευαίσθητα σε αυτή την αστοχία. Το πρόβλημα περιορίζεται με μείωση της ταχύτητας εκβολής και με την αύξηση της θερμοκρασίας στην περιοχή της μήτρας.



Σχήμα 1.17: Αλλαγή στο προφίλ της ταχύτητας κατά την έξοδο από τη μήτρα.

Σε ακόμη μεγαλύτερους ρυθμούς ογκομετρικής παροχής εξόδου, το εκβαλλόμενο προϊόν έχει πολλές αστοχίες οι οποίες μπορεί να επαναλαμβάνονται κανονικά (έλικες ή αστοχίες τύπου μπαμπού) ή να είναι τυχαίες (Σχήμα 1.18). Το φαινόμενο αυτό καλείται *θραύση τήγματος* και συμβαίνει πάνω από μια κρίσιμη τιμή της διατμητικής τάσης στα τοιχώματα της μήτρας τ_w . Αυτή η κρίσιμη τιμή βρίσκεται στην περιοχή τιμών μεταξύ 0.2-0.4 MPa.



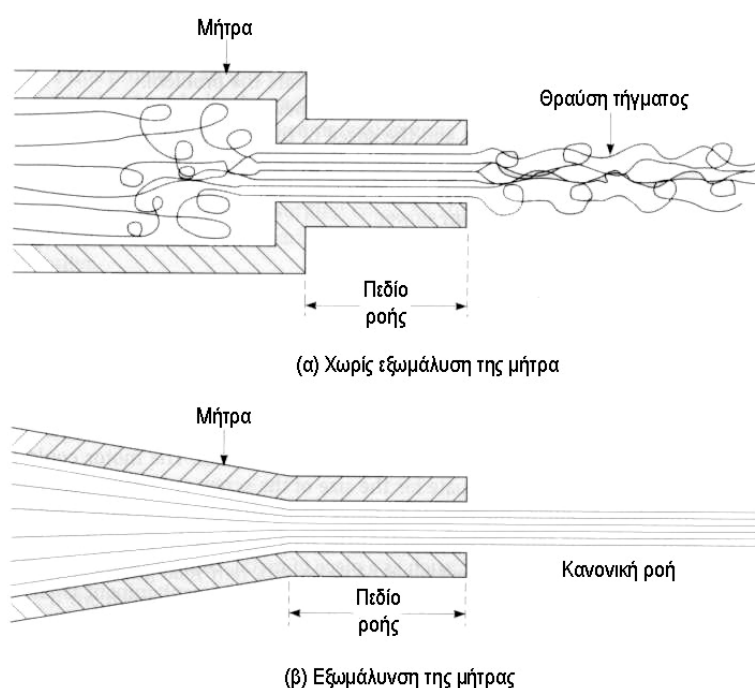
Σχήμα 1.18: Διάφορες μορφές της θραύσης τήγματος.

Έχουν προταθεί μια σειρά από μηχανισμούς για να εξηγήσουν το φαινόμενο της θραύσης τήγματος, εκ των οποίων οι πιο δημοφιλείς είναι οι εξής:

- Η κρίσιμη ελαστική παραμόρφωση στη ζώνη εισόδου
- Φαινόμενα ολίσθησης-επικόλλησης κατά τη ροή στη μήτρα (slip-stick flow)

Η επίδραση της ζώνης εισόδου έχει αναφερθεί από πολλούς ερευνητές. Όσο μικρότερη είναι γωνία εισόδου, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός παραμόρφωσης και η αστάθεια που μπορεί να επέλθει. Το 1961 οι Benbow, Charley και Lamb εισήγαγαν το μηχανισμό της ολίσθησης-επικόλλησης για να εξηγήσουν την αστάθεια της ροής και την παραμόρφωση του εκβαλλόμενου τήγματος. Πάνω από μια κρίσιμη τιμή τάσης, το τήγμα του πολυμερούς υφίσταται διακεκομμένη ολίσθηση στα τοιχώματα της μήτρας λόγω μειωμένης πρόσφυσης μεταξύ του τήγματος και των μεταλλικών τοιχωμάτων. Η μειωμένη πρόσφυση επέρχεται λόγω του φαινομένου ανακούφισης των τάσεων που συσσωρεύονται κατά τη ροή του τήγματος.

Έχει διαπιστωθεί ότι η εξομάλυνση της γεωμετρίας του καναλιού της ροής του τήγματος μειώνει την τάση για την εμφάνιση του φαινομένου της θραύσης τήγματος σε διακλαδωμένα πολυμερή (Σχήμα 1.19).



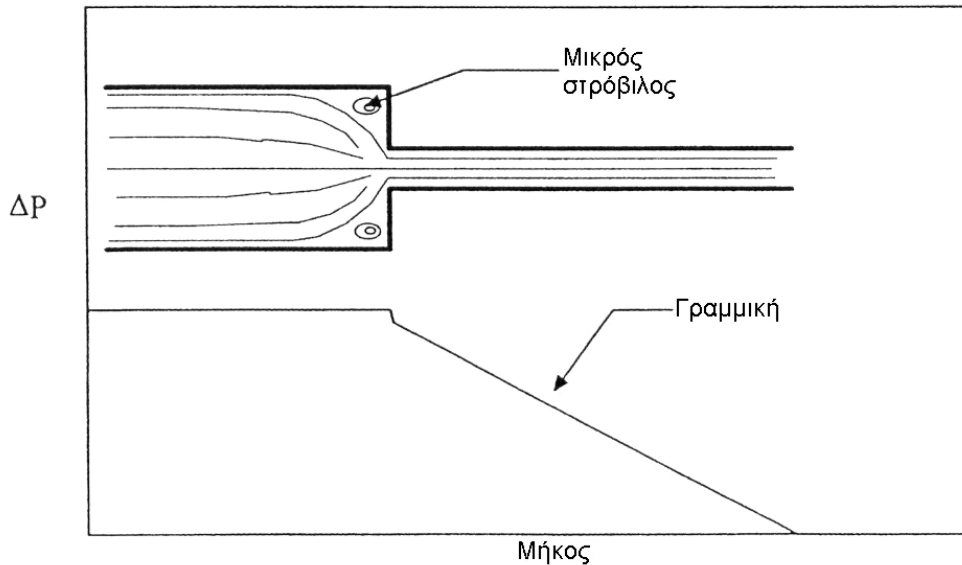
Σχήμα 1.19: Η επίδραση της εξομάλυνσης της γεωμετρίας της μήτρας ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο της “θραύσης τήγματος”.

Αυξημένες θερμοκρασίες στη μήτρα βοηθούν στην εφαρμογή υψηλών ρυθμών εκβολής χωρίς την εμφάνιση θραύσης του τήγματος. Η κρίσιμη διατμητική τάση φαίνεται ότι είναι ανεξάρτητη του μήκους της μήτρας και της θερμοκρασίας. Μειώνεται με την αύξηση του μοριακού βάρους και είναι ανεξάρτητη από την κατανομή του.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 1

ΑΠΟΤΟΜΗ ΣΥΣΤΟΛΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ

Κατά τη ροή τηγμάτων πολυμερών ο αριθμός Reynolds παίρνει πολύ μικρές τιμές $Re: 10^4 \sim 10^{-1}$ (προσέγγιση έρπουσας ροής). Όταν ένα Νευτωνικό ρευστό ρέει σε πολύ χαμηλούς αριθμούς Re από μία δεξαμενή μεγάλης διαμέτρου σε κυλινδρικό αγωγό μικρής διαμέτρου, οι ροϊκές γραμμές ακολουθούν το σχήμα του τοιχώματος και δίνουν στη γωνία του αγωγού ένα πολύ μικρό στρόβιλο.



- Στη δεξαμενή δεν παρατηρείται μετρήσιμη πτώση πίεσης γιατί έχει πολύ μεγάλη ακτίνα.
- Στον αγωγό μεγάλου μήκους (τριχοειδές), η πτώση πίεσης είναι γραμμική και δίνεται από τη σχέση:

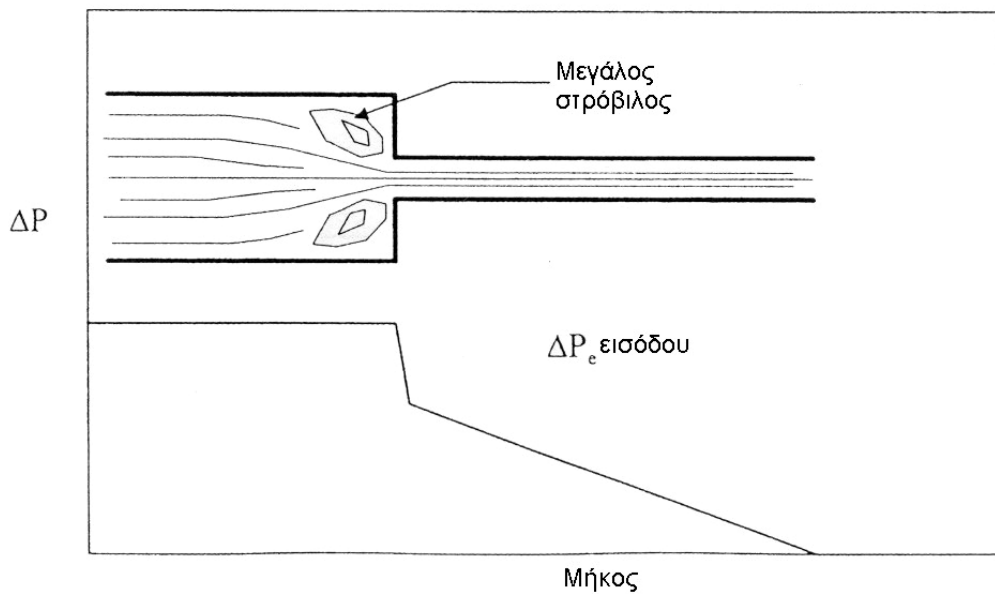
$$\Delta P = 2\tau_w \frac{L}{R}$$

- Στην περιοχή της εισόδου, λόγω της “κάμψης” των ροϊκών γραμμών εμφανίζεται μια μικρή πτώση πίεσης, η οποία μπορεί να προσδιορισθεί με αριθμητική προσομοίωση και επίλυση του συστήματος των εξισώσεων που προκύπτουν από τις αρχές διατήρησης. Έχει βρεθεί ότι δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta P_e = 2\tau_w \cdot 0.587$$

Αυτό σημαίνει ότι η πτώση πίεσης που επέρχεται λόγω της συστολής του ρευστού στην είσοδο είναι ισοδύναμη με αυτή που παρατηρείται σε αγωγό μήκους $L/R=0.587$. Η παραπάνω σχέση ισχύει για νευτωνικά ρευστά. Για τα πολυμερή η ΔP_e εισόδου, εξαρτάται από το παροχή Q και λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται:

$$\Delta P_e = 2\tau_w \cdot (0.587) \approx 2\tau_w \cdot (20)$$



Μεταξύ των ετών 1960-1980 θεωρείτο ότι η ΔP_e συνδέεται με την πρώτη διαφορά των κάθετων τάσεων N_1 η οποία αναπτύσσεται σε τριχοειδής αγωγούς.

Πρόσφατα πειραματικά δεδομένα προτείνουν ότι η ΔP_e εισόδου συνδέεται με το ιξώδες επιμήκυνσης η_e .

Ο Cogswell ανέπτυξε μια μέθοδο για τον υπολογισμό του ιξώδους επιμήκυνσης η_e από την ΔP_e από τη σχέση:

$$\eta_e = \frac{9(n+1)^2 (\Delta P_e)^2}{32\dot{\gamma}^2}$$

$$\text{όπου } \dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3}$$

Η παραπάνω έκφραση δίνει το ιξώδες επιμήκυνσης για ρυθμό επιμήκυνσης:

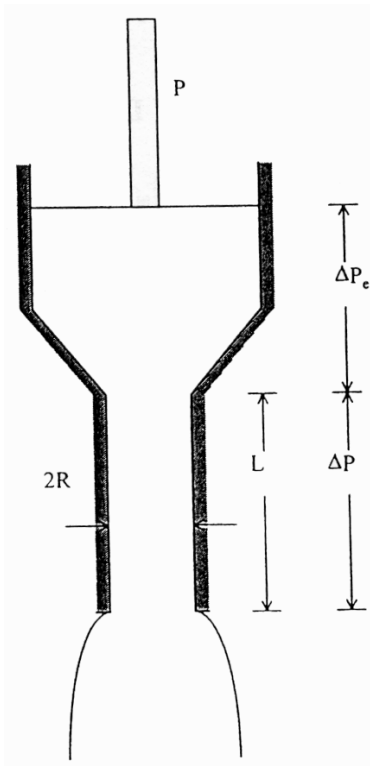
$$\dot{\epsilon} = \frac{4\dot{\gamma}^2}{3(n+1)\Delta P_e}$$

όπου n είναι ο δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς του εκθετικού νόμου.

Η μέθοδος αυτή δεν είναι ιδιαίτερα ακριβής αλλά δίνει αποδεκτά αποτελέσματα, ειδικά σε υψηλούς ρυθμούς επιμήκυνσης όπως $10 \sim 100 \text{ s}^{-1}$, όπου είναι πολύ δύσκολο να ληφθούν ακριβή αποτελέσματα με κάποια άλλη μέθοδο.

Τριχοειδές ιξωδόμετρο και η διόρθωση εισόδου

Το τριχοειδές ιξωδόμετρο είναι μια διάταξη στην οποία το εξεταζόμενο ρευστό αρχικά αποθηκεύεται σε κυλινδρικό δοχείο (δεξαμενή) και στη συνέχεια εξαναγκάζεται να διέλθει ισοθερμοκρασιακά μέσω ενός κυλινδρικού τριχοειδούς σωλήνα. Το αποθηκευτικό δοχείο και ο τριχοειδής σωλήνας είναι ευθυγραμμισμένα με κοινό άξονα.



Όπως αναπτύχθηκε προηγούμενα,

$$\tau_w = -\frac{\Delta P}{2L} R \quad \text{και} \quad \dot{\gamma}_\phi = \frac{4Q}{\pi R^3}$$

Με τη διόρθωση Rabinowitsch, λαμβάνεται ο πραγματικός ρυθμός διάτμησης :

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3} \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{d \ln Q}{d \ln \tau_w} \right)$$

και επομένως το ιξώδες : $\eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w}$

Η ανάλυση με τριχοειδή ιξωδομετρία δίνει καλά αποτελέσματα για ρυθμούς διάτμησης ($\dot{\gamma}$) στην περιοχή $10^0 \sim 10^3$.

Όταν γίνονται πειραματικές μετρήσεις σε τριχοειδής αγωγούς, συνήθως μετράται η πίεση στη δεξαμενή από τη δύναμη στο έμβολο. Επομένως

$$\Delta P_{\text{συνολικό}} = \Delta P_{\text{δεξαμ}} + \Delta P_e + \Delta P_{\text{τριχ}}, \text{ αλλά } \Delta P_{\text{δεξαμ}} \approx 0.$$

Από τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως, για τον υπολογισμό της

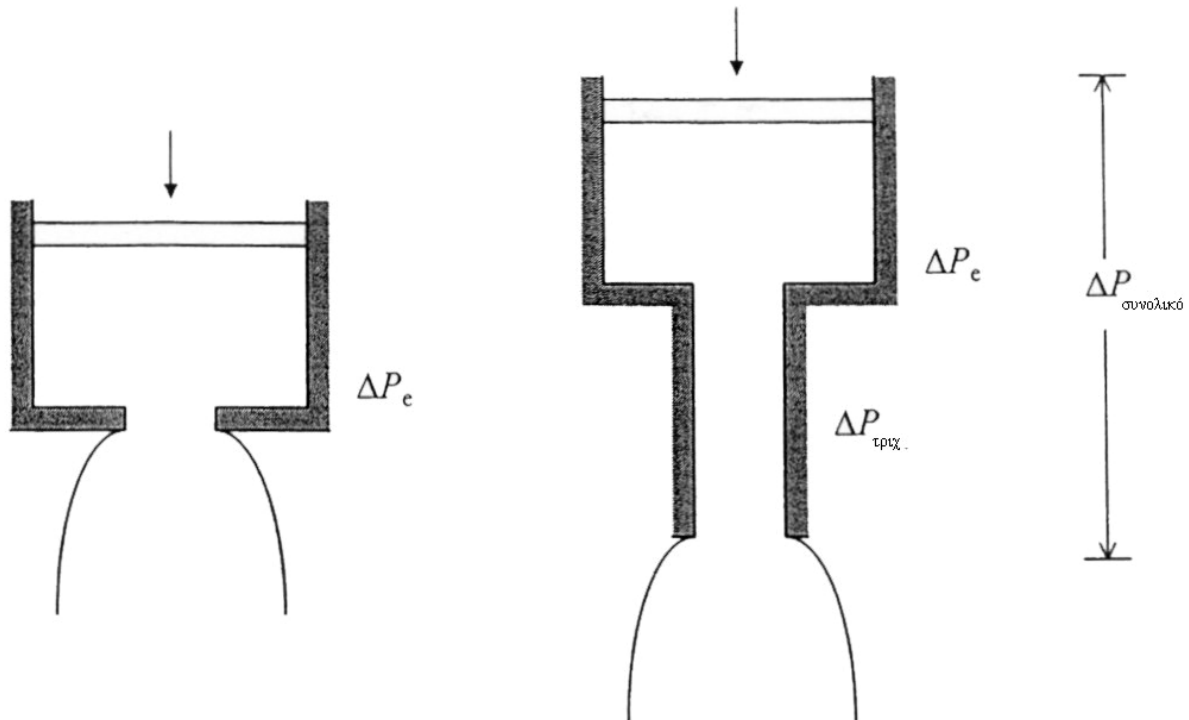
$$\tau_w = \frac{\Delta P}{2L} R$$

η πίεση ΔP που χρησιμοποιείται στην εξίσωση είναι η πίεση στον τριχοειδή αγωγό, $\Delta P_{\text{τριχ.}}$.

Από τις μετρήσεις πίεσης έχουμε:

$$\Delta P_{\text{συνολικό}} = \Delta P_e + \Delta P_{\text{τριχ.}}$$

Επομένως πρέπει με κάποιο τρόπο να αφαιρεθεί η συμβολή της πίεσης εισόδου ΔP_e . Ένας τρόπος για να προσδιορισθεί η ΔP_e , είναι να χρησιμοποιηθεί τριχοειδές με αγωγό μηδενικού μήκους (π.χ. σπής).

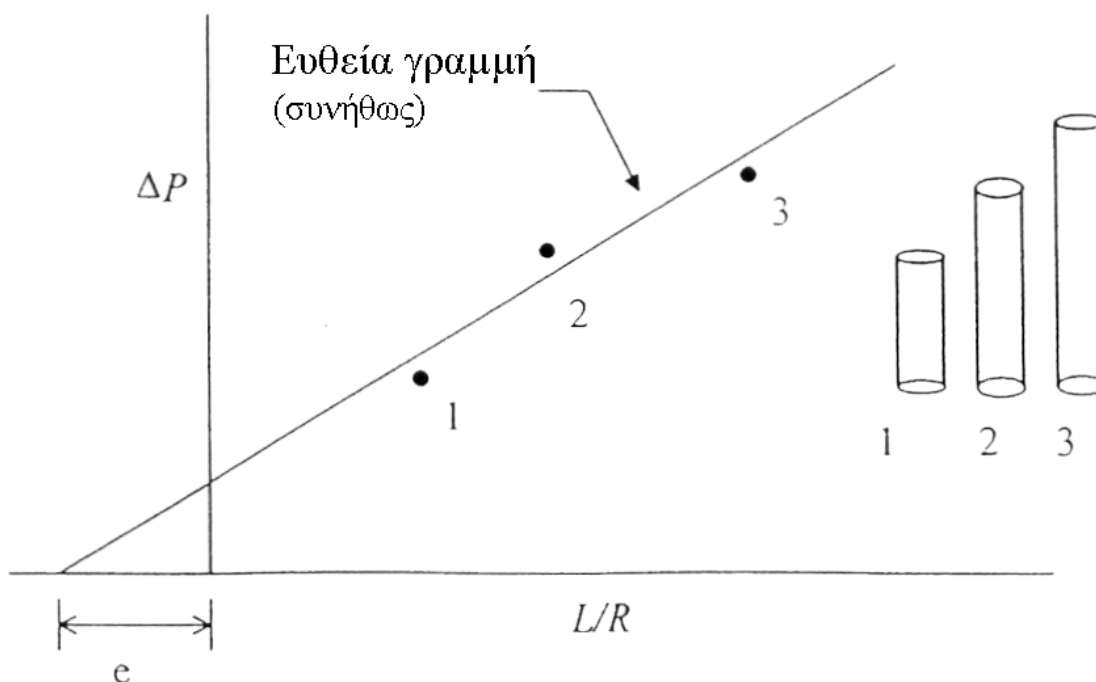


Επομένως: $\Delta P_{\text{τριχ.}} = \Delta P_{\text{συνολικό}} - \Delta P_e$

Στα περισσότερα όργανα χρησιμοποιείται μια άλλη μέθοδος, όπου γίνονται μετρήσεις με 3 ή 4 διαφορετικά τριχοειδή και γίνεται γραφική παράσταση της ΔP σε συνάρτηση με το λόγο L/R .

Στη συνέχεια μπορούμε να γράψουμε:
$$\tau_w = \frac{\Delta P}{2 \left(\frac{L}{R} + e \right)}$$

όπου ο όρος e είναι ο αδιάστατος διορθωτικός συντελεστής εισόδου Bagley.



Μια δεύτερη πηγή πειραματικού σφάλματος προέρχεται από την παραβίαση της συνθήκης *μη-ολίσθησης* (no-slip condition). Σύμφωνα με τη συνθήκη μη-ολίσθησης η ταχύτητα του ρευστού που βρίσκεται σε άμεση επαφή με το τοίχωμα είναι ίση με την ταχύτητα του τοιχώματος. Η ολίσθηση αποδίδεται, μεταξύ άλλων, στις ακόλουθες αιτίες:

- Ολίσθηση λόγω ροής (depletion slip)
- Ολίσθηση λόγω αστοχίας συγκολλητικού δεσμού (adhesive failure)
- Ολίσθηση λόγω αστοχίας δυνάμεων συνάφειας (cohesive failure)

Η ολίσθηση λόγω ροής οφείλεται στο μικρότερο αριθμό των διαθέσιμων μοριακών σχηματισμών για τα τμήματα του πολυμερούς που βρίσκονται κοντά σε σταθερά τοιχώματα. Ως αποτέλεσμα, πολυμερικά μόρια υψηλού μοριακού βάρους που ανήκουν σε πολυδιάσπαρτα τήγματα, κατέχουν μικρότερη ελευθερία διαμορφώσεων όταν βρίσκονται κοντά σε αδιαπέραστα τοιχώματα.

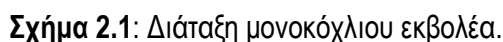
Επομένως και στα δύο μέρη εμφανίζεται μια κινητήρια δύναμη, θερμοδυναμικής προέλευσης, που ωθεί τις υψηλού μοριακού βάρους μοριακές αλυσίδες να διαχυθούν και να απομακρυνθούν από τη διεπιφάνεια τοιχώματος/πολυμερικού τήγματος. Αποτέλεσμα του παραπάνω φαινομένου είναι ότι το ιξώδες του πολυμερούς που βρίσκεται κοντά στα τοιχώματα είναι χαμηλότερο από αυτό της κύριας μάζας του ρευστού. Το ρευστό που ανήκει σε αυτό το στρώμα λειτουργεί ως λιπαντικό στη ροή της κύριας μάζας και διευκολύνει την ογκομετρική παροχή η οποία επέρχεται για δεδομένη πτώση πίεσης.

Η ολίσθηση που προέρχεται από τους άλλους δύο μηχανισμούς προαπαιτεί την ανάπτυξη ισχυρών διατμητικών τάσεων που θα οδηγήσουν σε θραύση τους δεσμούς που αναπτύσσονται μεταξύ πολυμερούς/τοιχώματος (ολίσθηση λόγω συγκόλλησης) ή να γίνει ρήξη των μοριακών εμπλοκών πολυμερούς/τοιχώματος (ολίσθηση λόγω συνάφειας) στην περιοχή κοντά στα τοιχώματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1. Καμπούρη Μ., Παπασπυρίδη Κ., “Τεχνολογία Πολυμερών (Δομή-Ιδιότητες των Πολυμερών)”, ΕΜΠ (1998).
2. Tadmor Z, and Gogos C.G., “Principles of Polymer Processing”, SPE Monographs, Wiley-Interscience, New York (1979).
3. Παναγιώτου Κ., “Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών”, ΠΗΓΑΣΟΣ Θεσσαλονίκη (2001).
4. Μητσούλης Ευάγγ., “Βασικές Αρχές Μορφοποίησης Πολυμερών”, ΕΜΠ (1999).
5. Vlachopoulos J., “Introduction to Plastics Processing”, McMaster Univ. Ontario Canada (2001).
6. Fried J.R., “Polymer Science and Technology”, Prentice Hall PTR, New Jersey (1995).
7. Osswald T.A., “Polymer Processing: Fundamentals”, Hanser Publ. (1998).
8. McKelvey J.M., “Polymer Processing”, J. Wiley and Sons (1962).

Η εκβολή αποτελεί μια από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές τόσο για τη μορφοποίηση όσο και για την ανάμειξη πολυμερών. Περίπου το 60% των πλαστικών παγκοσμίως μορφοποιούνται με τη μέθοδο της εκβολής. Στα προϊόντα που μορφοποιούνται με εκβολή ανήκουν οι σωλήνες, ράβδοι, προφίλ (όπως πλαίσια σε παράθυρα), φιλμ, ίνες, μονωμένα καλώδια για ηλεκτρικές εφαρμογές.



Διακρίνουμε συστήματα εκβολής (i) ενός κοχλίου και (ii) δύο κοχλίων.

Τα βασικά τμήματα που απαρτίζουν μια διάταξη εκβολής είναι τα εξής:

- i. Σύστημα μετάδοσης κίνησης

ii. Κύριο σώμα

iii. Σύστημα μεταφοράς θερμότητας και ελέγχου της θερμοκρασίας

iv. Μήτρα εκβολής

Σε μια συνήθη διάταξη εκβολής το πολυμερές σε μορφή σκόνης ή κόκκων (pellets) αναμιγνύεται με τα απαραίτητα πρόσθετα και μέσω της χοάνης τροφοδοσίας προωθούνται στο κυλινδρικό σώμα του εκβολέα.

Ο κοχλίας περιστρέφεται από το σύστημα μετάδοσης κίνησης που αποτελείται από ένα ηλεκτροκινητήρα και ένα κιβώτιο ταχυτήτων για τον έλεγχο των στροφών του κοχλία. Το σύστημα μετάδοσης κίνησης εξασφαλίζει τις απαιτήσεις της διάταξης σε μηχανική ενέργεια.

Η απαιτούμενη μηχανική ενέργεια μιας διάταξης εκβολής αυξάνεται όταν:

- (1) αυξάνεται η ογκομετρική παροχή εξόδου
- (2) αυξάνεται η διάμετρος του κυλινδρικού σώματος
- (3) αυξάνεται το μήκος του κοχλία και
- (4) όταν απαιτείται υψηλή ογκομετρική παροχή εξόδου σε υψηλές θερμοκρασίες.

Οι απαιτήσεις σε μηχανική ενέργεια επίσης εξαρτώνται από τον τύπο της πολυμερικής ρητίνης και το σχεδιασμό της μήτρας.

Το σύστημα μεταφοράς θερμότητας αποτελείται από θερμαντικά στοιχεία ηλεκτρικής αντίστασης, σύστημα ψύξης στην περιοχή της τροφοδοσίας και έναν αριθμό θερμοστοιχείων. Τα θερμοστοιχεία είναι συνδεδεμένα με τους ρυθμιστές θερμοκρασίας οι οποίοι ενεργοποιούν τα θερμαντικά ή ψυκτικά στοιχεία ώστε να διατηρηθεί το επιθυμητό θερμοκρασιακό προφίλ στον εκβολέα.

Κατά την περιστροφή του ο κοχλίας δέχεται μια ώθηση από το πολυμερικό τήγμα προς το πίσω μέρος του εκβολέα. Για το λόγο αυτό υπάρχουν τα έδρανα αντίθλιψης που λειτουργούν για την απόσβεση αυτής της δράσης.

Το κύριο σώμα της διάταξης εκβολής αποτελείται από τον *κύλινδρο* (barrel) και τον *κοχλία* (screw).

Ο κύλινδρος είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα και η εσωτερική επιφάνεια είναι ειδικά επεξεργασμένη για να έχει αντίσταση στην τριβή και στη διάβρωση. Η εσωτερική διάμετρος του κυλίνδρου είναι μια σημαντική παράμετρος που καθορίζει το μέγεθος και τη δυναμικότητα ενός εκβολέα.

Με τη βοήθεια του ηλεκτροκινητήρα ο κοχλίας περιστρέφεται αξονικά μέσα στον κύλινδρο, προωθώντας το πολυμερές που τροφοδοτείται μέσω της χοάνης τροφοδοσίας. Κατά τη διαδρομή προς την έξοδο το προϊόν τήκεται, συμπιέζεται και εξέρχεται μέσω της μήτρας εκβολής.

Η τήξη συντελείται από τους ακόλουθους μηχανισμούς:

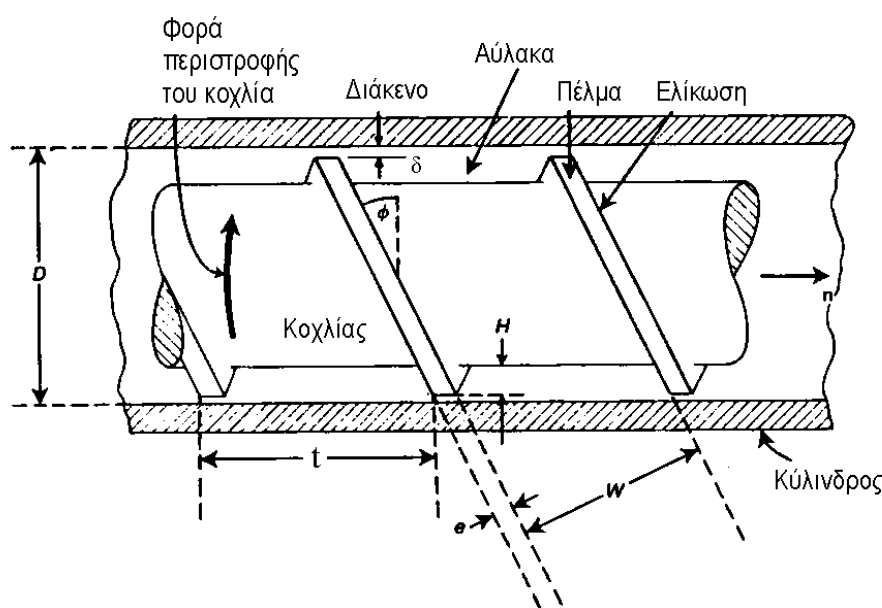
- μεταφορά θερμότητας από τα θερμαντικά στοιχεία και
- από τη διάτμηση που προκαλεί η κίνηση του κοχλία.

Ο κοχλίας εκτελεί σημαντικές λειτουργίες όπως:

- Μεταφορά της ρητίνης μέσα στον εκβολέα
- Μετάδοση της μηχανικής ενέργειας η οποία αποτελεί μέρος της διαδικασίας τήξης
- Ανάμειξη των διαφορετικών πρώτων υλών
- Ανάπτυξη πίεσης στον εκβολέα ούτως ώστε η ρητίνη να εξωθηθεί στη μήτρα.

Μια σημαντική παράμετρος η οποία συνδέεται με τον κοχλία είναι ο αδιάστατος λόγος L/D , όπου L το μήκος του κοχλία και D η διάμετρός του. Για τα θερμοπλαστικά ο λόγος L/D κυμαίνεται συνήθως από 16:1 μέχρι 32:1, ενώ για τα ελαστομερή είναι πολύ μικρότερος και κυμαίνεται μεταξύ 4:1 μέχρι 7:1.

Η διάμετρος του κοχλία ποικίλει, με τιμές κάτω των 20mm για τους εργαστηριακούς εκβολείς, ενώ στους βιομηχανικούς εκβολείς η διάμετρος φθάνει τα 750mm. Γενικά, όσο αυξάνει το μήκος του κοχλία τόσο αυξάνει και η απόδοση της εγκατάστασης ανά μονάδα καταναλισκόμενης ισχύος, καθώς και η ομοιομορφία του τήγματος και η ακρίβεια των διαστάσεων του εξερχόμενου προϊόντος.



Σχήμα 2.2: Λεπτομέρειες στη γεωμετρία του κοχλία.

Η διάμετρος του κυλίνδρου D_b είναι σταθερή σε όλο το μήκος του εκβολέα. Η γωνία που σχηματίζει η έλικα με έναν άξονα κάθετο προς τον κοχλία ονομάζεται *γωνία ελίκωσης* (ϕ).

Το διάστημα που προχωρεί η ελίκωση σε μια πλήρη περιστροφή ονομάζεται *βήμα* (t). Σε πολλούς κοχλίες σε μια πλήρη στροφή η ελίκωση προχωρεί κατά μήκος ίσο προς τη διάμετρο. Στην περίπτωση αυτή έχουμε κοχλία *τετράγωνου βήματος* (squared pitched screw) και αντιστοιχεί σε γωνία ελίκωσης $\phi=17.65^\circ$.

Το *πέλμα* της ελίκωσης είναι η επιφάνειά της που είναι στραμμένη προς το σώμα του κυλίνδρου του εκβολέα.

Το πλάτος του πέλματος και το διάκενο μεταξύ πέλματος σώματος του κυλίνδρου, συμβολίζονται με e και δ αντίστοιχα.

Για τη διάμετρο του κοχλίου ισχύει: $D_s = D_b - 2\delta$

Το διάκενο (δ) είναι τόσο μικρό ώστε η διάμετρος του κυλίνδρου (D_b) και η διάμετρος του κοχλίου (D_s) μπορεί να θεωρηθεί ότι στις περισσότερες εφαρμογές ταυτίζονται:

$$D_b = D_s = D.$$

Το διάκενο που υπάρχει μεταξύ των σπειρών της ελίκωσης ονομάζεται *αύλακα*. Το πλάτος της αύλακας παρίσταται με W και το βάθος με H .

Στον κοχλία διακρίνουμε τρεις ζώνες: τη ζώνη *τροφοδοσίας* (feed section), τη ζώνη *συμπίεσης* ή *τήξης* (compression section) και ζώνη *δοσιμετρίας* (metering section).

Ζώνη τροφοδοσίας:

Η λειτουργία της ζώνης αυτής έχει ως σκοπό την προθέρμανση του πολυμερούς και τη μεταφορά του στην επόμενη ζώνη. Η ζώνη τροφοδοσίας χαρακτηρίζεται από σταθερό και σχετικά μεγάλο βάθος αύλακας. Προσοχή πρέπει να δοθεί ώστε το υλικό να μην υπερθερμανθεί πολύ γρήγορα γιατί στην περίπτωση αυτή η ρητίνη θα κολλήσει στον κοχλία και απλώς θα περιστρέφεται χωρίς να μεταφέρεται στην επόμενη ζώνη.

Η ζώνη τροφοδοσίας σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει τη μεγαλύτερη δυνατότητα μεταφοράς στα επόμενα τμήματα του κοχλίου ώστε να μην παρουσιασθεί έλλειψη υλικού.

Ζώνη συμπίεσης ή τήξης:

Κατά μήκος της ζώνης αυτής το βάθος της αύλακας του κοχλίου μειώνεται βαθμιαία, με αποτέλεσμα το τήγμα να συμπιέζεται και να εξαναγκάζεται ο εγκλωβισμένος από το πλαστικό αέρας καθώς και άλλες πτητικές ουσίες, να εξέλθουν από το πολυμερές.

Ζώνη δοσιμετρίας:

Στη ζώνη αυτή ο κοχλίας χαρακτηρίζεται από σταθερό και πολύ μικρό βάθος αύλακας. Το μικρό βάθος της αύλακας επιφέρει την ανάπτυξη υψηλών διατμητικών τάσεων στη ρητίνη με αποτέλεσμα την ολοκλήρωση της τήξης του πολυμερούς. Η ανάπτυξη υψηλών διατμητικών τάσεων στη ζώνη αυτή οδηγεί στην ανάπτυξη πίεσης στο πολυμερικό τήγμα, ούτως ώστε να εξωθηθεί προς την έξοδο του εκβολέα. Το τήγμα ομογενοποιείται και με ομοιόμορφη σύσταση, θερμοκρασία και πίεση οδηγείται με σταθερή παροχή στη μήτρα εκβολής.

Η συμπίεση του πολυμερούς οφείλεται στην προοδευτική μείωση στο βάθος της αύλακας του κοχλίου κατά μήκος του εκβολέα. Μια σημαντική παράμετρος ενός συστήματος εκβολής είναι ο *λόγος συμπίεσης* (compression ratio), που ορίζεται ως ο λόγος του βάθους της αύλακας στη ζώνη τροφοδοσίας προς το βάθος της αύλακας στη ζώνη δοσιμετρίας.

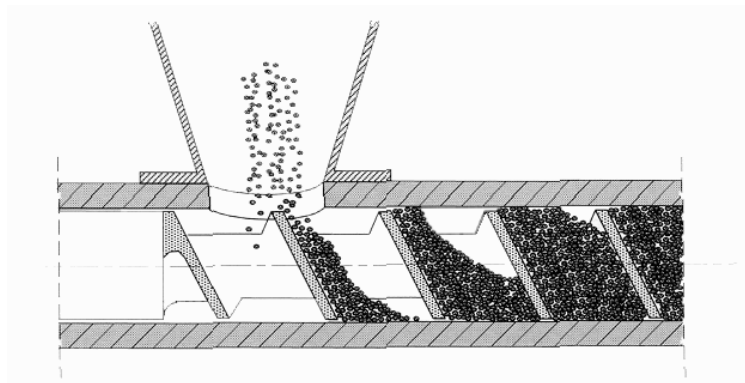
Μετά τον κοχλία το τήγμα οδηγείται σε μια πλάκα όπου είναι στερεωμένα μεταλλικά πλέγματα, τα οποία χρησιμεύουν ως φίλτρα για την κατακράτηση ακαθαρσιών και άλλων ξένων σωμάτων που τυχόν εμπεριέχονται στο πολυμερές.

Οι βασικές λειτουργίες που συμβαίνουν κατά τη διεργασία της εκβολής είναι οι εξής:

- Μεταφορά των στερεών σωματιδίων
- Πλαστικοποίηση ή τήξη
- Μεταφορά του τήγματος
- Απαερίωση
- Ανάμειξη και
- Μορφοποίηση

2.3 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΤΕΡΕΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Η μεταφορά των κόκκων του πολυμερούς από τη χοάνη στον κύλινδρο του εκβολέα γίνεται λόγω βαρύτητας. Μελέτες έχουν γίνει για τον κατάλληλο σχεδιασμό της χοάνης ώστε να επιτρέπεται ομαλή ροή του πολυμερούς στον κύλινδρο.



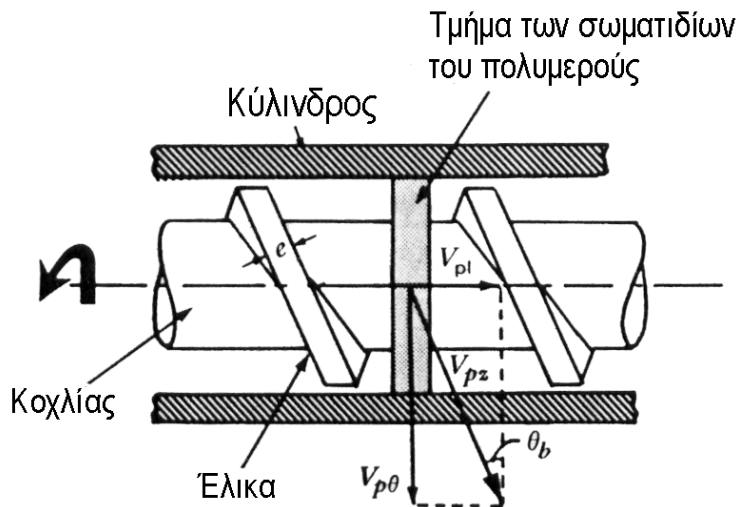
Σχήμα 2.3: Μεταφορά των κόκκων στις πρώτες στροφές του κοχλίου.

Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι στις περισσότερες των περιπτώσεων, τα στερεά σωματίδια δημιουργούν μια συμπαγή κλίνη και μετακινούνται μέσα στην αύλακα του κοχλίου με εμβολική ροή. Με τη ροή αυτή, σε κάθε εγκάρσια διατομή της κλίνης όλα τα σωματίδια έχουν την ίδια ταχύτητα και δεν συμβαίνει κάποια εσωτερική παραμόρφωση. Όταν η αύλακα δεν γεμίζει πλήρως και δεν υπάρχει αρκετή πίεση ώστε να δημιουργηθεί η κλίνη των στερεών, δεν παρατηρείται εμβολική ροή και τα σωματίδια υφίστανται εσωτερική παραμόρφωση.

Η πρώτη ολοκληρωμένη προσέγγιση της μεταφοράς των στερεών σωματιδίων σε μονοκροχλιο εκβολέα έγινε από τους Darnell και Mol το 1956. Στη συνέχεια πολλοί ερευνητές στηριζόμενοι πάνω στις ίδιες βασικές αρχές ανέπτυξαν την εργασία των Darnell και Mol.

Στο μοντέλο που ανέπτυξε ο Tadmor, υιοθετεί την εμβολική ροή των στερεών σωματιδίων σε ρηχή αύλακα στη ζώνη τροφοδοσίας του κοχλίου. Για μόνιμες συνθήκες το σώμα των σωματιδίων, που μετατοπίζεται με εμβολική κίνηση στην

αύλακα, έχει σταθερή αξονική ταχύτητα V_{pl} και σταθερή γωνιακή ταχύτητα $V_{p\theta}$ (Σχήμα 9.4).



Σχήμα 2.4: Αξονική μετατόπιση των στερεών. Οι ταχύτητες δίνονται σχετικά με ακίνητο κοχλία: V_{pl} είναι η αξονική ταχύτητα των στερεών η οποία είναι ανεξάρτητη από την ακτινική θέση, $V_{p\theta}$ και V_{pz} είναι η εφαπτομενική και η κατά την κάτω κατεύθυνση της αύλακας ταχύτητες αντίστοιχα.

Αποδεικνύεται ότι ο ρυθμός ροής μάζας G δίνεται από την εξίσωση:

$$G = \pi^2 N H D_b (D_b - H) \rho_b \frac{\tan \phi \tan \theta_b}{\tan \phi + \tan \theta_b} \left[1 - \frac{e}{\pi (D_b - H) \sin \bar{\theta}} \right] \quad [2.1]$$

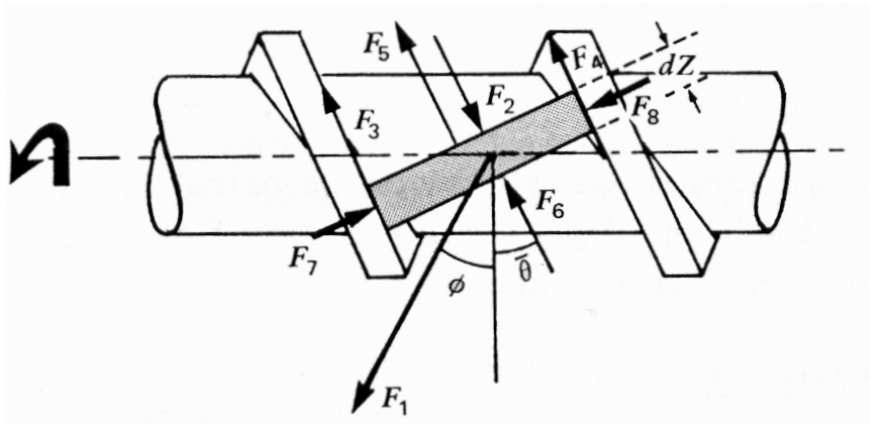
όπου D_b είναι η εσωτερική διάμετρος του κυλίνδρου, H είναι το βάθος της αύλακας, e το πλάτος του πέλματος της έλικας, $\bar{\theta}$ η μέση γωνία της ελίκωσης, ϕ είναι η γωνία που σχηματίζεται από τον άξονα της δύναμης που ασκείται από τον κύλινδρο στα σωματίδια (F_1) και την κάθετο στον άξονα του κοχλίου.

Λόγω ότι οι μεταβολές στην πυκνότητα της μάζας των σωματιδίων δεν μπορούν να αγνοηθούν, οι υπολογισμοί γίνονται για μικρές αξονικές μετατοπίσεις. Για την ανάλυση της διεργασίας θα χρησιμοποιηθούν τα ισοζύγια μάζας και ροπών. Θεωρείται ότι η πίεση μεταβάλλεται μόνο κατά την κάτω κατεύθυνση της αύλακας, επομένως τα ισοζύγια μάζας και ροπών λαμβάνονται για μικρές μετατοπίσεις σε αυτή την κατεύθυνση.

Στο Σχήμα 2.5 φαίνονται οι διάφορες δυνάμεις οι οποίες δρουν πάνω σε στοιχειώδη όγκο των σωματιδίων. Οι δυνάμεις αυτές εκφράζονται με τη χρήση των συντελεστών τριβής (f), την τοπική γεωμετρία και τη διαφορά της πίεσης. Για ισότροπη κατανομή των τάσεων ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned}
F_1 &= f_b P W_b dz_b \\
F_6 - F_2 &= H \bar{W} dP \\
F_8 &= PH d\bar{z} \\
F_7 &= PH d\bar{z} + F^* \\
F_3 &= f_s F_7 \\
F_4 &= f_s F_8 \\
F_5 &= f_s P W_s dz_s
\end{aligned}
\tag{2.2}$$

όπου οι δείκτες $_b$ και $_s$ δηλώνουν την επιφάνεια του κυλίνδρου και το σώμα του κοχλία αντίστοιχα, και το σύμβολο $(\bar{})$ τη μέση τιμή σε όλο το βάθος της αύλακας. Όπου F^* είναι επιπρόσθετη κάθετη δύναμη, η οποία είναι άγνωστη.



Σχήμα 2.5: Δυνάμεις που εξασκούνται για μικρή εμβολική μετατόπιση των στερεών κατά την κάτω κατεύθυνση της αύλακας: F_1 είναι η δύναμη προώθησης λόγω τριβής που εξασκείται στα σωματίδια από την επιφάνεια του κυλίνδρου, $F_6 - F_2$ είναι η καθαρή δύναμη που προκύπτει από τη βαθμίδα της πίεσης στην κάτω κατεύθυνση της αύλακας, F_3 , F_4 και F_5 είναι οι επιβραδυντικές δυνάμεις λόγω τριβής του κοχλία, και F_7 και F_8 είναι οι κάθετες τάσεις που ασκούνται από τις ελικώσεις του κοχλία στα στερεά σωματίδια.

Η κίνηση των σωματιδίων περιλαμβάνει μεταφορά στην αξονική διεύθυνση και περιστροφή υπό γωνία. Επομένως γίνεται υπολογισμός των συνιστωσών των δυνάμεων στην αξονική και στην εφαπτομενική διεύθυνση, και λαμβάνεται ισοζύγιο δυνάμεων στην πρώτη περίπτωση και ροπών στη δεύτερη. Με επίλυση αυτών των εξισώσεων, αγνοώντας τη δύναμη F^* και με ανακατάταξη των όρων λαμβάνεται η ακόλουθη έκφραση:

$$\cos \phi = K_s \sin \phi + M \tag{2.3} \quad \text{ή}$$

$$\sin \phi = \frac{\sqrt{1 + K_s^2 - M^2} - K_s M}{1 + K_s^2} \tag{2.4}$$

όπου

$$K_s = \frac{\bar{D} \sin \bar{\theta} + f_s \cos \bar{\theta}}{D_b \cos \bar{\theta} - f_s \sin \bar{\theta}} \quad [2.5]$$

και

$$M = 2 \frac{H}{W_b} \frac{f_s}{f_b} \sin \theta_b \left(K_s + \frac{\bar{D}}{D_b} \cot \bar{\theta} \right) + \frac{W_s}{W_b} \frac{f_s}{f_b} \sin \theta_b \left(K_s + \frac{D_s}{D_b} \cot \bar{\theta}_s \right) + \frac{\bar{W}}{W_b} \frac{H}{Z_b} \frac{1}{f_b} \sin \bar{\theta} \left(K_s + \frac{\bar{D}}{D_b} \cot \bar{\theta} \right) \ln \frac{P_2}{P_1} \quad [2.6]$$

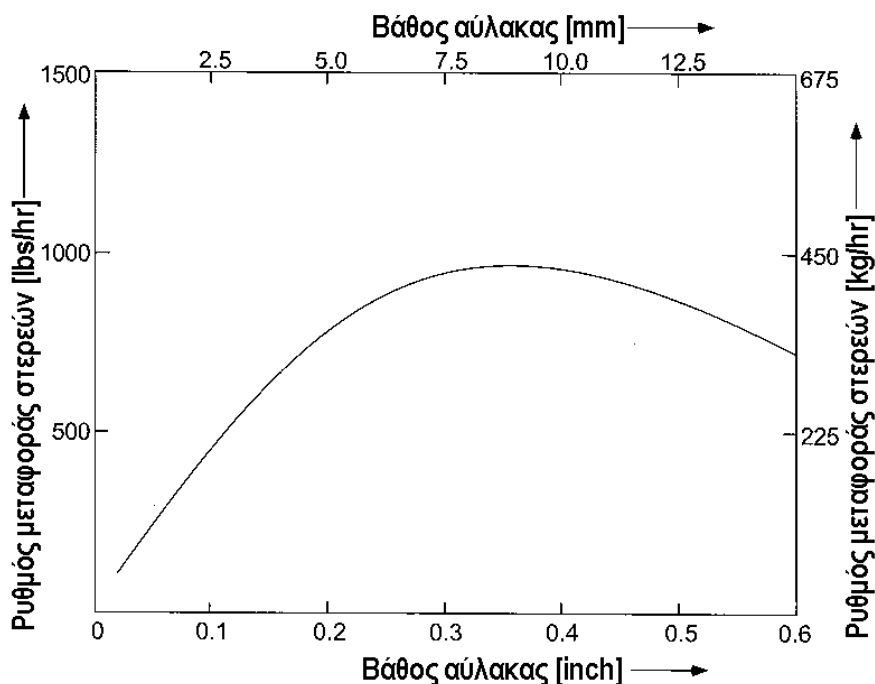
όπου P_1 είναι η αρχική πίεση για $z=0$ και P_2 είναι η πίεση σε οποιαδήποτε απόσταση στην κάτω κατεύθυνση της αύλακας Z_b , όπου η μόνη κίνηση που λαμβάνει χώρα είναι η μεταφορά των στερεών. Για δεδομένο ρυθμό ροής η γωνία ϕ λαμβάνεται από την εξίσωση [2.1], το M υπολογίζεται από την [2.3] και η αύξηση της πίεσης από την [2.6]. Αν απαιτείται δεδομένη αύξηση της πίεσης, ακολουθείται η αντίστροφη πορεία.

Η δύναμη τριβής με τα τοιχώματα του κυλίνδρου προστατεύει τα σωματίδια από την ελεύθερη περιστροφή τους με την περιστροφή του κοχλία, και επομένως αποτελεί δύναμη προώθησης της κλίνης των στερεών σωματιδίων προς την έξοδο. Η δύναμη τριβής με την επιφάνεια του κοχλία ευνοεί την περιστροφή των σωματιδίων και κατά συνέπεια αποτελεί επιβραδυντική δύναμη στην αξονική μετακίνηση της κλίνης των στερεών σωματιδίων. Επομένως στην περίπτωση που η δύναμη τριβής στην επιφάνεια του κυλίνδρου είναι μηδενική, δεν συμβαίνει αξονική μετατόπιση του υλικού προς την έξοδο του εκβολέα. Όταν η δύναμη τριβής στον κοχλία είναι μηδενική, έχουμε τη μέγιστη αξονική μετατόπιση των σωματιδίων.

Με βάση τα παραπάνω, η προώθηση των κόκκων πολυμερούς προς την έξοδο του εκβολέα είναι ταχύτερη όσο μικρότερη είναι η τριβή που αναπτύσσεται με τον κοχλία και όσο μεγαλύτερη είναι η τριβή με τον κύλινδρο. Για το λόγο αυτό οι κοχλίες έχουν γυαλισμένες επιφάνειες ενώ τα τοιχώματα των κυλίνδρων είναι τραχεία και σε μερικές περιπτώσεις σκόπιμα αυλακωμένα.

Η μαθηματική ανάλυση της ικανότητας μεταφοράς των στερεών σωματιδίων, όπως είδαμε και προηγουμένως, αποτελεί συνάρτηση της γεωμετρίας του κοχλία και των ιδιοτήτων του πολυμερούς. Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται η εξάρτηση του ρυθμού μεταφοράς των στερεών σωματιδίων από το βάθος της αύλακας του κοχλία. Για την περιοχή των μικρών τιμών, ο ρυθμός μεταφοράς των σωματιδίων αυξάνει με αύξηση στο βάθος της αύλακας. Εντούτοις με περαιτέρω αύξηση του βάθους, ο ρυθμός μεταφοράς φτάνει σε μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να εξηγηθεί αν ληφθούν υπόψη οι δυνάμεις που ασκούνται στην κλίνη των στερεών. Αν αυξηθεί το βάθος της αύλακας θα αυξηθούν οι δυνάμεις τριβής στον κοχλία ενώ δεν θα επηρεασθούν οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται με την επιφάνεια του κυλίνδρου. Επομένως η δύναμη επιβράδυνσης θα αυξηθεί ενώ η δύναμη προώθησης παραμένει η ίδια, γεγονός που οδηγεί στη μείωση του ρυθμού μεταφοράς των στερεών. Εν τούτοις, η αύξηση στο βάθος της αύλακας αυξάνει την

εγκάρσια επιφάνειά της και αυτό επιφέρει αύξηση στο ρυθμό μεταφοράς των σωματιδίων. Η παραπάνω συμπεριφορά εξηγεί το γεγονός ότι ο ρυθμός μεταφοράς αρχικά αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται.



Σχήμα 2.6: Μεταφορά στερεών σε συνάρτηση με το βάθος της άλακας για εκβολέα μήκους 75mm, ταχύτητα περιστροφής κοχλία 100rpm, και συντελεστή τριβής κοχλία και κυλίνδρου 0.2 και 0.3 αντίστοιχα.

Ο συντελεστής τριβής επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, επομένως οποιαδήποτε θερμοκρασιακή αλλαγή στον κοχλία ή στον κύλινδρο θα επηρεάσει αντίστοιχα και τις τιμές του συντελεστή τριβής.

2.3.1 Ανάπτυξη θερμότητας λόγω τριβής

Κατά τη φάση μεταφοράς της κλίνης των στερεών παρατηρείται το φαινόμενο της ανάπτυξης θερμότητας λόγω τριβής, η οποία ανεβάζει τη θερμοκρασία στη διεπιφάνεια της κλίνης των στερεών και του κυλίνδρου σε σχέση με τις θερμοκρασίες που έχουν ρυθμιστεί εξωτερικά. Η θερμότητα αυτή διοχετεύεται με αγωγή προς δύο κατευθύνσεις: είτε προς την κλίνη των στερεών ή προς τον κύλινδρο του εκβολέα. Αν υπάρχει εντατική ψύξη στον κύλινδρο, το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας θα μεταφέρεται προς αυτόν με αποτέλεσμα να περιορίζεται η θερμότητα που μεταφέρεται στα στερεά σωματίδια και επομένως να επιμηκύνεται η ζώνη μεταφοράς των στερεών του εκβολέα. Η θερμότητα που εκλύεται λόγω τριβής και η διάχυση θερμότητας με αγωγή από τα θερμαινόμενα τοιχώματα του κυλίνδρου οδηγεί στη σταδιακή άνοδο της θερμοκρασίας προς την έξοδο του εκβολέα. Όταν τα σωματίδια φθάσουν στη θερμοκρασία τήξης, η ζώνη μεταφοράς ολοκληρώνεται με την εμφάνιση λεπτού στρώματος τήγματος στην επιφάνεια του κυλίνδρου οπότε και σταματά ο

μηχανισμός τριβής μεταξύ στερεών (μεταλλικής επιφάνειας κυλίνδρου-στερεών σωματιδίων).

2.3.2 Ζώνη κυλίνδρου με αυλακώσεις (Grooved barrel section)

Όπως αναφέρθηκε, η μεταφορά των στερεών σωματιδίων μπορεί να βελτιωθεί με την αύξηση της τραχύτητας της εσωτερικής επιφάνειας του κυλίνδρου. Η απαίτηση για μεγάλο συντελεστή τριβής οδήγησε στη δημιουργία αυλακώσεων, με κατάλληλη μηχανουργική επεξεργασία των τοιχώματα του κυλίνδρου.

Η δημιουργία ζώνης με αυλακώσεις στα τοιχώματα του κυλίνδρου διαπιστώθηκε ότι:

- Βελτιώνει την ογκομετρική παροχή εξόδου του εκβολέα.
- Βελτιώνει τη σταθερότητα της διεργασίας εκβολής
- Μειώνει την ευαισθησία της ογκομετρικής παροχής στις μεταβολές της πίεσης
- Δίνεται η δυνατότητα επεξεργασίας υλικών που δεν ήταν εφικτό με κοινό εκβολέα, όπως πολυμερή πολύ υψηλού μοριακού βάρους

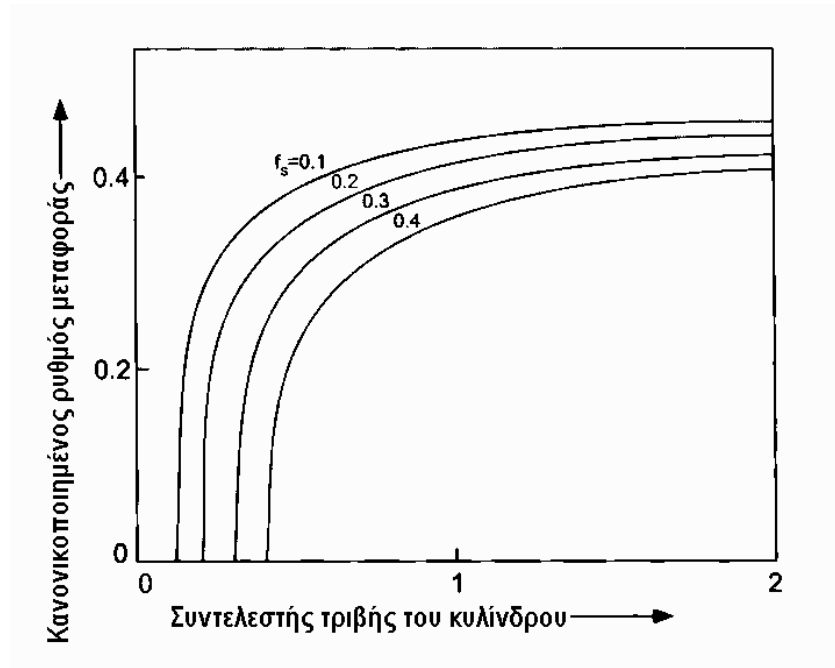
Το μήκος του κυλίνδρου που φέρει αυλακώσεις εκτείνεται μεταξύ 3 έως 5 D από την είσοδο της τροφοδοσίας. Το βάθος των αυλακώσεων γενικά μειώνεται γραμμικά και μηδενίζεται στο τέλος ζώνης. Για να αποφευχθεί η απότομη άνοδος της θερμοκρασίας λόγω της ανάπτυξης θερμότητας λόγω τριβής στη ζώνη αυτή, είναι απαραίτητο να υπάρχει στην επιφάνεια του κυλίνδρου σύστημα ψύξης.

Στο Σχήμα 2.7 παριστάνονται οι καμπύλες του ρυθμού μεταφοράς των στερεών σε συνάρτηση του συντελεστή τριβής του κυλίνδρου f_b για διάφορες σταθερές τιμές του συντελεστή τριβής του κοχλία f_s και για μηδενική βαθμίδα πίεσης. Παρατηρείται ότι οι τιμές του ρυθμού μεταφοράς αυξάνουν απότομα στην περιοχή των χαμηλών τιμών του f_b , ενώ σε υψηλότερες τιμές οδηγούμαστε σε “πλατώ”.

Δύο σημαντικά προβλήματα γίνονται αισθητά όταν ο f_b παίρνει τιμές παραπλήσιες με τον f_s , ($f_b \approx f_s$):

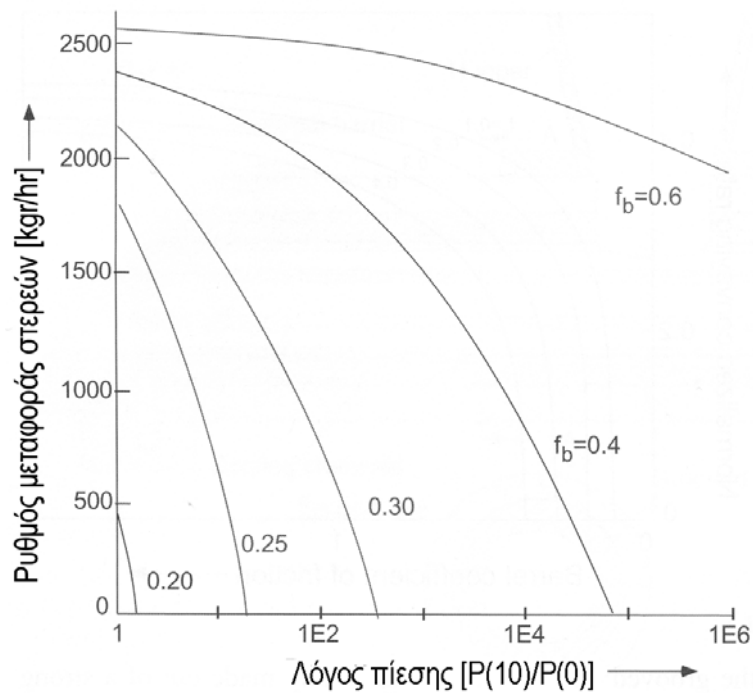
- ο ρυθμός μεταφοράς στερεών είναι σημαντικά χαμηλότερος από τη θεωρητικά αναμενόμενη μέγιστη τιμή.
- μικρές μεταβολές του f_b επιφέρουν μεγάλες αλλαγές στο ρυθμό μεταφοράς των στερεών σωματιδίων, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μια εξαιρετικά ασταθή διεργασία εκβολής.

Όταν $f_b \gg f_s$, μικρές μεταβολές στον f_b επιφέρουν μικρές αλλαγές στο ρυθμό μεταφοράς των στερεών σωματιδίων. Επομένως η διεργασία είναι πιο σταθερή στην περίπτωση που ο f_b είναι πολύ μεγαλύτερος από τον f_s . Το γεγονός αυτό εξηγεί τον τρόπο με τον οποίο η ζώνη με αυλακώσεις μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ευστάθεια μιας διεργασίας εκβολής.



Σχήμα 2.7: Ο ρυθμός μεταφοράς των στερεών σωματιδίων σε συνάρτηση με το συντελεστή τριβής του κυλίνδρου.

Στο Σχήμα 2.8 φαίνεται πως διαφοροποιείται ο ρυθμός μεταφοράς των στερεών σωματιδίων σε συνάρτηση με τη βαθμίδα της πίεσης στη ζώνη μεταφοράς.



Σχήμα 2.8: Ο ρυθμός μεταφοράς των στερεών σωματιδίων σε συνάρτηση με το λόγο της πίεσης.

Όταν $f_b=f_s$, σε μηδενική βαθμίδα πίεσης ο ρυθμός μεταφοράς των στερεών είναι αρκετά χαμηλός και μειώνεται απότομα όσο αυξάνει η βαθμίδα της πίεσης. Καθώς ο f_b αυξάνει, με σταθερό τον f_s , ο ρυθμός μεταφοράς σε μηδενική βαθμίδα πίεσης αυξάνει και η επίδραση της πίεσης στη μείωση γίνεται λιγότερο σημαντική. Σε σχετικά υψηλές τιμές του f_b , η πτώση της πίεσης με την μεταβολή της πίεσης γίνεται πολύ μικρότερη, ουσιαστικά το σύστημα γίνεται ανεξάρτητο της πίεσης.

Τα μειονεκτήματα της χρήσης κυλίνδρων με αυλακώσεις είναι τα εξής:

- Ανάπτυξη υψηλών πιέσεων και φθορές λόγω τριβής
- Υψηλότερες απαιτήσεις ροπών
- Συσσώρευση υλικού στις αυλακώσεις

2.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΛΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η ζώνη τήξης ξεκινά από τη στιγμή που εμφανίζεται το τήγμα του πολυμερούς και συνήθως βρίσκεται σε απόσταση 3 μέχρι 5D από τη θέση της τροφοδοσίας. Το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας λόγω τριβής εκλύεται στη διεπιφάνεια της κλίνης των στερεών σωματιδίων και του κυλίνδρου, επομένως τα πρώτα δείγματα πολυμερικού τήγματος εμφανίζονται στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Όσο προχωρά η διαδικασία τήξης, αυξάνει το πάχος στο *λεπτό στρώμα τήγματος* (melt film) που δημιουργείται στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι κατά τα αρχικά στάδια της τήξης, το λεπτό στρώμα τήγματος υφίσταται υψηλό ρυθμό διάτμησης γεγονός που οδηγεί σε ταχύτατη αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού και κατά συνέπεια σε υψηλό ρυθμό τήξης.

Για επιτευχθεί υψηλή αποτελεσματικότητα στην τήξη του πολυμερούς, είναι σημαντικό το στρώμα του τήγματος να έχει μικρό πάχος. Με λεπτό πάχος επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ανάπτυξη θερμότητας λόγω τριβής, ενώ η θερμότητα από τον κύλινδρο έχει μικρότερη απόσταση να διανύσει μέχρι να συναντήσει την κλίνη των στερεών. Το πάχος που θα έχει το στρώμα του τήγματος καθορίζεται από το διάκενο που υπάρχει μεταξύ του πέλματος της έλικας του κοχλία και των τοιχωμάτων του κυλίνδρου.

Ο Maddock ήταν ο πρώτος ο οποίος περιέγραψε με ακρίβεια, ποιοτικά την τήξη σε μονοκόχλιους εκβολείς. Αργότερα ο Tadmor μετά από εντατική πειραματική εργασία στη μελέτη της τήξης πολυμερών σε μονοκόχλιους εκβολείς, ανέπτυξε το κλασσικό σήμερα θεωρητικό μοντέλο που περιγράφει τη διεργασία τήξης.

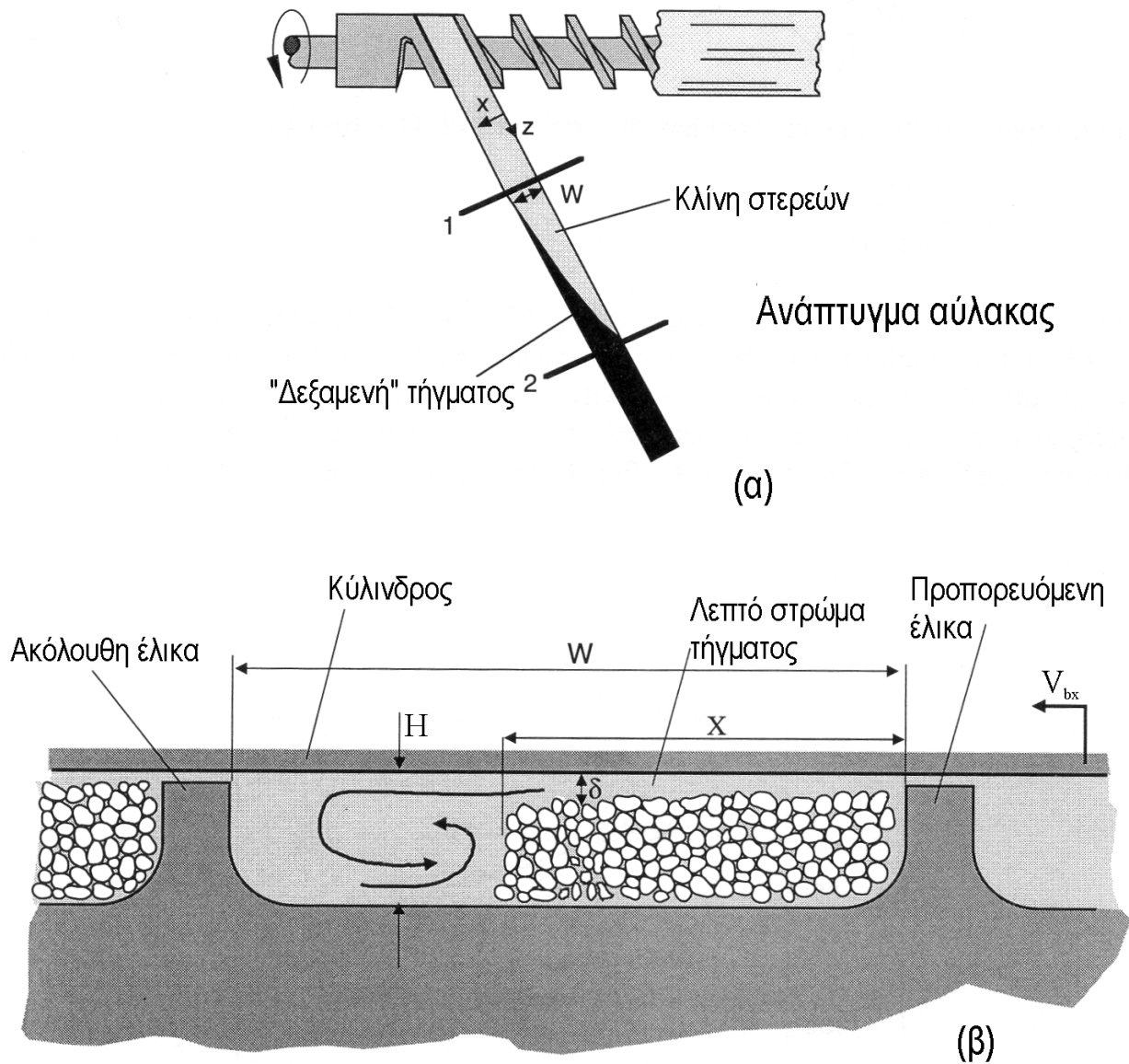
2.4.1 Θεωρητικό μοντέλο της τήξης κλίνης στερεών (Contiguous Solids Melting, CSM)

Στο Σχήμα 2.9 που ακολουθεί φαίνεται η εγκάρσια τομή της αύλακας κοχλία στη ζώνη τήξης. Καθώς το πλαστικό μεταφέρεται κατά μήκος του εκβολέα, οι κόκκοι του πλαστικού έρχονται σε επαφή με τη θερμή επιφάνεια του κυλίνδρου, τήκονται και σχηματίζουν ένα λεπτό στρώμα τήγματος. Με την περιστροφή του ο κοχλίας “παρασύρει” το τήγμα και το αναγκάζει να κινηθεί προς τον άξονα του κοχλία και πάλι προς τον κύλινδρο. Με τη συνεχιζόμενη περιστροφή του ο κοχλίας συμπαρασύρει και νέο τήγμα δημιουργώντας στην αύλακα μια “δεξαμενή τήγματος”. Λόγω της περιστροφικής κίνησης του κοχλία, το τήγμα τίθεται σε κυκλική ροή μεταξύ των τοιχωμάτων της αύλακας και του κυλίνδρου. Καθώς η διεργασία τήξης προχωρά, η εγκάρσια επιφάνεια της κλίνης των στερεών μειώνεται ενώ η εγκάρσια επιφάνεια της δεξαμενής τήγματος τείνει να αυξηθεί (Σχήμα 2.10). Κατά συνέπεια η δεξαμενή τήγματος εξασκεί σημαντική πίεση και μειώνει το πλάτος στην κλίνη των στερεών, ενώ το στρώμα του τήγματος μεταξύ της κλίνης των στερεών και του κυλίνδρου μένει σχεδόν σταθερό. Για να δουλέψει αυτός ο μηχανισμός θα πρέπει να μετασχηματίζεται συνεχώς η κλίνη των στερεών. Το πλάτος της κλίνης των στερεών μειώνεται καθώς επιπλέον υλικό τήκεται στην περιοχή αυτή. Καθώς η διεργασία τήξης εξελίσσεται, υλικό από την κλίνη των στερεών κοντά στη διεπιφάνεια στερεών-τήγματος κινείται με ταχύτητα V_{sy} προς τη διεπιφάνεια. Η ταχύτητα V_{sy} προσδιορίζει το ρυθμό τήξης της κλίνης των στερεών.

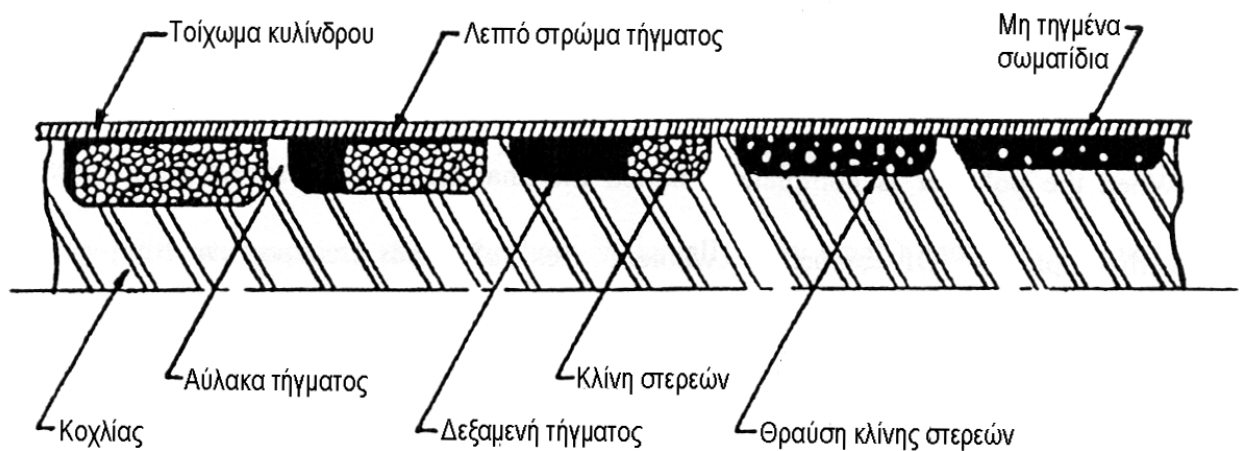
Δύο είναι οι βασικές πηγές ενέργειας για την τήξη του πολυμερούς κατά τη διεργασία της εκβολής:

- Η πρώτη και γενικά η πιο σημαντική είναι η μηχανική ενέργεια που δίνει ο κοχλίας και η οποία μετατρέπεται σε ιξώδη θερμότητα.
- Η δεύτερη πηγή ενέργειας είναι η θερμότητα που παρέχεται εξωτερικά με θέρμανση του κυλίνδρου μέσω ηλεκτρικών αντιστάσεων.

Στις περισσότερες διατάξεις εκβολής, το 80-90% της ενέργειας για την τήξη παρέχεται από τον κοχλία. Η ενέργεια που παράγεται από την κίνηση του κοχλία μεταφέρεται στο λεπτό στρώμα του τήγματος και η αναπτυσσόμενη ιξώδης θερμότητα κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το υλικό. Επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας στο πολυμερικό τήγμα θα είναι ομοιόμορφη και επιπλέον μεσολαβεί μικρότερη απόσταση για τη μεταφορά της θερμότητας μέχρι την κλίνη των στερεών. Η θερμότητα που παρέχεται από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις στον κύλινδρο πρέπει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση μέχρι να συναντήσει την κλίνη των στερεών: αρχικά το πάχος των τοιχωμάτων του κυλίνδρου και στη συνέχεια να διαπεράσει το στρώμα του τήγματος. Με αυτή τη μεταφορά υπάρχουν σημαντικές απώλειες θερμότητας μέσω συναγωγής, διάχυσης και ακτινοβολίας.



Σχήμα 2.9: (α) Κλίνη στερεών σε ανάπτυγμα αύλακας κοχλίας και (β) εγκάρσια τομή αύλακας κοχλίας στη ζώνη τήξης.



Σχήμα 2.10: Εξέλιξη της τήξης της κλίνης των στερεών σωματιδίων στις αύλακες του κοχλίας.

Σύμφωνα με το μοντέλο του Tadmor, σε εγκάρσια τομή της ρηχής αύλακας συμβολίζουμε με X το πλάτος της κλίνης των στερεών. Η πρόβλεψη του προφίλ $X(z)$ της κλίνης των στερεών αποτελεί έναν από τους βασικούς στόχους του μοντέλου.

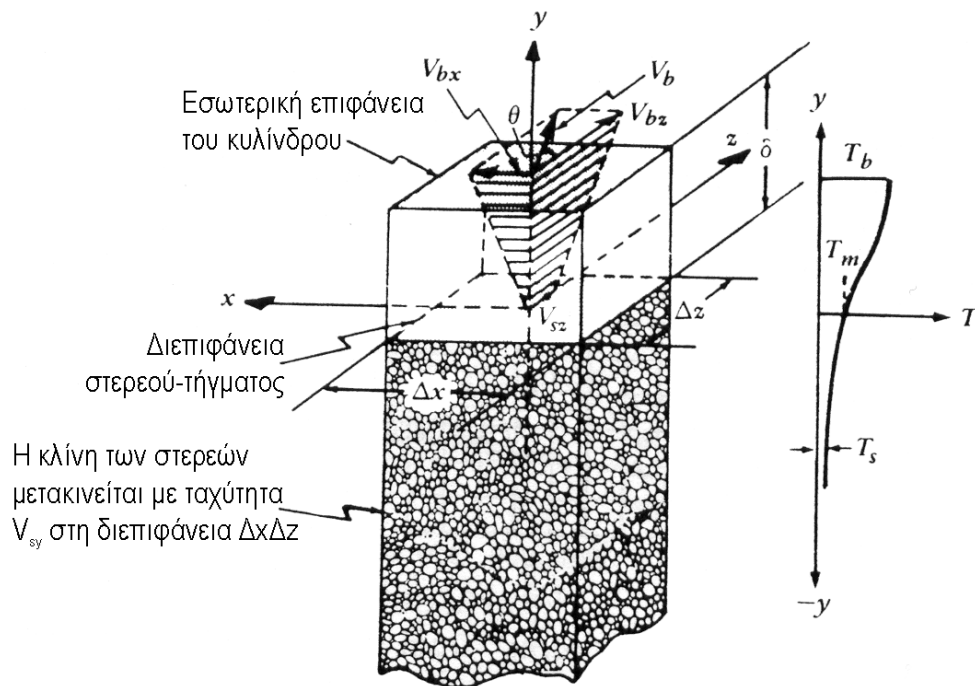
Μια βασική υπόθεση του μοντέλου είναι ότι στον εκβολέα έχουν αναπτυχθεί μόνιμες συνθήκες. Η τήξη γίνεται μόνο στην επιφάνεια του κυλίνδρου, από όπου το τήγμα “παρασύρεται” και συσσωρεύεται στη “δεξαμενή”. Η τοπική ταχύτητα της κλίνης των στερεών στην κάτω κατεύθυνση (z) της αύλακας (down channel velocity) είναι σταθερή. Επίσης οι τοπικές φυσικές και θερμοφυσικές ιδιότητες θεωρούνται σταθερές και η μετάβαση από την κλίση των στερεών στο στρώμα του τήγματος γίνεται ακαριαία στη θερμοκρασία τήξης T_m .

Η μεταβολή στο μέγεθος της κλίνης των στερεών για μικρή απόσταση στην κάτω κατεύθυνση της αύλακας, εξαρτάται από το ρυθμό τήξης στη διεπιφάνεια κλίνης στερεών-στρώμα τήγματος. Θεωρούμε ένα στοιχειώδη όγκο, κάθετο στη διεπιφάνεια στερεών-τήγματος (Σχήμα 2.11). Η κλίση των στερεών έχει τοπική ταχύτητα στην κάτω κατεύθυνση της αύλακας (άξονας z), V_{sz} και η τοπική συνιστώσα της ταχύτητας στο στρώμα του τήγματος είναι V_{sy} . Η ταχύτητα της επιφάνειας του κυλίνδρου V_b αναλύεται σε δύο συνιστώσες: στην ταχύτητα στην κάτω κατεύθυνση (z) και στην εγκάρσια στην αύλακα κατεύθυνση (x), V_{bz} και V_{bx} αντίστοιχα. Η σχετική ταχύτητα μεταξύ της επιφάνειας του κυλίνδρου και της κλίνης των στερεών είναι:

$$\mathbf{V}_j = \mathbf{V}_b - \mathbf{V}_{sz} \quad [2.7] \quad \text{ή}$$

$$|\mathbf{V}_j| = (\mathbf{V}_j \cdot \mathbf{V}_j)^{1/2} = (V_b^2 + V_{sz}^2 - 2V_b V_{sz} \cos \theta)^{1/2} \quad [2.8]$$

η οποία προσδιορίζει το ρυθμό της ιξώδους θερμότητας.



Σχήμα 2.11: Στοιχειώδης όγκος κάθετος στη διεπιφάνεια στρώμα τήγματος-κλίνης στερεών. Στο δεξί μέρος του σχήματος γίνεται παράσταση του προφίλ της θερμοκρασίας στο φιλμ και στην κλίση των στερεών. Επίσης απεικονίζεται το προφίλ της ταχύτητας στις διευθύνσεις x και z .

Για γραμμικό προφίλ ταχύτητας ο ρυθμός διάτμησης είναι V_j/δ , όπου δ είναι το τοπικό πάχος του φιλμ. Ο μηχανισμός τήξης γίνεται με “παράσυρση” του τήγματος. Το τήγμα αρχικά μεταφέρεται στην εγκάρσια διεύθυνση με αποτέλεσμα τη μείωση του πλάτους της κλίνης των στερεών. Ο μηχανισμός “παράσυρσης” του τήγματος δεν είναι τόσο αποτελεσματικός στην κάτω κατεύθυνση της αύλακας, και επομένως η διαφοροποίηση στο πάχος που έχει το στρώμα του τήγματος σε αυτή την κατεύθυνση είναι μικρή. Επομένως ο ρυθμός μεταφοράς του τήγματος προσδιορίζεται μόνο από την εγκάρσια στην αύλακα ταχύτητα V_{bx} .

Για νευτωνικό ρευστό αποδεικνύεται ότι ο ρυθμός τήξης ανά μονάδα απόστασης στην κατεύθυνση z της αύλακας, δίνεται από τη σχέση:

$$w_L(z) = \left\{ \frac{V_{bx}\rho_m[k_m(T_b - T_m) + (\mu/2)V_j^2]X}{2[\lambda + C_s(T_m - T_{s0}) + C_m\bar{\Theta}(T_b - T_m)]} \right\}^{1/2} \quad [2.9]$$

όπου ρ_m η πυκνότητα του ρήγματος, k_m η θερμική αγωγιμότητα του τήγματος, C_m η ειδική θερμότητα του τήγματος, T_m η θερμοκρασία του τήγματος, $\bar{\Theta}$ η μέση θερμοκρασία που έχει το στρώμα τήγματος, T_b η θερμοκρασία του κυλίνδρου, T_{s0} η αρχική θερμοκρασία των στερεών, C_s η ειδική θερμότητα των στερεών λ η θερμότητα τήξης, μ το ιξώδες του νευτωνικού ρευστού

Το πλάτος της κλίνης των στερεών σε αύλακα σταθερού βάθους αποδεικνύεται ότι δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{X_2}{W} = \frac{X_1}{W} \left[1 - \frac{\psi(Z_2 - Z_1)}{2H} \right]^2 \quad [2.10]$$

όπου X_1 και X_2 είναι τα πλάτη της κλίνης των στερεών στις θέσεις Z_1 και Z_2 αντίστοιχα, ενώ ο αδιάστατος όρος ψ ορίζεται ως εξής:

$$\psi = \frac{\Phi}{V_{sz}\rho_s\sqrt{X_1}} \quad [2.11]$$

$$\text{όπου } \Phi = \left\{ \frac{V_{bx}\rho_m[k_m(T_b - T_m) + (\mu/2)V_j^2]}{2[C_s(T_m - T_{s0}) + C_m\bar{\Theta}(T_b - T_m) + \lambda]} \right\}^{1/2} \quad [2.12]$$

$$\text{Θεωρούμε πολύ λεπτό τμήμα } A = \frac{H_1 - H_2}{Z_1 - Z_2} \quad [2.13]$$

Στην περίπτωση αυτή εξίσωση [2.10] μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\frac{X_2}{W} = \frac{X_1}{W} \left[\frac{\psi}{A} - \left(\frac{\psi}{A} - 1 \right) \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} \right]^2 \quad [2.14]$$

όπου X_2 και X_1 είναι τα πλάτη της κλίνης των στερεών τα οποία αντιστοιχούν στα ύψη H_2 και H_1 αντίστοιχα.

Η ταχύτητα της κλίνης των στερεών στην έναρξη της τήξης λαμβάνεται από το ρυθμό ροής της μάζας των στερεών σωματιδίων G :

$$V_{sz} = \frac{G}{\rho_s HW} \quad [2.15]$$

Από την εξίσωση [2.12] είναι φανερό ότι μπορεί να υπολογισθεί μέσω του Φ η επίδραση των διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων στη διάρκεια της διεργασίας τήξης. Η αύξηση στην ταχύτητα περιστροφής του κοχλία επιφέρει αύξηση στο ρυθμό τήξης γιατί βελτιώνεται η ικανότητα μεταφοράς του τήγματος (αύξηση της V_{bx}) αλλά και αύξηση στην εκλυόμενη θερμότητα λόγω τριβής.

Αύξηση της θερμοκρασίας του κυλίνδρου (T_b) αρχικά επιφέρει αύξηση στο ρυθμό τήξης γιατί αυξάνει ο όρος της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή $k_m(T_b - T_m)$. Περαιτέρω αύξηση στη θερμοκρασία του κυλίνδρου μειώνει το ιξώδες στο στρώμα του τήγματος που δημιουργείται στην επιφάνειά του, και επομένως το ποσό της θερμότητας που παράγεται λόγω τριβής.

Εφαρμογή του μοντέλου της τήξης του Tadmor για μη-νευτωνικό ρευστό που υπακούει στον εκθετικό νόμο και το ιξώδες εξαρτάται από τη θερμοκρασία, ισχύει:

$$\eta = m_0 e^{-\alpha(T - T_m)} |\dot{\gamma}|^{n-1} \quad [2.16]$$

Στην περίπτωση αυτή ο όρος Φ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Phi = \left\{ \frac{V_{bx} \rho_m U_2 [k_m (T_b - T_m) + U_1 / 2]}{2[C_s (T_m - T_{s0}) + C_m \bar{\Theta} (T_b - T_m) + \lambda]} \right\}^{1/2} \quad [2.17]$$

Το πάχος που έχει το στρώμα του τήγματος είναι:

$$\delta = \left\{ \frac{[2k_m (T_b - T_m) + U_1] X}{V_{bx} U_2 \rho_m [C_s (T_m - T_{s0}) + C_m \bar{\Theta} (T_b - T_m) + \lambda]} \right\}^{1/2} \quad [2.18]$$

Ο όρος U_2 δίνεται από τη σχέση:

$$U_2 = 2 \left[\frac{1 - b' - e^{-b'}}{b'(e^{-b'} - 1)} \right] \quad [2.19]$$

το b' ορίζεται ως εξής:

$$b' = \frac{-\alpha(T_b - T_m)}{n} \quad [2.20]$$

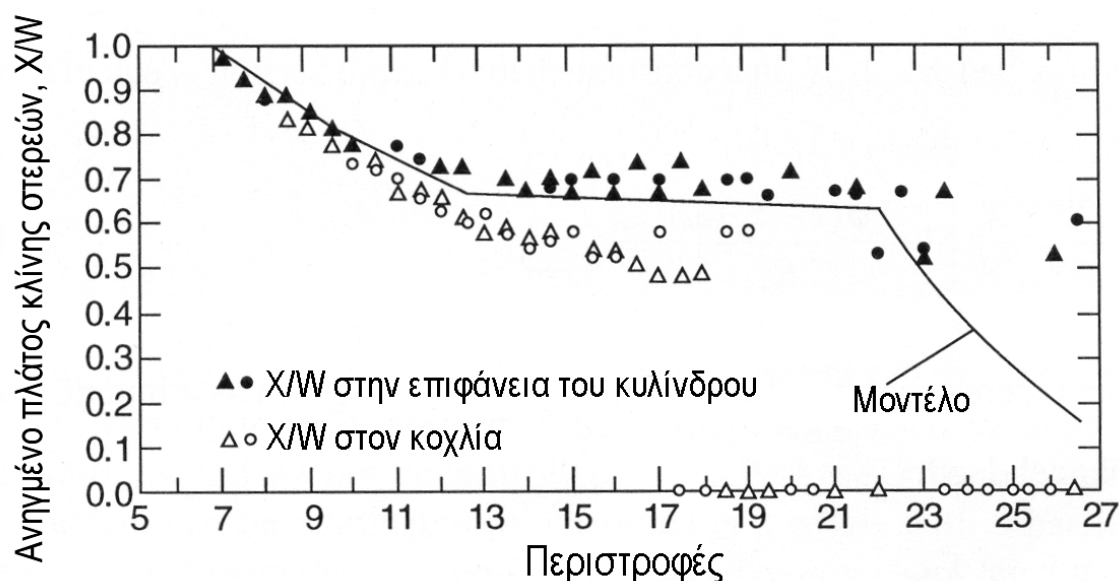
Ο όρος U_1 δίνεται από τη σχέση:

$$U_1 = 2m_0 V_j^{n+1} \bar{\delta}^{1-n} \frac{(e^{-b'} + b' - 1)}{(b')^2} \left(\frac{b'}{1 - e^{-b'}} \right)^{n+1} \quad [2.21]$$

Η μέση θερμοκρασία για το στρώμα του τήγματος είναι:

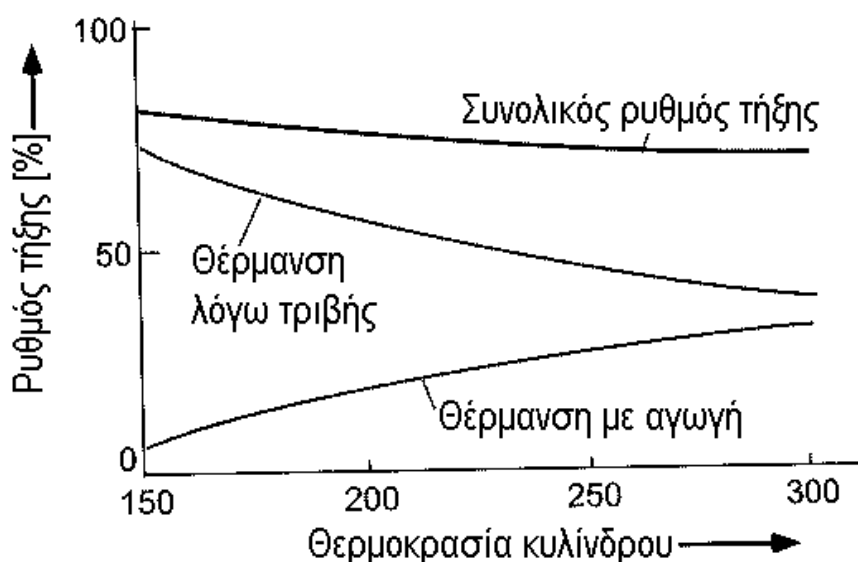
$$\bar{\Theta} = \frac{b_1' / 2 + e^{-b'}(1 + 1/b') - 1/b'}{b' + e^{-b'} - 1} \quad [2.22]$$

Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζονται τα πειραματικά και τα προβλεπόμενα με τη χρήση του μοντέλου τήξης του Tadmor αποτελέσματα, για το προφίλ της κλίνης στερεών κατά την εκβολή LDPE σε μονοκόχλιο εκβολέα.



Σχήμα 2.12: Προβλεπόμενες τιμές με βάση το μοντέλο Tadmor και πειραματικές τιμές του προφίλ της κλίνης των στερεών.

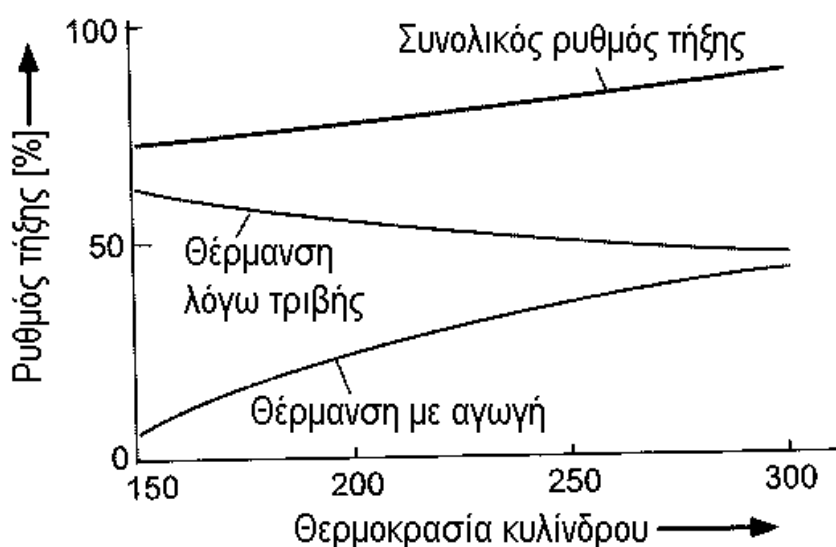
Η αύξηση της θερμοκρασίας του κυλίνδρου T_b μπορεί να επιταχύνει τη διαδικασία τήξης, με τον περιορισμό της πιθανότητας έναρξης θερμικής αποικοδόμησης του πολυμερούς. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του κυλίνδρου δεν επιφέρει βελτίωση στη διαδικασία τήξης. Με την αύξηση στην T_b αυξάνεται ο όρος της θερμότητας που μεταδίδεται με αγωγή αλλά μειώνεται ο όρος της θερμότητας λόγω τριβής στο στρώμα του τήγματος γιατί μειώνεται το ιξώδες του. Επομένως, αν με την αύξηση της T_b η μείωση στην παραγωγή ιξώδους θερμότητας είναι μεγαλύτερη από την αύξηση στην μεταφορά θερμότητας με αγωγή στα σωματίδια, το αποτέλεσμα θα είναι η μείωση του ρυθμού τήξης του πολυμερούς όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13: Η επίδραση της T_b στο ρυθμό τήξης, όταν το ιξώδες επηρεάζεται σημαντικά από τις μεταβολές στη θερμοκρασία.

Αυτό μπορεί να συμβεί σε πολυμερή των οποίων το ιξώδες τήγματος είναι πολύ ευαίσθητο στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας όπως το PMMA, PVA, PVC κλπ. Στην αντίθετη περίπτωση ο ρυθμός τήξης θα αυξηθεί με την αύξηση της T_b .

Όταν το ιξώδες του τήγματος δεν είναι πολύ ευαίσθητο στις μεταβολές της θερμοκρασίας, μείωση της θερμοκρασίας του κυλίνδρου θα επιφέρει μικρή μείωση στη θερμότητα λόγω τριβής. Ως αποτέλεσμα, με την αύξηση της θερμοκρασίας του κυλίνδρου είναι πιθανό να αυξάνει ο ρυθμός τήξης όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.14.

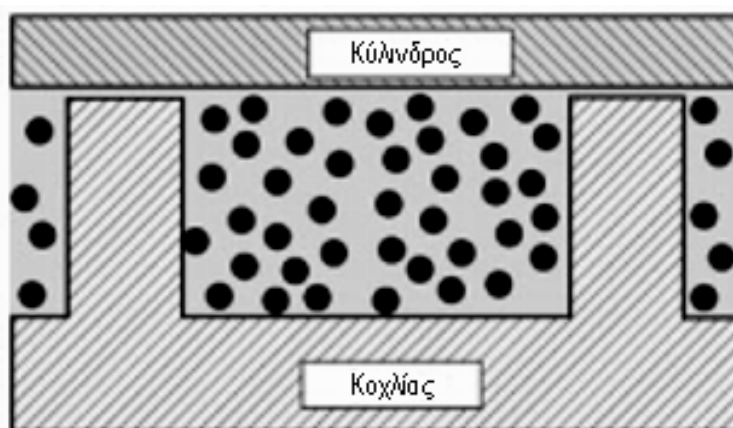


Σχήμα 2.14: Η επίδραση της T_b στο ρυθμό τήξης όταν το ιξώδες δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις μεταβολές στη θερμοκρασία.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι ο τοπικός ρυθμός τήξης υπολογίζεται απ' ευθείας από το πλάτος της κλίνης των στερεών. Το μέγιστο πλάτος αντιστοιχεί στο πλάτος της αύλακας, όσο προχωρά η διαδικασία τήξης το πλάτος της κλίνης των στερεών, και κατά συνέπεια και ο τοπικός ρυθμός τήξης, μειώνονται. Στις περισσότερες των περιπτώσεων ο υψηλότερος ρυθμός επιτυγχάνεται στην έναρξη της διαδικασίας τήξης, στη συνέχεια και όσο μειώνεται το πλάτος της κλίνης των στερεών μειώνεται μονοτονικά με την αξονική απόσταση.

2.4.2 Τήξη διεσπαρμένων στερεών (Dispersed Solids Melting, DSM)

Το μοντέλο της τήξης κλίνης στερεών σωματιδίων απαντάται πιο συχνά σε μονοκόχλιους εκβολείς. Εντούτοις σε κάποιες περιπτώσεις διαπιστώθηκε πειραματικά ότι τα σωματίδια δεν σχηματίζουν κλίνη αλλά είναι διεσπαρμένα στο πολυμερικό τήγμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15: Τήξη διεσπαρμένων σωματιδίων.

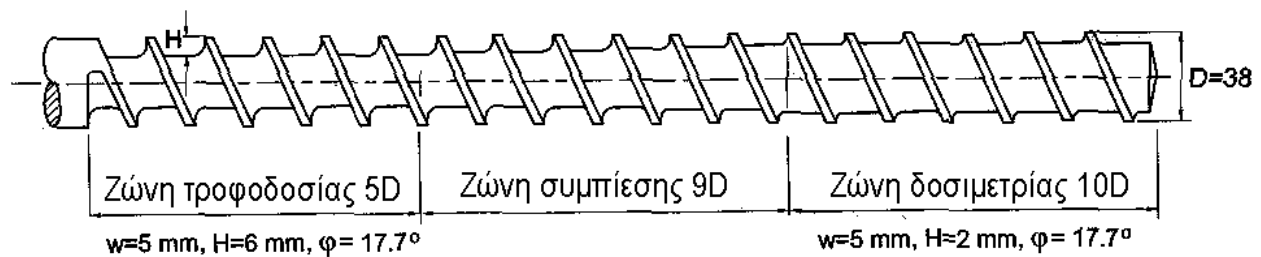
Η συμπεριφορά αυτή συναντάται σε εκβολείς όπου η γεωμετρία της αύλακας δεν είναι συνεχής ώστε να υπάρχει ομαλή ροή του υλικού, όπως σε διπλοκόχλιους εκβολείς και σε εκβολείς με ακίδες στα τοιχώματα του κυλίνδρου (pin barrel extruders).

Στην ανάλυση με βάση το μοντέλο της τήξης διεσπαρμένων σωματιδίων θεωρείται ότι τα σωματίδια είναι ομοιόμορφα, σφαιρικά και διεσπαρμένα στην πολυμερική μήτρα. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται να είναι διαθέσιμη μια ελάχιστη ποσότητα τήγματος για να καλύψει τον όγκο μεταξύ των στερεών σωματιδίων. Στην πιο πυκνή διευθέτηση των σωματιδίων του πολυμερούς το ελάχιστο κλάσμα όγκου του πολυμερικού τήγματος είναι 40%, ενώ για πιο τυχαία διαμόρφωση είναι περίπου 50%. Αυτό σημαίνει ότι η θεωρία της τήξης των διεσπαρμένων σωματιδίων μπορεί να εφαρμοσθεί όταν πάνω από τη μισή ποσότητα του πολυμερούς έχει ήδη γίνει τήγμα. Επίσης θεωρείται ότι η τήξη των στερεών σωματιδίων είναι ομοιόμορφη και δεν εξαρτάται από τη συγκεκριμένη θέση του σωματιδίου στην αύλακα. Η διαθέσιμη για την τήξη θερμότητα προέρχεται από τη θερμότητα που μεταφέρεται στην αύλακα με αγωγή και από την ανάπτυξη ιξώδους θερμότητας στο πολυμερικό τήγμα.

2.5 ΤΥΠΟΙ ΚΟΧΛΙΩΝ

Μια επιτυχημένη διαδικασία εκβολής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό, από το σχεδιασμό του κοχλία. Τα γενικά χαρακτηριστικά ενός τυπικού εκβολέα είναι τα εξής:

Συνολικό μήκος	20-30D
Μήκος ζώνης τροφοδοσίας	4-8D
Μήκος ζώνης δοσιμετρίας	6-10D
Αριθμός παράλληλων ελικώσεων	1
Βήμα του κοχλία	1D (γωνία ελίκωσης ϕ 17.66°)
Πλάτος αύλακας	0.1 D
Βάθος αύλακας στη ζώνη τροφοδοσίας	0.15-0.20D
Λόγος βάθους της αύλακας	2-4

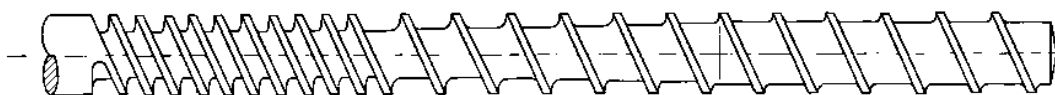


Σχήμα 2.16: Τυπικός κοχλίας εκβολέα.

Ο τυπικός κοχλίας έχει αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες κυρίως με εμπειρικό τρόπο και έχει διαπιστωθεί ότι λειτουργεί πολύ καλά με πολλούς και διαφορετικούς τύπους πολυμερών. Για να ικανοποιούνται όσο το δυνατό πληρέστερα οι συγκεκριμένες απαιτήσεις κάθε διεργασίας εκβολής έχουν γίνει μια σειρά από τροποποιήσεις στο σχεδιασμό της γεωμετρίας του κοχλία. Ακολουθεί αναφορά στους πιο σημαντικούς από αυτούς.

2.5.1 Τροποποιήσεις στον κοχλία τυπικού εκβολέα

Στο Σχήμα 2.17 παρουσιάζεται ο τυπικός εκβολέας με μια επιπλέον έλικα στη ζώνη τροφοδοσίας. Η πρόσθετη έλικα έχει ως σκοπό να εξομαλύνει τη διακύμανση στην πίεση που προκαλείται από τη διακοπή στην ελεύθερη ροή του υλικού που εισάγεται από τη χοάνη τροφοδοσίας σε κάθε περιστροφή του κοχλία.



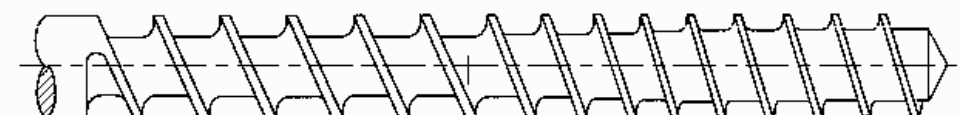
Σχήμα 2.17: Τυπικός κοχλίας με επιπλέον έλικα στη ζώνη τροφοδοσίας.

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα στη γεωμετρία της διπλής έλικας είναι ότι εξισορροπούνται καλύτερα οι δυνάμεις που ασκούνται στον κοχλίας, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η πιθανότητα να συμβεί κάποια εκτροπή του κοχλίας. Όσον αφορά τα μειονεκτήματα, η επιπλέον έλικα μειώνει την εγκάρσια επιφάνεια της αύλακας ενώ αυξάνει η επιφάνεια επαφής μεταξύ της κλίνης των στερεών σωματιδίων του πολυμερούς και του κοχλίας.

Στη γεωμετρία του κοχλίας που παρουσιάζεται στα σχήματα 2.18(α&β) το βήμα μεταβάλλεται κατά μήκος του κοχλίας.



Σχήμα 2.18(α): Κοχλίας εκβολέα με μεταβλητό αυξανόμενο βήμα.



Σχήμα 2.18(β): Κοχλίας εκβολέα με μεταβλητό ελαττούμενο βήμα.

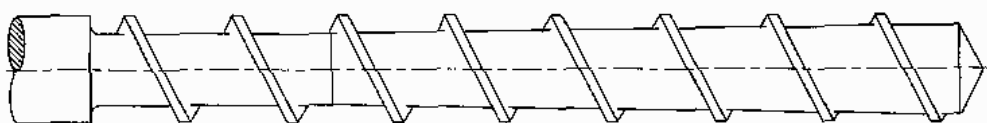
Η διαφοροποίηση στο βήμα δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιείται για κάθε ζώνη του κοχλίας η βέλτιστη γωνία της ελίκωσης. Για παράδειγμα άλλη τιμή έχει η βέλτιστη γωνία για τη μεταφορά των στερεών σωματιδίων στη ζώνη τροφοδοσίας και άλλη για τη μεταφορά του τήγματος στη ζώνη δοσιμετρίας.

Στο σχήμα 2.18(β) το βήμα ελαττώνεται κατά μήκος του κοχλίας. Η συνεχής μείωση στο βήμα του κοχλίας επιφέρει εγκάρσια συμπίεση στο υλικό μέσα στην αύλακα, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η κάθετη συμπίεση που προέρχεται από τη μείωση στο βάθος της αύλακας. Σε πολλές περιπτώσεις κοχλίων μεταβλητού ελαττούμενου βήματος, η αύλακα διατηρεί το ίδιο βάθος σε όλο το μήκος του κοχλίας.

Πρέπει να αναφερθεί ότι ο κοχλίας μεταβλητού ελαττούμενου βήματος δεν αποτελεί κοχλίας υψηλών αποδόσεων. Αναπτύχθηκε με πρωταρχικό σκοπό να εξασκεί την ελάχιστη διατμητική καταπόνηση στο πολυμερές, ο λόγος L/D είναι γενικά αρκετά

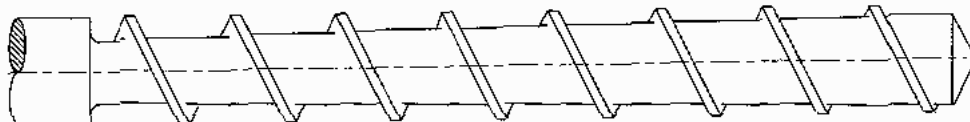
μικρός (περίπου 10). Αυτός ο τύπος κοχλία χρησιμοποιείται κυρίως για τη μορφοποίηση των ελαστομερών.

Στο Σχήμα 2.19 παρουσιάζεται ο κοχλίας χωρίς ζώνη δοσιμετρίας (zero-meter screw). Η γεωμετρία αυτή είναι ενδεδειγμένη για την τήξη του πολυμερούς σε μονάδες μορφοποίησης με έγχυση. Ο κοχλίας χωρίς ζώνη δοσιμετρίας χρησιμοποιείται για να περιορίσει την αύξηση στη θερμοκρασία του υλικού, αυξάνοντας το βάθος της αύλακας στη ζώνη μεταφοράς του τήγματος του εκβολέα. Ένα εμφανές μειονέκτημα του κοχλία χωρίς ζώνης δοσιμετρίας είναι ότι η μειώνεται η ικανότητα παραγωγής πίεσης από το σύστημα, γεγονός που άλλωστε δεν αποτελεί ζητούμενο σε εφαρμογές έγχυσης.



Σχήμα 2.19: Κοχλίας εκβολέα με μηδενική ζώνη δοσιμετρίας.

Επέκταση του παραπάνω κοχλία, αποτελεί ο κοχλίας μηδενικής τροφοδοσίας και δοσιμετρίας (zero-feed zero-meter screw) (Σχήμα 2.20). Ο κοχλίας αυτός απαρτίζεται μόνο από τη ζώνη συμπίεσης, γεγονός που επιτρέπει μια πολύ σταδιακή συμπίεση του υλικού.



Σχήμα 2.20: Κοχλίας εκβολέα με μηδενική ζώνη τροφοδοσίας και δοσιμετρίας.

2.5.2 Απαεριούμενος εκβολέας

Ο απαεριούμενος εκβολέας είναι διάταξη που επιτρέπει τη συνεχή απαερίωση του τήγματος πριν από την εξώθησή του στη μήτρα. Η απαερίωση είναι πολύ σημαντική ιδιαίτερα στην περίπτωση των υγροσκοπικών πολυμερών, καθώς επίσης και στις ακόλουθες εφαρμογές:

- ⇒ Απομάκρυνση μονομερών και ολιγομερών κατά την παραγωγή πολυμερών (PS, HDPE, PP,...)
- ⇒ Απομάκρυνση παραπροϊόντων αντιδράσεων πολυσυμπύκνωσης (νερό, μεθανόλη) και ολιγομερών από πολυεστέρες και νάυλον

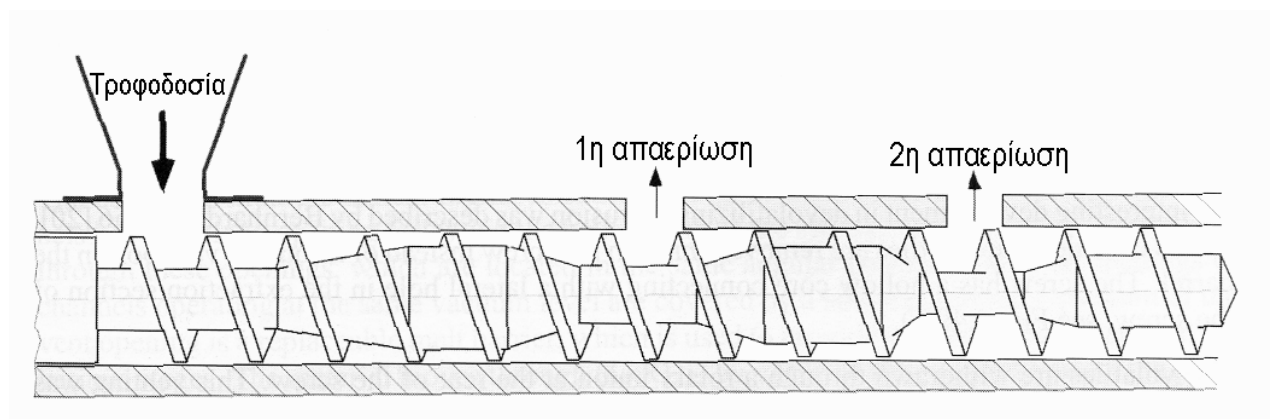
- ⇒ Απομάκρυνση του αέρα από ενισχυμένα πολυμερή
- ⇒ Απομάκρυνση υπολειμμάτων από το μέσο διασποράς σε πολυμερισμούς διαλύματος, αιωρήματος και γαλακτώματος
- ⇒ Απομάκρυνση υγρασίας από υγροσκοπικά πολυμερή
- ⇒ Απομάκρυνση πτητικών συστατικών κατά την ανάμιξη πολυμερών-προσθέτων

Ο απαεριούμενος εκβολέας αποτελείται από δύο βαθμίδες, οι οποίες χωρίζονται από την περιοχή απαερίωσης. Στην πρώτη βαθμίδα το πολυμερές παραλαμβάνεται από τη ζώνη τροφοδοσίας, τήκεται, συμπιέζεται και ομογενοποιείται. Στη συνέχεια το τήγμα περνά από τη ζώνη αποσυμπίεσης όπου η πίεση μειώνεται στην ατμοσφαιρική. Η αποσυμπίεση επιτρέπει την απομάκρυνση των πτητικών απαερίων μέσω μιας ειδικής εξόδου απαερίωσης που υπάρχει στον κύλινδρο. Το απαεριωμένο τήγμα στη συνέχεια προωθείται προς τη δεύτερη βαθμίδα όπου υπάρχει δεύτερη ζώνη συμπίεσης και ακολουθεί η δεύτερη ζώνη δοσιμετρίας όπου το τήγμα ομογενοποιείται και εξωθείται στη μήτρα εκβολής.

Η διαδικασία απαερίωσης ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό από τη διάχυση και όπως είναι γνωστό ο συντελεστής διάχυσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Όταν το πολυμερές βρίσκεται κάτω από το σημείο τήξης, η διάχυση γίνεται με πολύ αργό ρυθμό. Για το λόγο αυτό πρέπει το πολυμερές να γίνει τήγμα, οπότε η απαερίωση είναι πιο αποτελεσματική και ενισχύεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του τήγματος.

Επίσης η συνεχής ανανέωση της επιφάνειας του τήγματος, η οποία εξαρτάται από τη γεωμετρία του κοχλίου, βελτιώνει σημαντικά την ικανότητα απαερίωσης.

Στην περίπτωση που πρέπει να απομακρυνθούν μεγαλύτερες ποσότητες πτητικών ουσιών από το πολυμερές, χρησιμοποιούνται κοχλίες με πολλαπλές εξόδους απαερίωσης. Μια τυπική διάταξη τέτοιου εκβολέα τριών σταδίων φαίνεται στο Σχήμα 2.21.

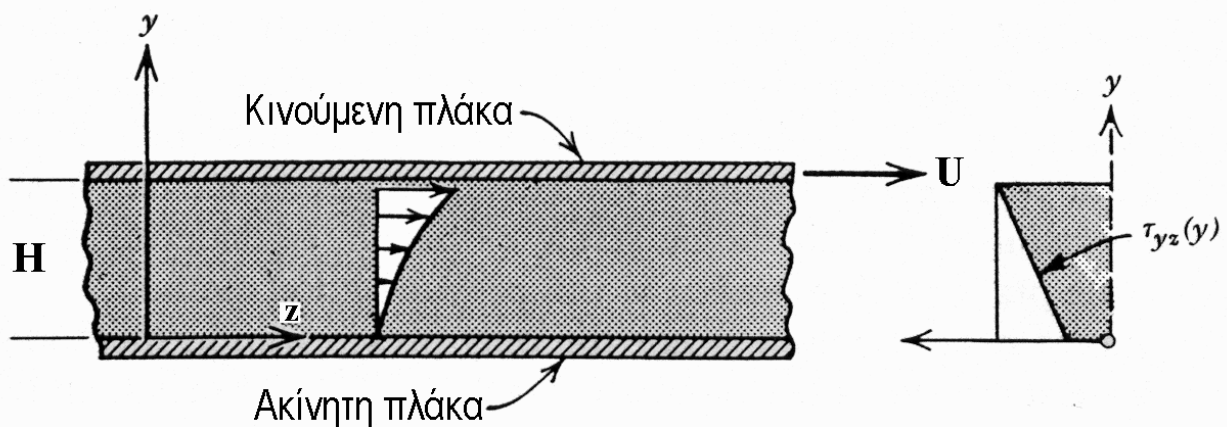


Σχήμα 2.21: Εκβολέας με πολλαπλές ζώνες απαερίωσης.

2.6 ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΚΟΧΙΟ ΕΚΒΟΛΕΑ

2.6.1 Ροή μεταξύ επίπεδων πλακών

Θεωρούμε πολυμερές το οποίο βρίσκεται στο διάκενο που δημιουργείται μεταξύ δύο παράλληλων επίπεδων πλακών οι οποίες βρίσκονται σε απόσταση H . Η πάνω πλάκα βρίσκεται σε κίνηση κατά τον άξονα z με σταθερή ταχύτητα U , και η οποία συμπαρασύρει το ρευστό που βρίσκεται σε επαφή, το οποίο με τη σειρά του συμπαρασύρει το στρώμα του ρευστού κάτω από αυτό κ.ο.κ. Επομένως ορμή μεταφέρεται κάθετα στην κίνηση του ρευστού στην αρνητική y -κατεύθυνση.



Σχήμα 2.22: Σχηματική παράσταση της γεωμετρίας των παράλληλων πλακών. Η πάνω πλάκα κινείται με σταθερή ταχύτητα U και η κάτω πλάκα είναι ακίνητη. Επίσης παρουσιάζεται το προφίλ της ταχύτητας για θετική κλίση της πίεσης ($dP/dz > 0$) και $\tau_{yz}(y) < 0$ όπως φαίνεται στο δεξί μέρος.

Μετά από κάποιο σύντομο χρονικό διάστημα, αναπτύσσεται ένα σταθερό προφίλ ταχυτήτων. Επίσης θεωρούμε ότι οι πλάκες έχουν άπειρο μήκος στην x -κατεύθυνση και έχουν αρκετά μεγάλο μήκος στην z -κατεύθυνση ώστε να είναι αμελητέα η επίδραση των ροών εισόδου και εξόδου (end effects). Με άλλα λόγια θεωρούμε πως υπάρχει πλήρως αναπτυγμένο προφίλ ταχυτήτων κατά την x -κατεύθυνση. Η κατάσταση αυτή εκφράζεται μαθηματικά με τη συνθήκη: $\partial u_z / \partial x = 0$.

Στην έξοδο τοποθετείται μια “βαλβίδα” ή μήτρα. Με κατάλληλο χειρισμό αυτής της “βαλβίδας” μπορούμε να ελέγξουμε το ρυθμό ροής. Αν είναι κλειστή η “βαλβίδα” η ροή μηδενίζεται ενώ η τοπική βαθμίδα πίεσης καθώς και η πίεση στη βαλβίδα παίρνει τη μέγιστη τιμή. Αυτή η κατάσταση αποκαλείται “κλειστή ροή” (“closed discharge”). Η άλλη ακραία κατάσταση είναι τελείως ανοικτή η “βαλβίδα” και ο ρυθμός ροής λαμβάνει μέγιστη τιμή ενώ η πίεση μηδενίζεται. Στην περίπτωση αυτή έχουμε την κατάσταση “ανοικτής ροής” (“open discharge”) η οποία αντιστοιχεί στην ροή λόγω οπισθέλκουσας (drug flow). Η πίεση στην είσοδο είναι ίση με την πίεση στην έξοδο.

Για την μαθηματική επίλυση του προβλήματος γίνονται οι εξής υποθέσεις:

- η ροή είναι στρωτή
- η ροή είναι ισοθερμοκρασιακή
- δεν παρατηρείται ολίσθηση στα τοιχώματα
- το ρευστό είναι νευτωνικό και ασυμπίεστο
- οι δυνάμεις βαρύτητας αγνοούνται
- δεν υπάρχει ροή στις κατευθύνσεις x και y και επομένως $u_x = u_y = 0$
- η ροή είναι πλήρως αναπτυγμένη, $\partial u_z / \partial z = 0$

Η συνιστώσα της ταχύτητας που μας ενδιαφέρει είναι η u_z και η οποία είναι συνάρτηση μόνο του y .

Η εξίσωση ορμής δίνει:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad [2.23]$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad [2.24]$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} \quad [2.25]$$

Από τις εξισώσεις [2.23] & [2.24] παρατηρούμε ότι η πίεση είναι συνάρτηση μόνο του z . Παρατηρούμε επίσης ότι το αριστερό σκέλος της εξίσωσης [2.25] είναι συνάρτηση μόνο του z , και το δεξιό μόνο του y . Αυτό είναι δυνατό μόνο όταν και τα δύο μέλη είναι ίσα με μία σταθερά. Επομένως εξάγεται το συμπέρασμα ότι η κλίση της ταχύτητας είναι σταθερή, γεγονός που σημαίνει ότι η πίεση αυξάνει γραμμικά με το z . Με ολοκλήρωση της εξίσωσης [2.25] παίρνουμε για το τ_{yz} :

$$\tau_{yz} = \tau_0 - \left(\frac{dP}{dz} \right) y \quad [2.26]$$

όπου τ_0 η διατμητική τάση τ_{yz} στην ακίνητη πλάκα ($y=0$). Η διατμητική τάση είναι σταθερή κατά μήκος του διάκενου μεταξύ των πλακών όταν δεν υπάρχει βαθμίδα πίεσης, και στην περίπτωση που αναπτύσσεται βαθμίδα πίεσης μεταβάλλεται γραμμικά με την απόσταση y .

Για νευτωνικό ρευστό ισχύει:

$$\tau_{yz} = -\mu \frac{du_z}{dy} \quad [2.27]$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση [2.27] στην [2.26] και ολοκληρώνοντας, λαμβάνοντας υπόψη τις οριακές συνθήκες:

$$y=0, u_z=0$$

$$y=H, u_z=U$$

και μετά από υπολογισμό του τ_0 , παίρνουμε:

$$\frac{v_z}{U} = \xi - 3\xi(1-\xi) \left(\frac{H^2}{6\mu U} \frac{dP}{dz} \right) \quad [2.28]$$

όπου $\xi=y/H$.

Η ογκομετρική ροή ανά μονάδα πλάτους q προκύπτει από την ακόλουθη ολοκλήρωση του προφίλ ταχυτήτων ως προς y , οπότε παίρνουμε:

$$q = \int_0^H v_z dy \Rightarrow q = \frac{1}{2}UH + \frac{H^3}{12\eta} \left(-\frac{dP}{dz} \right) = \frac{1}{2}UH + \frac{H^3}{12\mu} \left(\frac{-\Delta P}{L} \right) \quad [2.29]$$

όπου L το μήκος των πλακών.

Η παροχή αποτελείται από δύο όρους, ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει το ρυθμό ροής όταν δεν υπάρχει μεταβολή στην πίεση κατά την κατεύθυνση της ροής ($dP/dz=0$), και οφείλεται στη δύναμη που ασκεί η κίνηση της πάνω πλάκας στο τήγμα. Ο όρος αυτός καλείται ρυθμός ροής οπισθέλκουσας:

$$q_d = \frac{1}{2}UH \quad [2.30]$$

Ο δεύτερος όρος στην εξίσωση [2.29] οφείλεται αποκλειστικά στην ανάπτυξη βαθμίδας πίεσης μεταξύ των δύο πλακών και αναφέρεται ως ρυθμός ροής πίεσης:

$$q_p = \frac{H^3}{12\mu} \left(-\frac{dP}{dz} \right) \quad [2.31]$$

Επομένως η συνολική ροή προκύπτει από το συνδυασμό της ροής οπισθέλκουσας και της ροής πίεσης.

Χρησιμοποιώντας τους όρους των ρυθμών ροής, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι ο αδιάστατος όρος που προσδιορίζει τη μορφή του προφίλ των ταχυτήτων είναι ο λόγος του ρυθμού ροής πίεσης προς το ρυθμό της ροής οπισθέλκουσας:

$$\frac{q_p}{q_d} = \frac{q - q_d}{q_d} = -\frac{H^2}{6\mu U} \frac{dP}{dz} \quad [2.32]$$

Για τιμή του παραπάνω λόγου ίση με -1, η καθαρή ροή του συστήματος μηδενίζεται γεγονός που αντιστοιχεί στην κατάσταση της κλειστής ροής (closed discharge). Μηδενική τιμή αντιστοιχεί στη ροή λόγω οπισθέλκουσας.

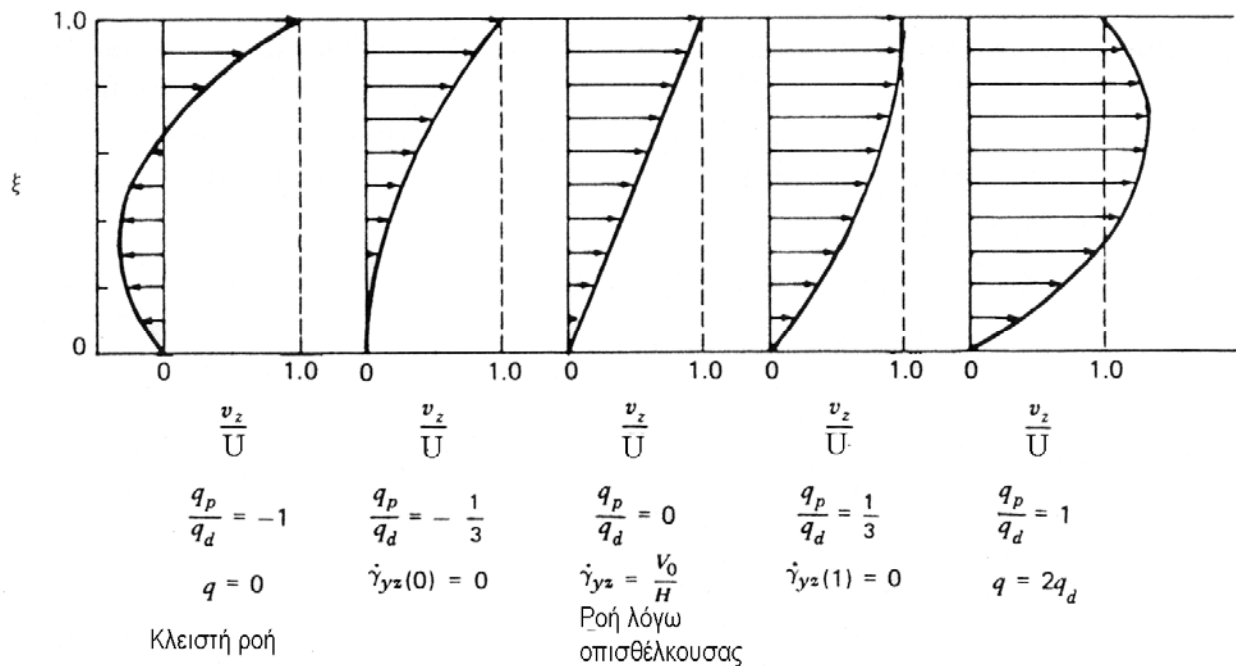
Από το προφίλ της ταχύτητας μπορεί να υπολογισθεί η κατανομή του ρυθμού διάτμησης ως εξής:

$$\dot{\gamma}_{yz}(\xi) = \frac{dv_z}{dy} = \frac{U}{H} \left[1 + 3(1-2\xi) \frac{q_p}{q_d} \right] \quad [2.33]$$

Από αυτή την εξίσωση διαπιστώνεται ότι όταν ο αδιάστατος όρος λαμβάνει τιμή ίση με $-1/3$, ο ρυθμός διάτμησης στην ακίνητη πλάκα είναι μηδέν. Αν λαμβάνει τιμή ίση με $1/3$ ο ρυθμός διάτμησης μηδενίζεται στην κινούμενη πλάκα. Για να μην υπάρχουν αυτές οι δύο ακραίες καταστάσεις θα πρέπει να έχουμε:

$$\frac{2q_d}{3} < q < \frac{4q_d}{3} \quad [2.34]$$

Στο Σχήμα 2.23 γίνεται η γραφική απεικόνιση για κάποια τυπικά προφίλ ταχυτήτων.



Σχήμα 2.23: Το προφίλ της ταχύτητας για νευτωνικό ρευστό μεταξύ παράλληλων πλακών.

Με ανακατάταξη των όρων της εξίσωσης [2.29] και με τη βοήθεια της [2.30], λαμβάνουμε:

$$\frac{dP}{dz} = \frac{12\mu}{H^3} (q_d - q) \quad [2.35]$$

Παρατηρούμε ότι στη γεωμετρία των παράλληλων πλακών παράγεται πίεση όταν $q_d > q$. Παρατηρούμε επίσης ότι η βαθμίδα πίεσης είναι ανάλογη του ιξώδους. Κατά συνέπεια οι υψηλές τιμές ιξώδους οι οποίες απαντώνται στα πολυμερικά τήγματα, αυξάνουν την ικανότητα του συστήματος για παραγωγή πίεσης.

Επίσης για σταθερή ροή εξόδου, η βαθμίδα της πίεσης αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας της κινούμενης πλάκας, η οποία αποτελεί λειτουργική παράμετρο σε μια πραγματική διεργασία. Επιπλέον, για σταθερή ροή οπισθέλκουσας q_d , η βαθμίδα της πίεσης είναι αντιστρόφως ανάλογη του όρου H^3 , ο οποίος αποτελεί παράμετρο σχεδιασμού σε μια πραγματική αντλία τήγματος.

Η μέγιστη πίεση που μπορεί να αναπτυχθεί επιτυγχάνεται για $q=0$:

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\max} = \frac{6\mu U}{H^2} \quad [2.36]$$

Το προφίλ της διατμητικής τάσης λαμβάνεται από τις εξισώσεις [2.27] & [2.28]:

$$\tau_{yz} = -\mu \frac{U}{H} - H \left(\xi - \frac{1}{2} \right) \left(\frac{dP}{dz} \right) \quad [2.37]$$

ο πρώτος όρος της εξίσωσης [2.37] αποτελεί τη συνιστώσα που οφείλεται στη ροή λόγω οπισθέλκουσας, και ο δεύτερος όρος στη ροή λόγω πίεσης. Στην κινούμενη πλάκα ($\xi=1$) η τάση είναι :

$$\tau_{yz}(1) = -\mu \frac{U}{H} - \frac{H}{2} \left(\frac{dP}{dz} \right) \quad [2.38]$$

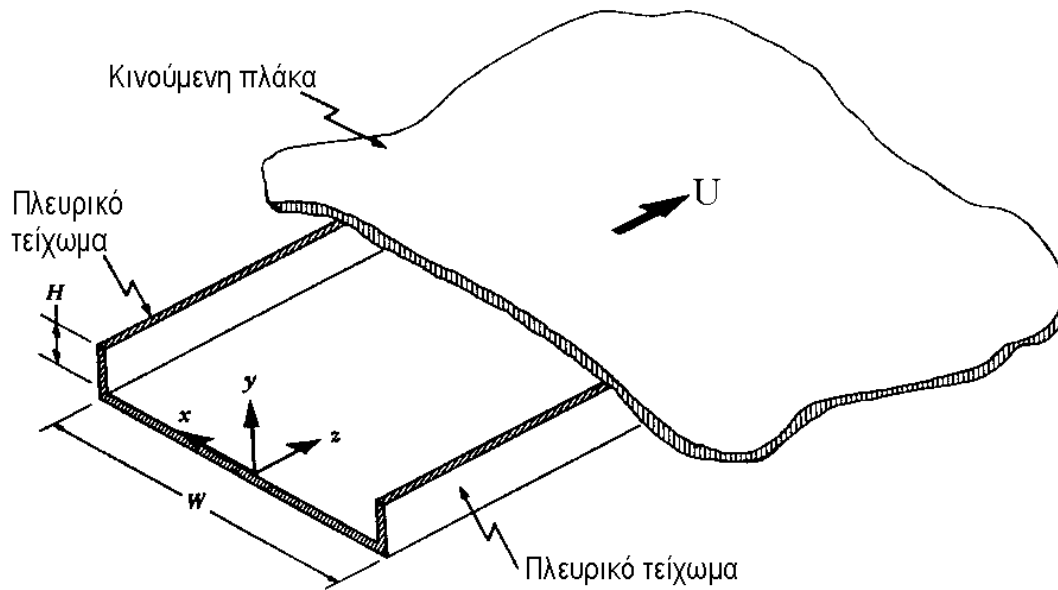
η οποία με τη βοήθεια των εξισώσεων [2.35] & [2.30] μπορεί να γραφεί και ως εξής:

$$\tau_{yz}(1) = -\mu \frac{U}{H} \left[1 + 3 \left(1 - \frac{q}{q_d} \right) \right] \quad [2.39]$$

2.6.2 Μονοκόχλιος εκβολέας ως αντλία πίεσης

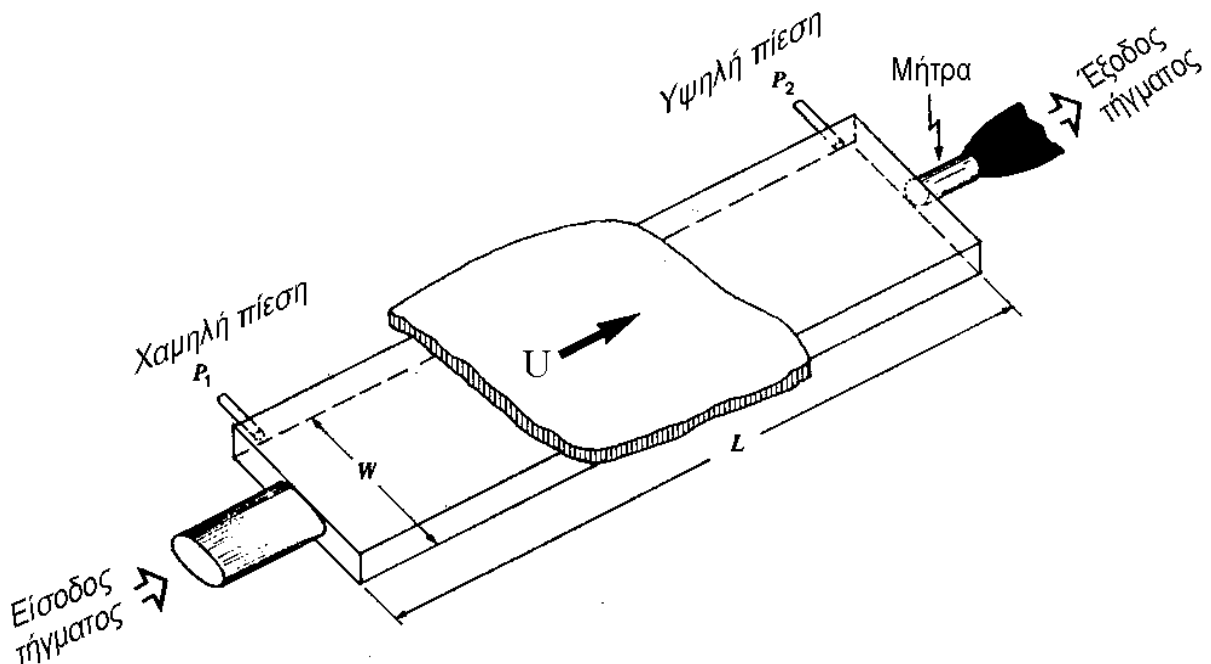
Είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο πως μια απλή γεωμετρική διαμόρφωση δίνει τη δυνατότητα να αυξηθεί η πίεση σε ένα ιξώδες ρευστό. Στην περίπτωση ανοικτού αγωγού δεν έχουμε παραγωγή πίεσης, το ρευστό απλώς σύρεται από την κινούμενη πλάκα και αναπτύσσεται ροή οπισθέλκουσας. Αν γίνει μερικός φραγμός της εξόδου του αγωγού, τότε ένας μέρος του ρευστού θα συνεχίζει να σύρεται ενώ ταυτόχρονα θα παράγεται πίεση. Η διάταξη αφού παράγει πίεση λειτουργεί ως αντλία. Με βάση τα παραπάνω, η οπισθέλκουσα ροή με το ένα άκρο κλειστό παράγει πίεση.

Στη συνέχεια θα αναλυθεί πως αυτή η ιδέα με τις απαραίτητες τροποποιήσεις θα μπορέσει να εφαρμοσθεί στην πράξη. Αρχικά περιορίζουμε το ρευστό με την προσθήκη πλευρικών τοιχωμάτων στην κάτω πλάκα, ώστε να δημιουργηθεί μια ρηχή αύλακα ($H/W \ll 1$) ορθογώνιου σχήματος με πλάτος W . Η κινούμενη πάνω πλάκα ολισθαίνει στην αύλακα με σταθερή ταχύτητα κατά την κάτω κατεύθυνση της αύλακας (z).



Σχήμα 2.24: Αβαθής ορθογώνια αύλακα καλυμμένη με κινούμενη πλάκα "απείρων" διαστάσεων.

Η επόμενη επέμβαση στην προηγούμενη γεωμετρία είναι η αύλακα να αποκτήσει συγκεκριμένο μήκος με φραγή της εισόδου και εξόδου της. Για το λόγο αυτό στην είσοδο τοποθετείται "σύστημα τροφοδοσίας" του τήγματος και στην έξοδο μία μήτρα (Σχήμα 2.25). Αν παρέχεται στην είσοδο συνεχής τροφοδοσία τήγματος σε χαμηλή πίεση P_1 , η διάταξη θα αντλήσει το τήγμα, θα ανυψώσει την πίεσή του σε P_2 και θα το εξωθήσει στην έξοδο προς τη μήτρα.



Σχήμα 2.25: Αβαθής αύλακα συγκεκριμένων διαστάσεων καλυμμένη με κινούμενη πλάκα "απείρων" διαστάσεων.

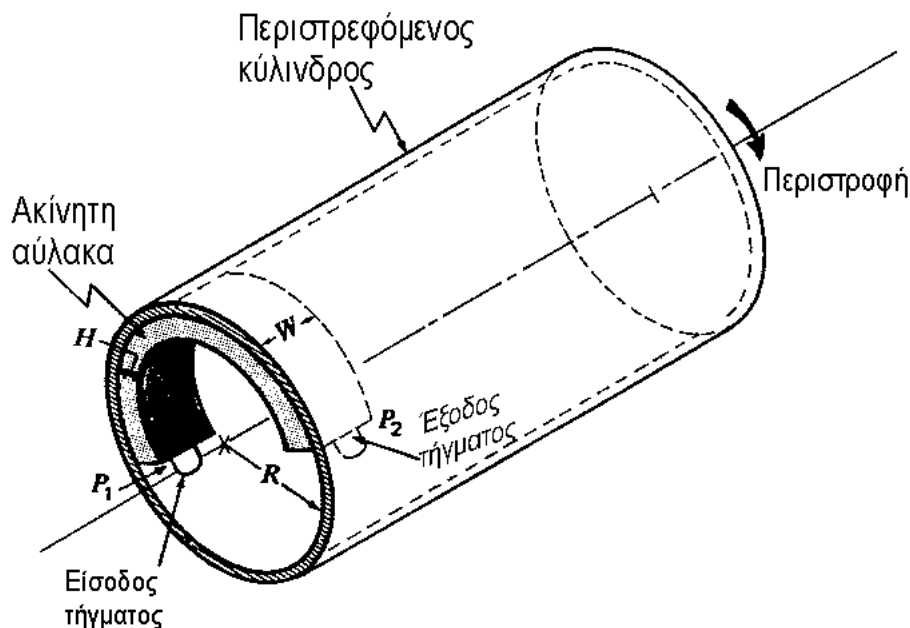
Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε μια πρακτική συσκευή παραγωγής πίεσης, στην οποία η πάνω πλάκα είναι “απείρων” διαστάσεων. Μπορούμε να περιορίσουμε την τελευταία αυτή “θεωρητική προσέγγιση” της αντλίας με μια πιο πρακτική λύση. Για παράδειγμα μπορούμε να “λυγίσουμε” την αύλακα στην z -κατεύθυνση ώστε να σχηματισθεί το τόξο ενός κύκλου. Στην περίπτωση αυτή ένας περιστρεφόμενος κύλινδρος προσαρμοσμένος στο πάνω μέρος της λυγισμένης αύλακας θα λειτουργεί όπως η πλάκα των “απείρων” διαστάσεων (Σχήμα 2.26).

Η εφαπτομενική ταχύτητα της κινούμενης επιφάνειας στο Σχήμα 2.26 δίνεται από τη σχέση:

$$U = \pi ND \quad [2.40]$$

όπου N είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής και D η διάμετρος του κυλίνδρου.

Με αυτή την τελευταία τροποποίηση δημιουργήθηκε μια διάταξη η οποία μπορεί να κατασκευασθεί και να λειτουργήσει αποτελεσματικά παρά το γεγονός ότι υπάρχουν ακόμη κάποιοι περιορισμοί. Επίσης έχουμε ένα θεωρητικό μοντέλο για αυτή τη διάταξη, το οποίο μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε για να αριστοποιήσουμε το σχεδιασμό της.



Σχήμα 2.26: Η λυγισμένη αβαθής αύλακα τοποθετημένη στο εσωτερικό ενός περιστρεφόμενου κυλίνδρου. Η εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου σχηματίζει την κινούμενη πλάκα των “απείρων” διαστάσεων.

Συγκεκριμένα, η γεωμετρία που προαναφέρθηκε μπορεί να περιγραφεί με την εξίσωση [2.29]. Πολλαπλασιάζοντας με το πλάτος W λαμβάνεται ο συνολικός ρυθμός ροής και αντικαθιστώντας την κλίση της πίεσης με την πτώση πίεσης από την είσοδο

στην έξοδο (επιτρέπεται αυτή αντικατάσταση γιατί η κλίση της πίεσης είναι σταθερή) λαμβάνεται η “εξίσωση σχεδιασμού” αυτής της αντλίας:

$$Q = \frac{UWH}{2} + \frac{WH^3}{12\mu} \left(\frac{P_1 - P_2}{L} \right) \quad [2.41]$$

Ο στόχος μας είναι να επιτευχθούν υψηλοί ρυθμοί ροής καθώς και πιέσεις, δεδομένου ότι κατά τη φάση της μορφοποίησης των πολυμερών χρειάζονται οι υψηλές πιέσεις.

Με την ανάλυση της εξίσωσης [2.41], μπορούμε να εξετάσουμε τις δυνατότητες και τους περιορισμούς που παρουσιάζει κάθε παράμετρος για το σύστημα αυτό. Η ταχύτητα U είναι ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής N . Η αύξηση της N έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ογκομετρικής παροχής Q και της πίεσης εξόδου P_2 . Εντούτοις, ένας πρακτικός περιορισμός στην αύξηση του N προέρχεται από τη φύση του πολυμερικού τήγματος. Υψηλή γωνιακή ταχύτητα περιστροφής οδηγεί στην ανάπτυξη υψηλών ρυθμών διάτμησης και επομένως στη μηχανική αποικοδόμηση του πολυμερούς λόγω διάτμησης, στην υπερθέρμανση (θερμική αποικοδόμηση) λόγω της ανάπτυξης ιξώδους θερμότητας, ακόμη και ολίσθησης στα τοιχώματα της διάταξης. Υπάρχει επομένως ένας περιορισμός στο πως θα χρησιμοποιηθεί αυτή η λειτουργική παράμετρος στην αύξηση της παροχής της διάταξης.

Μπορούμε να αυξήσουμε την πίεση P_2 για δεδομένη ογκομετρική παροχή Q με κατάλληλο χειρισμό του πλάτους W , του βάθους H και του μήκους L της αύλακας.

Με αναδιάταξη των όρων της εξίσωσης [2.41] λαμβάνεται:

$$P_2 - P_1 = 12\mu L \left(\frac{U}{2H^2} - \frac{Q}{WH^3} \right) \quad [2.42]$$

Αύξηση στο πλάτος της αύλακας θα επιφέρει αύξηση στην πίεση, αλλά στην περίπτωση αυτή υπάρχουν περιορισμοί λόγω σημαντικών αλληλεπιδράσεων από τη γεωμετρία της εισόδου και εξόδου της διάταξης (entrance and exit effect).

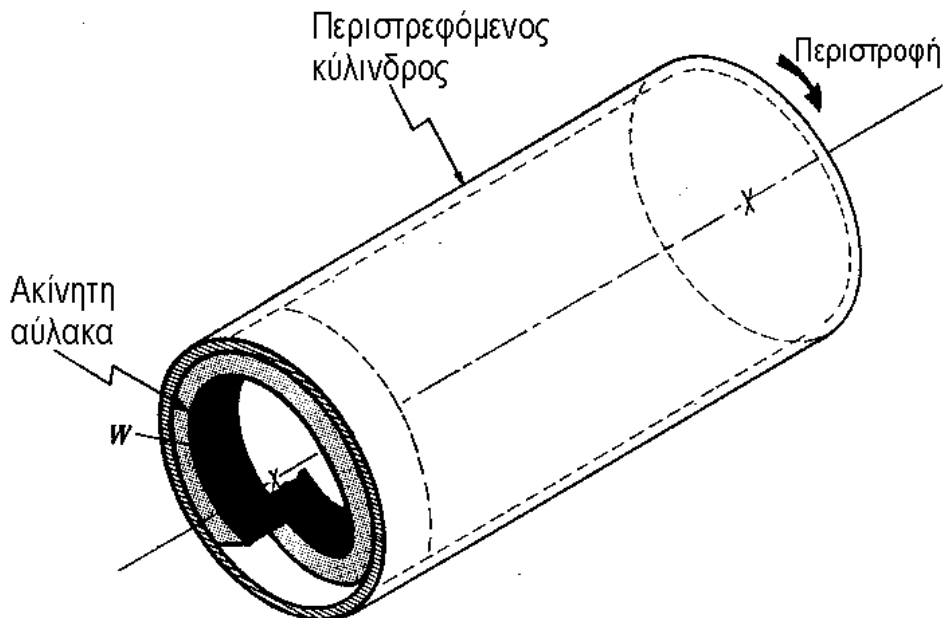
Επίσης αποδεικνύεται ότι υπάρχει ένα βέλτιστο βάθος αύλακας για τη μέγιστη αύξηση της πίεσης και για δεδομένο ρυθμό ογκομετρικής παροχής, το οποίο είναι :

$$H_{opt} = \frac{3Q}{WU} \quad [2.43]$$

Η εξίσωση αυτή αποδεικνύει ότι στην προσπάθεια να επιτευχθούν υψηλές πιέσεις υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί οι οποίοι τίθενται κατά τη διαμόρφωση του βάθους της αύλακας.

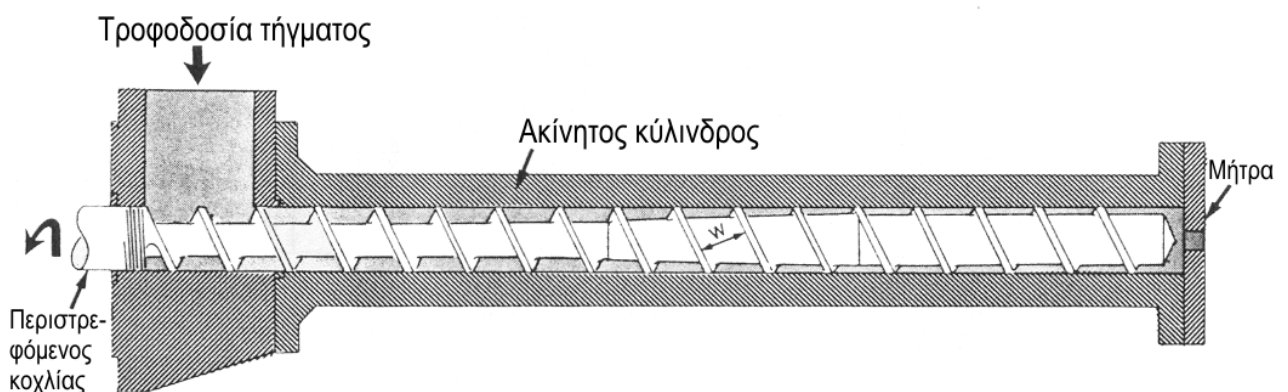
Η τελευταία διαθέσιμη παράμετρος σχεδιασμού είναι το μήκος του καναλιού L . Η γεωμετρική διαμόρφωση που μελετάται καθορίζει ένα φυσικό όριο (πD) στο L . Θα μπορούσε να αυξηθεί η διάμετρος D , αλλά είναι φανερό ότι υπάρχει ένα πρακτικό όριο σε αυτή την προσέγγιση.

Με μια τελευταία μικρή τροποποίηση στην παραπάνω γεωμετρία, μπορεί να αυξηθεί το L σε οποιαδήποτε επιθυμητή τιμή. Συγκεκριμένα, αυτό μπορεί να επιτευχθεί με το να *στρέψουμε* την αύλακα ούτως ώστε μετά από μια πλήρη περιστροφή να μπορεί να αντικατασταθεί στην αξονική κατεύθυνση από το πλάτος μιας ίδιας αύλακας. Το Σχήμα 2.27 δείχνει αυτή την τροποποίηση.



Σχήμα 2.27: Η ελικοειδής γεωμετρία της λυγισμένης αύλακας τοποθετημένης στο εσωτερικό περιστρεφόμενου κυλίνδρου.

Η γεωμετρία που διαμορφώθηκε με την τελευταία παρέμβαση είναι ισοδύναμη με αυτή ενός *μονοκόχλιου εκβολέα*. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τομή της ελικοειδούς αύλακας από έναν συμπαγή κύλινδρο και τοποθέτηση του κοχλία που θα προκύψει σε κυλινδρικό διαμπερές σωλήνα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.28.



Σχήμα 2.28: Σχηματική αναπαράσταση μονοκόχλιου εκβολέα.

Αντί να περιστρέφεται ο κύλινδρος, μπορεί να περιστρέφεται ο κοχλίας προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Η κατάσταση αυτή μπορεί να συγκριθεί με τη γεωμετρία ενός εκβολέα όπου το ρευστό σύρεται κατά μήκος λόγω της σχετικής κίνησης του κοχλία και του κυλίνδρου. Με τον τρόπο αυτό λύνονται τα προβλήματα εισόδου και εξόδου, δημιουργώντας στην είσοδο του κυλίνδρου ένα άνοιγμα για την τροφοδοσία του πολυμερούς, ο κοχλίας αναπτύσσεται στο απαιτούμενο μήκος και στην έξοδο το τήγμα προωθείται προς τη μήτρα μορφοποίησης.

Με αυτή τη γεωμετρία έχουμε και άλλα πλεονεκτήματα όπως:

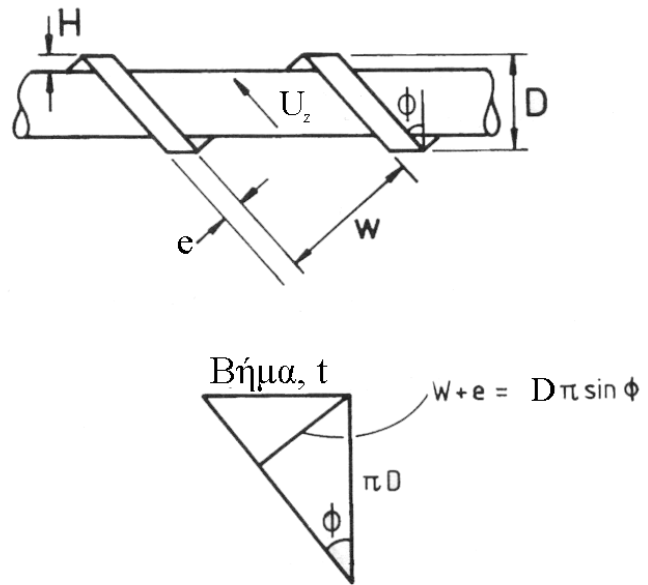
- Ο ακίνητος κύλινδρος μπορεί να θερμαίνεται ή να ψύχεται ανάλογα με τις απαιτήσεις
- Ο κοχλίας μπορεί να είναι εσωτερικά κενός επιτρέποντας ψύξη ή θέρμανση
- Η μηχανική ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή πίεσης δίνεται με την περιστροφή, μέσω κινητήρα, του κοχλία
- Η ελικοειδής αύλακα δημιουργεί μια συνιστώσα της ταχύτητας κάθετα στην έλικα η οποία επιφέρει μια κυκλική ροή στο ρευστό που οδηγεί σε καλή ανάμειξη του τήγματος
- Το τελικό προφίλ ταχυτήτων που διαμορφώνεται δημιουργεί στενή κατανομή χρόνων παραμονής και κάνει τον εκβολέα πολύ αποτελεσματική διάταξη κατά την μορφοποίηση θερμοευαίσθητων πολυμερών.
- Η διάταξη αυτή μπορεί να επεξεργασθεί από μικρές ροές μέχρι πολύ μεγάλες παροχές.

2.6.3 Ανάλυση ροής σε μονοκόχλιο εκβολέα (I)

Η ανάλυση της ροής σε μονοκόχλιο εκβολέα έχει νόημα μόνο στη ζώνη δοσιμετρίας όπου το πολυμερικό τήγμα βρίσκεται σε ισοθερμοκρασιακές συνθήκες. Θεωρούμε επίσης για την απλοποίηση της ανάλυσης ότι το ρευστό μας έχει σταθερό ιξώδες και ότι η ροή λαμβάνει χώρα σε μια μεγάλων διαστάσεων αβαθή αύλακα.

Με αυτές τις παραδοχές θα εξετάσουμε τη συμβολή των ροών *οπισθέλκουσας, πίεσης και διαρροών*.

Η ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει τη ροή σε μονοκόχλιο εκβολέα ξεκινά με την αντίστροφη, προς την προηγούμενη παράγραφο, προσέγγιση. Συγκεκριμένα αυτή η αντίστροφη διαδικασία (“ξεδίπλωμα” της αύλακος) για έναν κοχλία με αβαθή αύλακα σταθερού βάθους, οδηγεί στη δημιουργία ενός τετράγωνου καναλιού που καλύπτεται με επίπεδη και εκτενή πλάκα (τον κύλινδρο) που κινείται με σταθερή ταχύτητα U_b .



Σχήμα 2.29: Γεωμετρία αναπτύγματος αύλακας εκβολέα.

Αν N είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κοχλία, η ταχύτητα U_b δίνεται από τη σχέση:

$$U_b = \pi D N \quad [2.44]$$

Από τη γεωμετρία της αύλακας του εκβολέα, η συνιστώσα της ταχύτητας στην κάτω κατεύθυνση του καναλιού (κατά τη γωνία της έλικας του κοχλία) δίνεται από τη σχέση:

$$U_z = U_b \cos \phi = \pi D N \cos \phi \quad [2.45]$$

Για το βήμα του κοχλία t ισχύει:

$$t = \pi D \tan \phi \quad [2.46]$$

Το πλάτος της αύλακας, δηλαδή η κάθετη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ελικώσεων, δίνεται από τη σχέση:

$$W = t \cos \phi - e \approx t \cos \phi \quad [2.47]$$

ή με αντικατάσταση του βήματος t από την εξίσωση [9.46]

$$W = \pi D \tan \phi \cos \phi - e = \pi D \sin \phi - e \approx \pi D \sin \phi \quad [2.48]$$

Επίσης η απόσταση στην κατεύθυνση z σχετίζεται με την αξονική απόσταση L με τη σχέση:

$$z = L / \sin \phi \quad [2.49]$$

Με αντικατάσταση στην εξίσωση [9.29] :

$$Q = \frac{1}{2} U_z H W - \frac{H^3 W}{12 \mu} \frac{dP}{dz} = \frac{1}{2} U_z H W - \frac{H^3 W}{12 \mu} \frac{\Delta P}{L} \sin \phi \quad [2.50]$$

λαμβάνεται η ακόλουθη απλουστευμένη έκφραση για τη ροή στον εκβολέα:

$$Q \approx \frac{1}{2} \pi^2 D^2 H N \sin \phi \cos \phi - \frac{\pi D H^3}{12 \mu} \sin^2 \phi \frac{\Delta P}{L} \quad [2.51]$$

όπου ΔP η διαφορά πίεσης που αναπτύσσεται στη ζώνη δοσιμετρίας ($P_{\text{εξόδου}} - P_{\text{εισόδου}}$) Στην εξίσωση [9.51], δε λαμβάνεται υπόψη το πλάτος του πέλματος της έλικας e το οποίο θεωρείται πολύ μικρό σε σχέση με το πλάτος της αύλακας.

Όπως έχει αναφερθεί, ο πρώτος όρος στις εξισώσεις [2.50] και [2.51] αντιστοιχεί στη ροή λόγω οπισθέλκουσας (Q_d) και ο δεύτερος όρος στη ροή λόγω πίεσης (Q_p).

Οι διαρροές που γίνονται μέσω του διακένου δ μεταξύ της σπείρας του κοχλία και του κυλίνδρου ονομάζεται ροή διαρροών Q_L (leakage flow) και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q_L = \frac{\pi^2 D^2 \delta^3}{12 \mu e} \tan \phi \frac{\Delta P}{L} \quad [2.52]$$

Στις πρακτικές εφαρμογές μπορούμε να παραλείψουμε τη συμβολή της ροής λόγω διαρροών χωρίς σημαντικό σφάλμα.

Επομένως η συνολική ροή για ένα σύστημα εκβολής περιγράφεται από τους ακόλουθους όρους:

$$Q = Q_d - Q_p - Q_L = Q_d - Q_p \quad [2.53]$$

Για δεδομένο σύστημα εκβολής, τα μεγέθη L , D , H και ϕ είναι σταθερά επομένως η ογκομετρική παροχή του εκβολέα για νευτωνικό ρευστό, περιγράφεται από την ακόλουθη γενικευμένη σχέση:

$$Q = AN - C \frac{\Delta P}{\mu} \quad [2.54]$$

2.6.4 Σύνδεση εκβολέα και μήτρα μορφοποίησης

Στην πράξη μετά από τον εκβολέα ακολουθεί η μήτρα μορφοποίησης. Η εκροή από τον εκβολέα είναι εισροή για τη μήτρα:

$$Q_{\text{εκβολέα}} \equiv Q_{\text{μήτρα}} \quad [2.55]$$

Σε μήτρα κυκλικής διατομής ακτίνας R και μήκους L_d για νευτωνικό ρευστό και ισοθερμοκρασιακές συνθήκες, η ογκομετρική παροχή και η πτώση πίεσης (ΔP) δίνεται από την εξίσωση Haagen-Poiseuille:

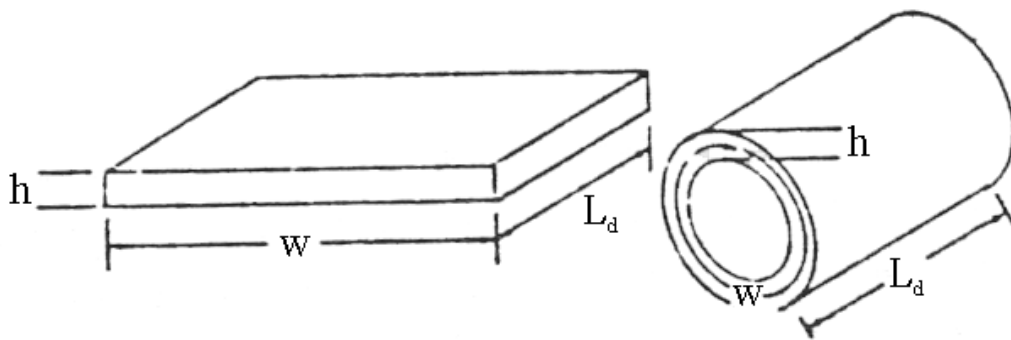
$$Q = \frac{\pi R^4}{8 \mu} \frac{\Delta P}{L_d} \quad [2.56]$$

Στην περίπτωση μήτρας με μορφή σχισμής (Σχήμα 2.30), η ογκομετρική παροχή δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q = \frac{wh^3}{12\mu} \frac{\Delta P}{L_d} \quad [2.57]$$

όπου w το πλάτος και h το άνοιγμα της μήτρας.

Η σχισμή μπορεί να είναι ευθεία (π.χ. παραγωγή επίπεδων φύλλων), ή κυκλική (π.χ. παραγωγή σωλήνων). Στην τελευταία περίπτωση αντί για το πλάτος της μήτρας w , χρησιμοποιείται μια μέση περιφέρεια.



Σχήμα 2.30: Μήτρες με μορφή ευθείας και κυκλικής σχισμής.

Στα νευτωνικά ρευστά η σχέση ογκομετρικής παροχής (Q) και μεταβολής της πίεσης (ΔP) για τον εκβολέα είναι γραμμική και η αντίστοιχη γραφική παράσταση ονομάζεται χαρακτηριστική γραμμή λειτουργίας του εκβολέα. Είναι φανερό από την εξίσωση [9.53] ότι μεγάλη παροχή για τον εκβολέα απαιτεί χαμηλή πίεση στην έξοδο.

Η σχέση της ογκομετρικής παροχής της μήτρας με την πίεση αποτελεί τη χαρακτηριστική της μήτρας. Στην περίπτωση αυτή μεγάλη παροχή απαιτεί μεγάλη πίεση στην είσοδο της δηλαδή στην έξοδο του εκβολέα. Το σημείο λειτουργίας του εκβολέα προσδιορίζεται από την τομή της χαρακτηριστικής γραμμής του κοχλία και της μήτρας που θα χρησιμοποιηθούν.

Ο ρυθμός διάτμησης στην αύλακα του κοχλία μπορεί να ληφθεί κατά προσέγγιση:

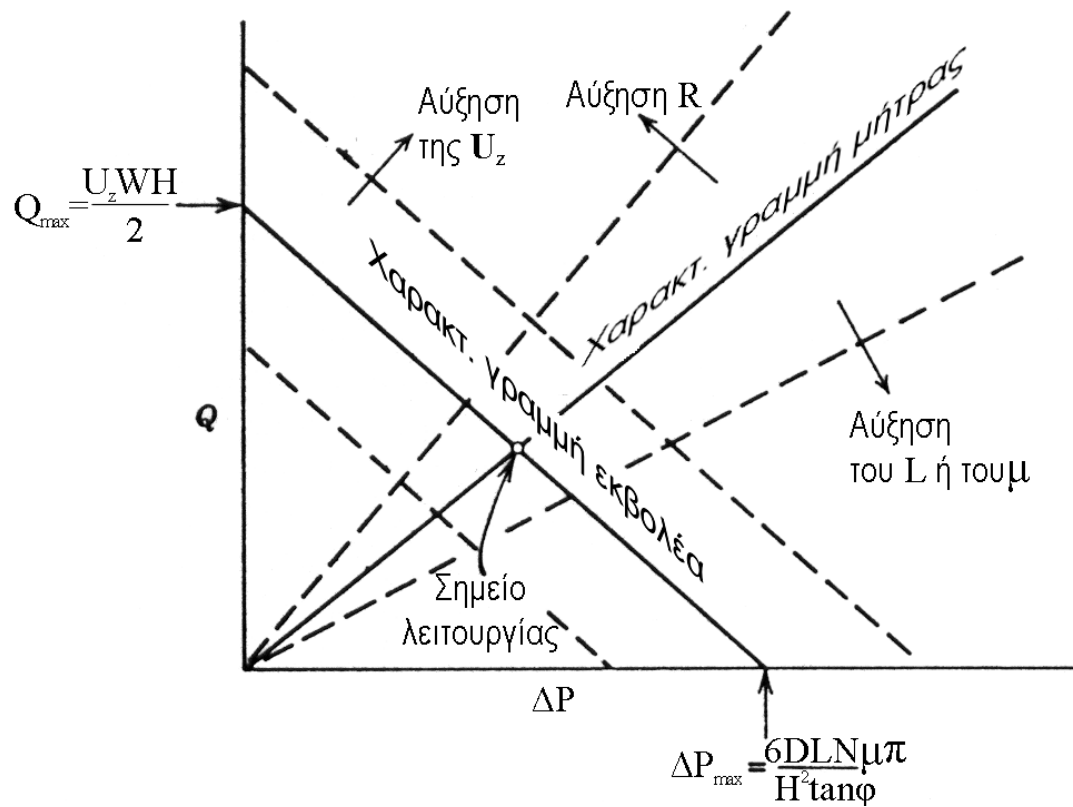
$$\dot{\gamma} = \frac{U_z}{H} = \frac{\pi DN \cos \phi}{H} \quad [2.58]$$

Ο ρυθμός διάτμησης στο τοίχωμα για μήτρα με κυκλικό άνοιγμα δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad [2.59]$$

Ο ρυθμός διάτμησης στο τοίχωμα για μήτρα με άνοιγμα ευθείας σχισμής δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{6Q}{wh^2} \quad [2.60]$$



Σχήμα 2.31: Χαρακτηριστικές γραμμές λειτουργίας εκβολέα και μήτρας εκβολής.

2.6.5 Ανάλυση ροής σε μονοκόχλιο εκβολέα (II)

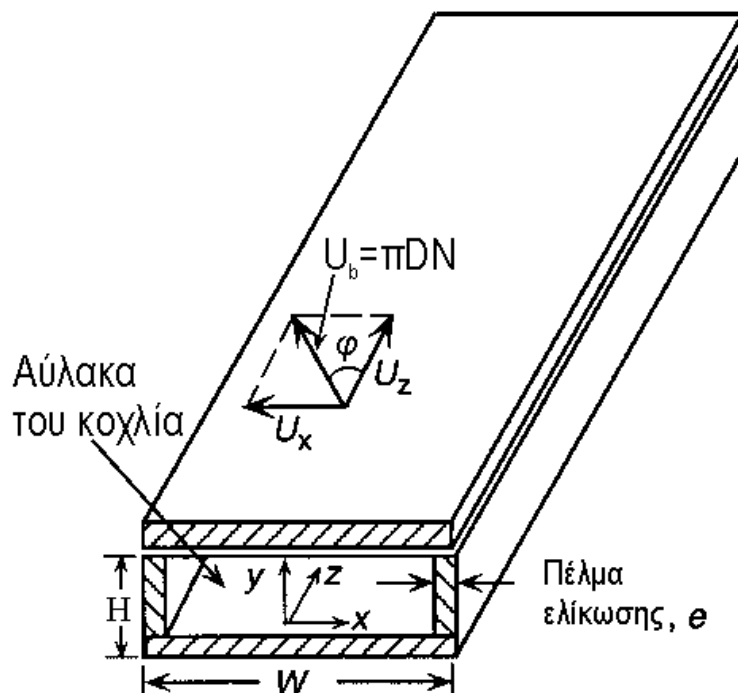
Στην ανάλυση της παραγράφου 2.6.3 δε λήφθηκε υπόψη η ύπαρξη της συνιστώσας της ταχύτητας του ρευστού κατά τον άξονα των x , κάθετα δηλαδή προς την έλικα του κοχλίου. Στην ανάλυση που ακολουθεί θα εξετάσουμε τη γενικότερη περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη και οι δύο συνιστώσες της ταχύτητας. Η ανάλυση γίνεται για ισοταχή κίνηση της επίπεδης πλάκας πάνω από την αβαθή αύλακα πλάτους W και ύψους H , πληρωμένης με νευτωνικό ρευστό. Η επίπεδη πλάκα κινείται με ταχύτητα U_b και σχηματίζει γωνία ϕ με τον άξονα z , ο οποίος είναι παράλληλος προς την ελίκωση του κοχλίου και προς την κινούμενη επίπεδη πλάκα. Ο άξονας y , όπως και στην προηγούμενη ανάλυση, είναι κάθετος προς την επίπεδη πλάκα.

$$U_b = \pi ND \quad [2.61]$$

Η ταχύτητα της επίπεδης πλάκας μπορεί να αναλυθεί σε δύο κάθετες συνιστώσες, κατά τους άξονες x και z αντίστοιχα:

$$U_z = U_b \cos \phi \quad [2.62]$$

$$U_x = U_b \sin \phi \quad [2.63]$$



Σχήμα 2.32: Γεωμετρία “ξεδιπλωμένης” αύλακας κοχλίου.

Η U_z συμπαρασύρει το ρευστό προς την έξοδο του εκβολέα, ενώ η U_x το αναγκάζει να κινηθεί κάθετα προς τα τοιχώματα της αύλακος γεγονός που επιφέρει καλύτερη ανάμειξη στο ρευστό.

Σε σύγκριση με την προηγούμενη ανάλυση των παράλληλων πλακών, πρέπει να σημειώσουμε δύο σημαντικές διαφορές:

- i. η ροή κατά τον άξονα z είναι διδιάστατη [δηλαδή $u_z(x,y)$]
- ii. η επιφάνεια του κυλίνδρου έχει μη μηδενική συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα των x , γεγονός που οδηγεί το ρευστό σε κυκλική κίνηση εγκάρσια προς την αύλακα.

Για τη μαθηματική επίλυση αυτού του προβλήματος ροής θα γίνουν οι βασικές υποθέσεις όπως στην περίπτωση της ροής μεταξύ παράλληλων πλακών.

Οι τρεις συνιστώσες της εξίσωσης κίνησης στο σύστημα ορθογώνιων συντεταγμένων είναι:

$$\rho \left(u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) \quad [2.64]$$

$$\rho \left(u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) \quad [2.65]$$

$$\rho \left(u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} \right) \quad [2.66]$$

όπου ρ η πυκνότητα του τήγματος.

Στις παραπάνω εξισώσεις οι συνιστώσες της ταχύτητας δεν μεταβάλλονται με το z γιατί θεωρείται ότι η ροή είναι πλήρως αναπτυγμένη:

$$\frac{\partial u_x}{\partial z} = \frac{\partial u_y}{\partial z} = \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad [2.67]$$

Επίσης θεωρούμε ότι η ροή είναι πλήρως αναπτυγμένη και στην x -κατεύθυνση (γεγονός που αποτελεί καλή προσέγγιση σε αβαθείς αύλακες), οπότε οι συνιστώσες της ταχύτητας δεν μεταβάλλονται με το x :

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{\partial u_y}{\partial x} = \frac{\partial u_z}{\partial x} = 0 \quad [2.68]$$

Από την εξίσωση της συνέχειας προκύπτει:

$$\partial u_y / \partial y = 0,$$

και σε συνδυασμό με τα προηγούμενα έχουμε $u_y=0$.

Με βάση τα παραπάνω η εξίσωση [2.65] γίνεται :

$$\partial P / \partial y = 0, \text{ δηλαδή η πίεση είναι συνάρτηση μόνο των } x \text{ και } z.$$

Επομένως από την εξίσωση [2.64] λαμβάνεται :

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \quad [2.69]$$

Στην εξίσωση [2.66] το αριστερό σκέλος παριστά τους όρους επιτάχυνσης, οι οποίοι στην περίπτωση της αργής ροής ενός ιξώδους ρευστού είναι πολύ μικρότερου μεγέθους σε σύγκριση με τους ιξώδεις όρους του δεξιού σκέλους. Στη ροή που αναπτύσσεται σε μια τυπική διεργασία εκβολής, ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις των ιξωδών τάσεων είναι της τάξης 10^{-5} .

Επομένως η εξίσωση [2.66] γίνεται :

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} \right) \quad [2.70]$$

Στην εξίσωση [2.69] είναι φανερό ότι το δεξιό σκέλος είναι συνάρτηση μόνο του y , ενώ το αριστερό σκέλος είναι συνάρτηση των x και z . Κατά συνέπεια αφού κάθε σκέλος δεν εξαρτάται από τις μεταβλητές του άλλου, θα πρέπει και οι δύο όροι να είναι σταθεροί.

Επομένως η εξίσωση [2.69] με ολοκλήρωση δίνει:

$$v_x = \frac{y^2}{2\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) + C_1 y + C_2 \quad [2.71]$$

Οι σταθερές C_1 και C_2 προσδιορίζονται από τις οριακές συνθήκες:

$$\begin{aligned} v_x(0) &= 0 \\ v_x(H) &= -U_x \end{aligned} \quad [2.72]$$

Αντικαθιστώντας τις οριακές συνθήκες στην εξίσωση [2.71] λαμβάνεται:

$$u_x = -\xi + \xi(\xi - 1) \left(\frac{H^2}{2\mu U_x} \frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad [2.73]$$

όπου $u_x = v_x / U_x$ και $\xi = y / H$

Για την εγκάρσια ροή στην αύλακα κατά τον άξονα x , υπάρχει και η επιπλέον συνθήκη του μηδενικού ρυθμού ροής, υπό τον όρο ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η ροή λόγω διαρροών στο διάκενο πέλματος έλικας-κυλίνδρου. Η συνθήκη αυτή με μαθηματικούς όρους γράφεται ως εξής:

$$\int_0^1 u_x d\xi = 0 \quad [2.74]$$

και αντικαθιστώντας την εξίσωση [2.73] στην εξίσωση [2.74], λαμβάνεται με ολοκλήρωση:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -6\eta \frac{U_x}{H^2} = -6\mu \frac{\pi N D \sin \phi}{H^2} \quad [2.75]$$

Η εξίσωση αυτή δίνει τη βαθμίδα της πίεσης στην x -κατεύθυνση. Παρατηρούμε ότι η βαθμίδα της πίεσης είναι ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής N και της διαμέτρου του κυλίνδρου D και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου του βάθους της αύλακας H .

Αντικαθιστώντας την εξίσωση [2.75] στην εξίσωση [2.73] λαμβάνεται το προφίλ της εγκάρσιας ταχύτητας:

$$u_x = \xi(2 - 3\xi) \quad [2.76]$$

Το προφίλ της συνιστώσας της ταχύτητας κατά τον άξονα z λαμβάνεται με την επίλυση της μερικής διαφορικής εξίσωσης [2.70]. Αν και η πίεση είναι συνάρτηση των x και z μπορεί να αποδειχθεί ότι η παράγωγος $\partial P / \partial z$ είναι σταθερή.

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται για την επίλυση της διαφορικής αυτής εξίσωσης είναι:

$$\begin{aligned} u_z(x, 0) &= 0 \\ u_z(x, H) &= U_z \\ u_z(0, y) &= 0 \\ u_z(W, y) &= 0 \end{aligned} \quad [2.77]$$

Το αποτέλεσμα της επίλυσης είναι:

$$\begin{aligned} u_z = \frac{4}{\pi} \sum_{i=1,3,5}^{\infty} \frac{\sinh(i\pi h\xi)}{i \sinh(i\pi h)} \sin(i\pi\chi) - \left(\frac{H^2}{2\mu U_z} \frac{\partial P}{\partial z} \right) \\ \left[\xi^2 - \xi + \frac{8}{\pi^3} \sum_{i=1,3,5}^{\infty} \frac{\cosh[i\pi(\chi - 0.5)/h]}{i^3 \cosh(i\pi/2h)} \sin(i\pi\xi) \right] \end{aligned} \quad [2.78]$$

όπου $u_z = v_z / U_z$, $\chi = x / W$ και $h = H / W$.

Στο Σχήμα 2.33 γίνεται απεικόνιση της κατανομής της ταχύτητας για ροή μόνο λόγω οπισθέλκουσας ($\partial P / \partial z = 0$), για διάφορες τιμές του h .

Οι πιο σημαντικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό ενός συστήματος εκβολής είναι:

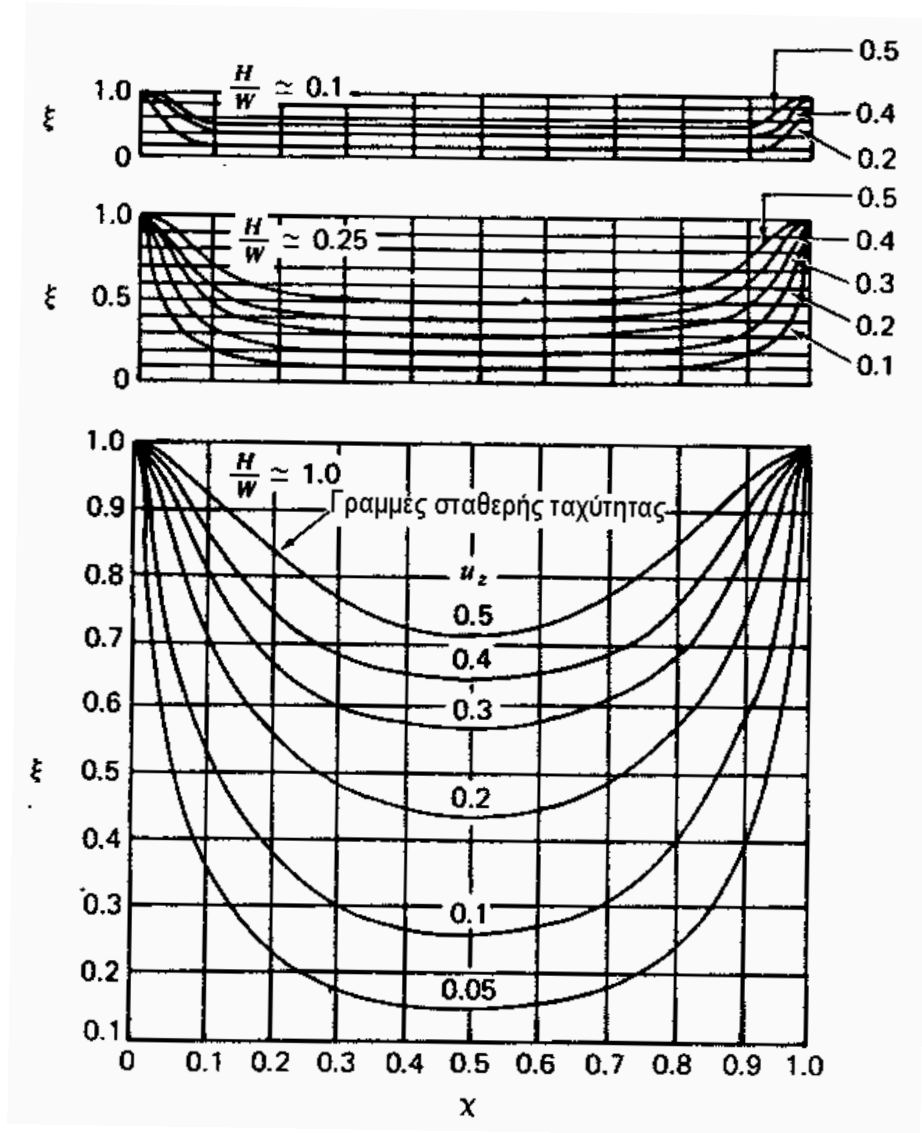
- (i) η ογκομετρική παροχή,
- (ii) το προφίλ της πίεσης κατά μήκος του κοχλίου και
- (iii) η απαιτούμενη ισχύς.

Όλα τα προαναφερθέντα μεγέθη υπολογίζονται από το προφίλ των ταχυτήτων στην αύλακα.

Για παράδειγμα, η ογκομετρική παροχή λαμβάνεται με ολοκλήρωση της συνιστώσας της ταχύτητας στην κάτω κατεύθυνση της αύλακας u_z , όπως δίνεται από την εξίσωση [2.78]:

$$Q = WHU_z \int_0^1 \int_0^1 u_z d\xi d\chi = \frac{U_z WH}{2} F_d + \frac{WH^3}{12\mu} \left(-\frac{\partial P}{\partial z} \right) F_p \quad [2.79]$$

όπου F_d και F_p είναι οι “συντελεστές μορφής” (“shape factors”) για τη ροή οπισθέλκουσας και πίεσης αντίστοιχα. Οι συντελεστές αυτοί έχουν τιμές μικρότερες της μονάδας και αντιπροσωπεύουν το κατά πόσο μειώνονται οι αντίστοιχες ροές στην αύλακα λόγω της παρουσίας των τοιχωμάτων της σπείρας του κοχλίου.



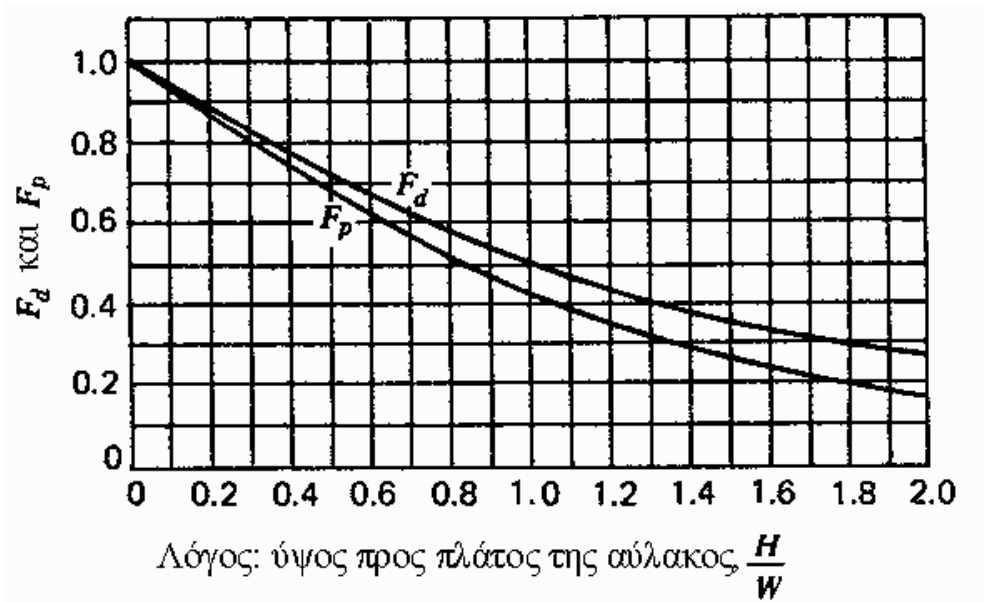
Σχήμα 2.33: Η κατανομή της συνιστώσας της ταχύτητας στην κάτω κατεύθυνση της αύλακας (άξονας z) για ροή μόνο λόγω οπισθέλκουσας (εξίσωση 2.78).

Οι συντελεστές αυτοί δίνονται από τις εξισώσεις:

$$F_d = \frac{16W}{\pi^3 H} \sum_{i=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{i^3} \tanh\left(\frac{i\pi H}{2W}\right) \quad [2.80]$$

$$F_p = 1 - \frac{192H}{\pi^5 W} \sum_{i=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{i^5} \tanh\left(\frac{i\pi W}{2H}\right) \quad [2.81]$$

Παρατηρείται από τις παραπάνω εξισώσεις ότι οι “συντελεστές μορφής” εξαρτώνται μόνο από το λόγο H/W (Σχήμα 2.34).



Σχήμα 2.34: Οι συντελεστές μορφής για ροή λόγω οπισθέλκουσας (F_d) και ροή λόγω πίεσης (F_p), από τις εξισώσεις [2.80] και [2.81] αντίστοιχα.

Η επίδραση των ελικώσεων είναι πιο αισθητή στη ροή πίεσης παρά στη ροή οπισθέλκουσας. Όταν ο λόγος H/W γίνει πολύ μικρός, και οι δύο συντελεστές F_d και F_p τείνουν στη μονάδα και στην περίπτωση αυτή η εξίσωση [2.79] προσεγγίζει αυτή της ροής νευτωνικού ρευστού σε παράλληλες πλάκες, υπό ισοθερμοκρασιακές συνθήκες.

Η εξίσωση [2.79] αποτελεί βασική σχέση της θεωρίας της εκβολής νευτωνικού ρευστού σε ισοθερμοκρασιακές συνθήκες. Αποτελείται από δύο ανεξάρτητους μεταξύ τους όρους, ο πρώτος αντιπροσωπεύει τη ροή λόγω οπισθέλκουσας και ο δεύτερος τη ροή λόγω πίεσης.

Ο λόγος της ροής πίεσης προς τη ροή οπισθέλκουσας λαμβάνεται από την εξίσωση [2.79]:

$$-\frac{Q_p}{Q_d} = \frac{H^2}{6\mu U_z} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right) \frac{F_p}{F_d} \quad [2.82]$$

η οποία για αβαθή αύλακα μεταπίπτει στην εξίσωση [2.32].

Η έννοια της ροής πίεσης και το προφίλ της ταχύτητας στην z -διεύθυνση δημιουργεί την εντύπωση ότι υπάρχει ροή προς την πλευρά της χοάνης τροφοδοσίας, γεγονός που είναι αδύνατο. Αυτό γίνεται φανερό και από το προφίλ της ταχύτητας προς την αξονική διεύθυνση:

$$v_\ell = v_x \cos \phi + v_z \sin \phi \quad [2.83]$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση [2.76] και την εξίσωση [2.78] στην [2.83] και χρησιμοποιώντας την εξίσωση [2.82], λαμβάνεται:

$$u_\ell = 3\xi(1-\xi)\left(1 + \frac{Q_p}{Q_d}\right)\sin\phi\cos\phi \quad [2.84]$$

όπου $u_\ell = v_\ell / U_b$

Από την εξίσωση [2.84] εξάγονται ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Για γωνίες ελίκωσης μεταξύ 0 και $\pi/2$, η u_ℓ είναι πάντα θετική και επομένως δεν υπάρχει περίπτωση για ροή προς την πίσω φορά κατά τον άξονα του κοχλίου (προς τη χοάνη τροφοδοσίας). Στην περίπτωση μηδενικής ογκομετρικής παροχής ($Q_p+Q_d=0$), η u_ℓ μηδενίζεται για όλες τις τιμές του ξ .

Τέλος η ταχύτητα στην αξονική διεύθυνση εξαρτάται από την τιμή της γωνίας ϕ . Για ροή μόνο λόγω οπισθέλκουσας, η ταχύτητα u_ℓ φθάνει σε μέγιστο για $\phi = \pi/4$ και για οποιαδήποτε τιμή του ξ .

Στο Σχήμα 2.35, φαίνεται το προφίλ των ταχυτήτων σε διάφορα επίπεδα ως συνάρτηση του λόγου Q_p / Q_d .

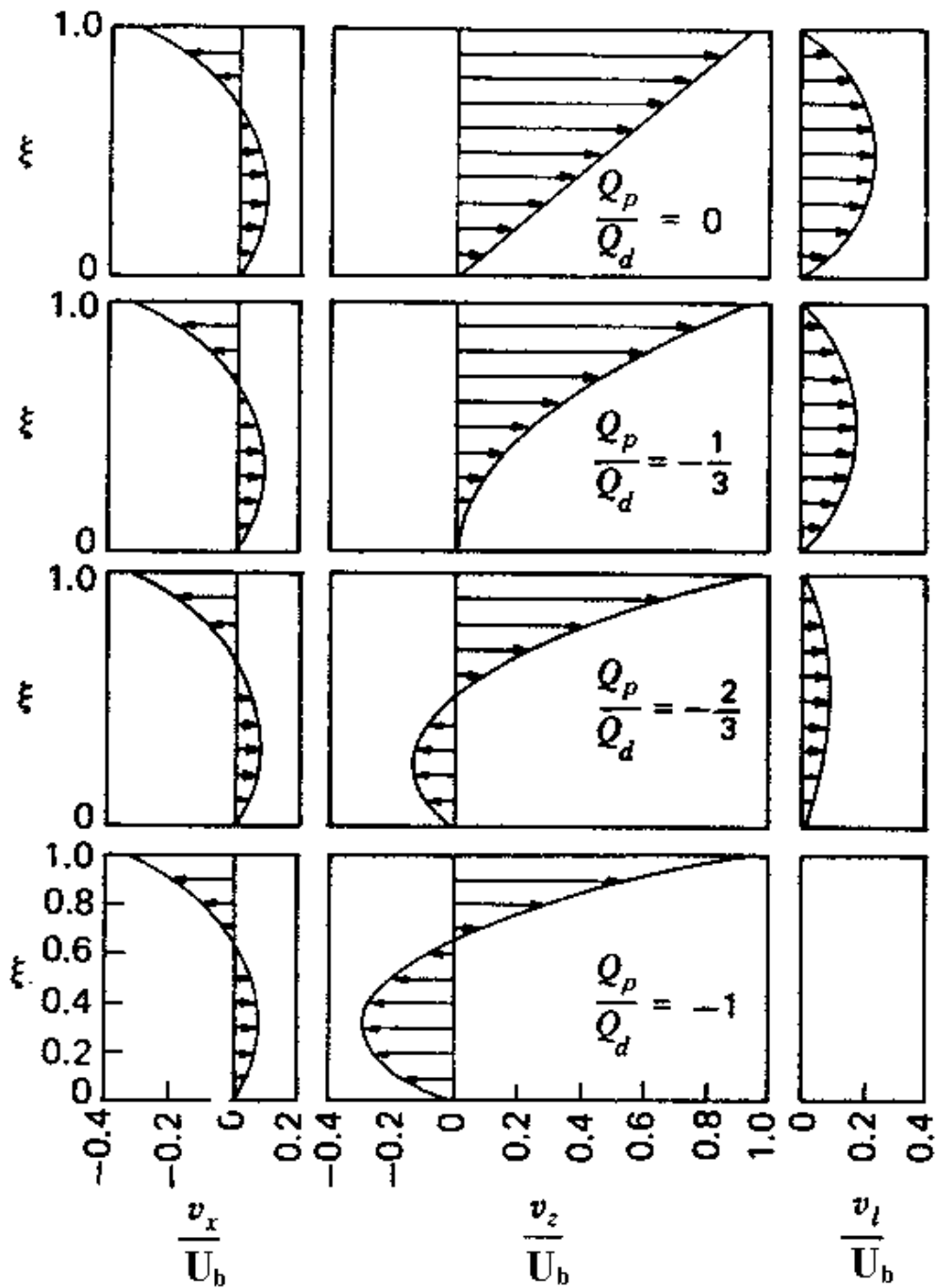
Πρέπει να τονισθεί ότι το προφίλ της ταχύτητα u_x είναι ανεξάρτητο του λόγου Q_d / Q_p . Επίσης παρατηρείται ότι για μηδενική ογκομετρική παροχή, και οι δύο συνιστώσες της ταχύτητας u_x και u_z μηδενίζονται στο ίδιο σημείο $\xi = \frac{2}{3}$. Κατά συνέπεια σε αυτές τις συνθήκες τα σωματίδια του ρευστού είναι ακίνητα.

Είναι πολύ δύσκολο να προβλέψουμε τη ροή λόγω διαρροών σε πραγματικές συνθήκες ροής, αλλά αυτό μπορεί να επιτευχθεί για νευτωνικό ρευστό σε ισοθερμοκρασιακές συνθήκες σε αγωγό ορθογώνιας διατομής. Μαθηματική επεξεργασία με τις παραπάνω συνθήκες οδηγεί στην ακόλουθη τροποποίηση της εξίσωσης [2.79]:

$$Q = \frac{U_z W(H-\delta_f)}{2} F_d + \frac{WH^3}{12\mu} \left(-\frac{\partial P}{\partial z} \right) F_p (1+f_L) \quad [2.85]$$

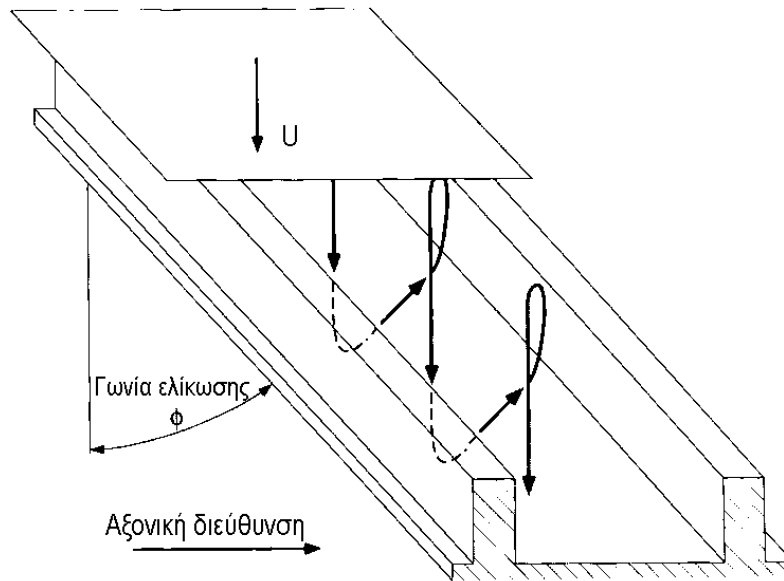
$$\text{όπου } f_L = \left(\frac{\delta_f}{H} \right)^3 \frac{e}{W} \frac{\mu}{\mu_f} + \frac{\left(1 + \frac{e}{W} \right) \left[\frac{1+e/W}{\tan^2\phi} - \frac{6\mu U_z (H-\delta_f)}{H^3 (\partial P / \partial z)} \right]}{1 + \frac{\mu_f}{\mu} \left(\frac{H}{\delta_f} \right)^3 \frac{e}{W}} \quad [2.86]$$

όπου μ_f είναι το ιξώδες κατά μήκος του τοιχώματος της ελίκωσης και μ στην αύλακα. Για νευτωνικό ρευστό $\mu = \mu_f$.



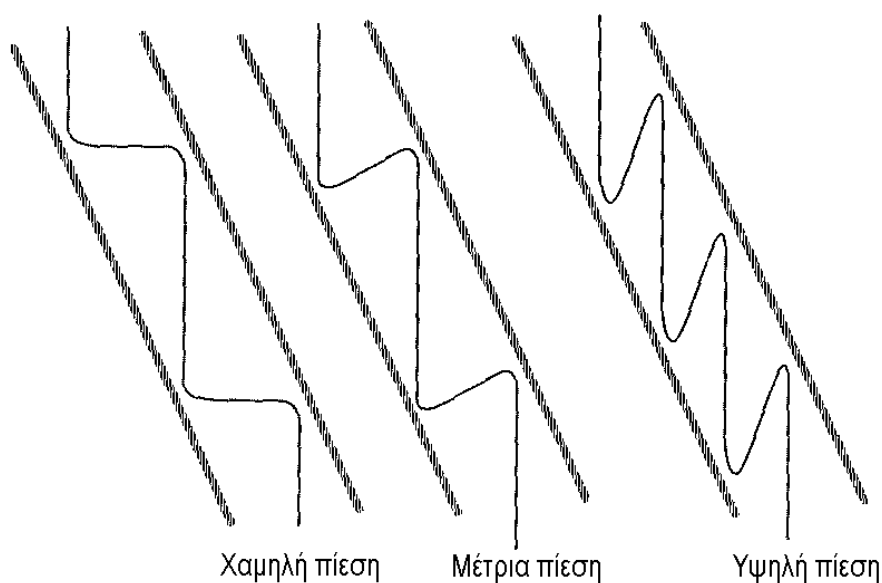
Σχήμα 2.35: Προφίλ της ταχύτητας κατά την κάτω κατεύθυνση της αύλακας u_z , εγκάρσια στην αύλακα u_x και αξονική ταχύτητα u_l για διάφορες τιμές του λόγου Q_d/Q_p , σε κοχλία με αβαθή αύλακα τετράγωνης διατομής.

Όπως αναφέρθηκε, η πραγματική κίνηση του ρευστού είναι αποτέλεσμα της συνδυασμένης επίδρασης των ταχυτήτων με φορά κατά την κάτω κατεύθυνση (άξονα z) και κατά την εγκάρσια κατεύθυνση της αύλακας (άξονα x), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.36.



Σχήμα 2.36: Κίνηση του ρευστού στη ζώνη μεταφοράς του τήγματος.

Ένας στοιχειώδης όγκος ρευστού ακολουθεί μια ελικοειδή διαδρομή κατά μήκος της αύλακας του κοχλίου. Κοντά στον κύλινδρο το ρευστό ακολουθεί τα τοιχώματα του κυλίνδρου. Όταν πλησιάζει στην πλευρά της αύλακας που προηγείται (pushing flight flank) το στοιχείο του ρευστού κινείται προς την κάτω πλευρά της αύλακας και τη διασχίζει. Όταν το στοιχείο φτάσει στο τοίχωμα της αύλακας που ακολουθεί (trailing flight flank) κινείται προς τα πάνω μέχρι να πλησιάσει τα τοιχώματα του κυλίνδρου και ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται. Όσο περισσότερη πίεση αναπτύσσεται στην αύλακα οι ελικοειδείς πορείες που διανύονται από το ρευστό έρχονται σε πιο κοντινή θέση (Σχήμα 2.37).



Σχήμα 2.37: Η κίνηση του ρευστού για διάφορα επίπεδα αναπτυσσόμενης πίεσης.

Στην ανάλυση που προηγήθηκε, καταλήξαμε στη γεωμετρία του μονοκόχλιου εκβολέα χρησιμοποιώντας τη γεωμετρία των παράλληλων πλακών. Υπενθυμίζεται ότι το τελευταίο βήμα για τη διαμόρφωση της γεωμετρίας του εκβολέα ήταν η “στρέψη” της αύλακας στο εσωτερικό του περιστρεφόμενου κυλίνδρου, ούτως ώστε μετά από μια πλήρη περιστροφή να προχωρά σε απόσταση ίση με το πλάτος της. Αυτή η γεωμετρία οδηγεί το πολυμερές σε μια κυκλική κίνηση μέσα στην αύλακα, που οδηγεί σε στρωτή ανάμειξη και σε στενή κατανομή του χρόνου παραμονής. Η αποτελεσματική στρωτή ανάμειξη απαιτεί την εφαρμογή μεγάλης συνολικής παραμόρφωσης στο πολυμερικό τήγμα που βρίσκεται στη διάταξη. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται η ανομοιογένεια της σύστασης μέσα στην αύλακα. Εντούτοις η μορφή των πεδίων των ταχυτήτων που αναπτύσσονται στον εκβολέα είναι τέτοια που έχει ως αποτέλεσμα η συνολική παραμόρφωση που εξασκείται στα σωματίδια του ρευστού να είναι συνάρτηση της θέσης, και κατά συνέπεια ο βαθμός ανάμειξης είναι ανομοιόμορφος εγκάρσια στην αύλακα. Επομένως αναμένεται ανομοιογένεια στη σύσταση του εκβαλλόμενου ρευστού. Η ποσοτικοποίηση της ανομοιογένειας γίνεται με τον προσδιορισμό της συνάρτησης κατανομής των χρόνων παραμονής του πλαστικού στον εκβολέα όσο και της συνάρτησης κατανομής των διατμητικών τάσεων.

Στην ανάλυση που ακολουθεί θεωρούμε τη διάταξη εκβολέα με σταθερό βάθος αύλακας καθώς επίσης ότι έχουμε νευτωνικό ρευστό σε ισοθερμοκρασιακές συνθήκες.

Το πεδίο της ταχύτητας κατά την εγκάρσια κατεύθυνση της αύλακας περιγράφεται από την εξίσωση [2.76]: $u_x = \xi(2 - 3\xi)$

Κατά την κάτω κατεύθυνση της αύλακας η ταχύτητα δίνεται από την εξίσωση [2.78], η οποία, αντικαθιστώντας την U με την U_z , γίνεται:

$$u_z = \xi - 3\xi(1 - \xi) \left(\frac{H^2}{6\mu U_z} \frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad [2.87]$$

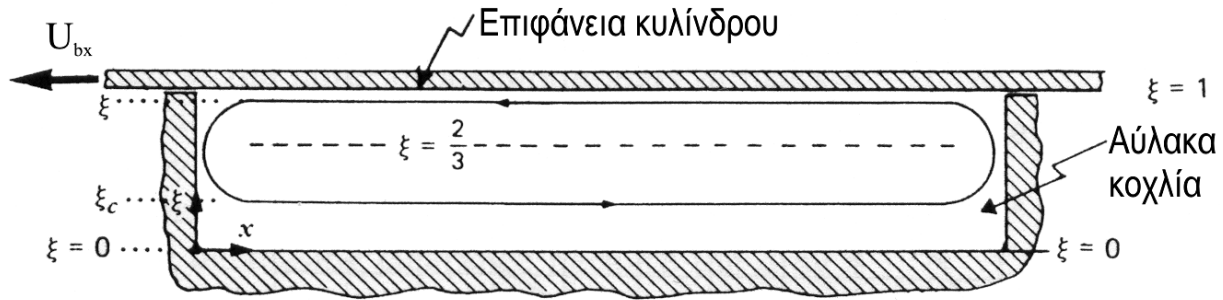
Η εξίσωση [2.87] με τη χρήση της εξίσωσης [2.82], γράφεται ως εξής:

$$u_z = \xi + 3\xi(1 - \xi) \frac{Q_p}{Q_d} \quad [2.88]$$

Για κλειστή έξοδο, όπου $Q_p/Q_d = -1$, το προφίλ των ταχυτήτων στην εγκάρσια (x) και στην κάτω κατεύθυνση (z) της αύλακας είναι όμοια και διαφέρουν μόνο στο πρόσημο. Οι συνθήκες λειτουργίες, το ιξώδες του τήγματος και το βάθος της αύλακας επηρεάζουν το προφίλ των ταχυτήτων κατά την κάτω κατεύθυνση της αύλακας αλλά όχι στην εγκάρσια κατεύθυνση.

Η τροχιά ενός στοιχειώδους σωματιδίου του ρευστού μέσα στην αύλακα του κοχλία μπορεί να υπολογισθεί από τις εξισώσεις [2.76] και [2.88]. Θεωρούμε ένα σωματίδιο το οποίο βρίσκεται στη θέση ξ στο πάνω μέρος της αύλακας ($\xi > 2/3$). Η εξίσωση [2.76] υποδεικνύει ότι το σωματίδιο θα έχει μια συγκεκριμένη και σταθερή ταχύτητα στην αρνητική φορά της x -κατεύθυνσης. Καθώς το σωματίδιο πλησιάζει το τοίχωμα της έλικας προώθησης (pushing flight) της αύλακας αλλάζει κατεύθυνση και αρχίζει να κινείται στην θετική x -κατεύθυνση σε συγκεκριμένη θέση ξ_c . Το σωματίδιο θα

διασχίσει την αύλακα και φθάνοντας στο τοίχωμα της έλικας που ακολουθεί (“trailing flight”), θα επιστρέψει στην προηγούμενη θέση του ξ .



Σχήμα 2.38: Η διαδρομή ενός σωματιδίου ρευστού σε εγκάρσια τομή της αύλακας του κοχλίου. Το σωματίδιο κυκλοφορεί μεταξύ ξ και ξ_c . Τα σωματίδια του ρευστού στη θέση $\xi=2/3$ δεν έχουν συνιστώσα ταχύτητας στην x -κατεύθυνση. Θεωρείται ότι δεν υπάρχει διαρροή του ρευστού στις έλικες της αύλακας.

Εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης της μάζας προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση που περιγράφει την κυκλοειδή κίνηση του σωματιδίου μεταξύ ξ και ξ_c :

$$\int_0^{\xi_c} u_x d\xi = - \int_{\xi}^1 u_x d\xi \quad [2.89]$$

η οποία, με αντικατάσταση από την εξίσωση [2.76] δίνει:

$$\begin{aligned} \xi_c^2 - \xi_c^3 &= \xi^2 - \xi^3 \\ 0 \leq \xi_c &\leq \frac{2}{3} \\ \frac{2}{3} \leq \xi &\leq 1 \end{aligned} \quad [2.90]$$

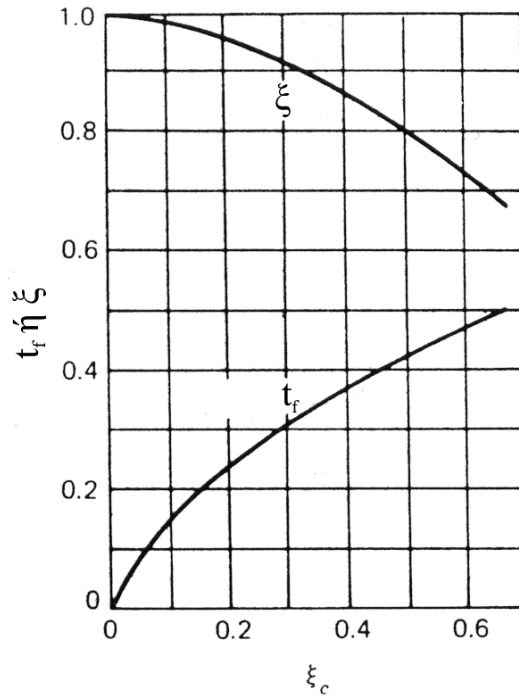
Η επίλυση της εξίσωσης [2.90] δίνει:

$$\xi = \frac{1}{2} \left(1 - \xi_c + \sqrt{1 + 2\xi_c - 3\xi_c^2} \right), 0 \leq \xi_c \leq \frac{2}{3} \quad [2.91]$$

και

$$\xi_c = \frac{1}{2} \left(1 - \xi + \sqrt{1 + 2\xi - 3\xi^2} \right), \frac{2}{3} \leq \xi \leq 1 \quad [2.92]$$

Στο Σχήμα 2.39 γίνεται απεικόνιση της σχέσης μεταξύ ξ και ξ_c . Στην ανάλυση αυτή δεν λαμβάνονται υπόψη τα σύνθετα πεδία ροής στην περιοχή των τοιχωμάτων της έλικας.



Σχήμα 2.39: Γραφική παράσταση της θέσης ξ σωματιδίου του ρευστού στο πάνω μέρος της αύλακας ως συνάρτηση προς τη θέση στο κάτω μέρος της αύλακας ξ_c , καθώς και του κλάσματος του χρόνου παραμονής t_f ως συνάρτηση της θέσης ξ_c .

i. Συνάρτηση κατανομής του χρόνου παραμονής

Ο χρόνος παραμονής ενός σωματιδίου στο πάνω μέρος της αύλακας ισούται με το λόγο του πλάτους της αύλακας προς την ταχύτητα: $W/(U_x|u_x(\xi)|)$, και ανάλογα για το κάτω μέρος της αύλακας: $W/(U_x|u_x(\xi_c)|)$, όπου W το πλάτος της αύλακας.

Επομένως το κλάσμα του χρόνου παραμονής του σωματιδίου στο πάνω μέρος της αύλακας στη θέση ξ , δίνεται από τη σχέση:

$$t_f(\xi) = \frac{1}{1 + \left| \frac{u_x(\xi)}{u_x(\xi_c)} \right|} = \frac{1}{1 - \frac{\xi(2-3\xi)}{\xi_c(2-3\xi_c)}} \quad [2.93]$$

Στο Σχήμα 2.39 φαίνεται η γραφική παράσταση του λόγου $t_f(\xi)$ ως συνάρτηση της θέσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όσο το σωματίδιο απομακρύνεται από τη θέση $\xi=2/3$, τόσο μικρότερο είναι το κλάσμα του χρόνου παραμονής στο πάνω μέρος της αύλακας.

Το σωματίδιο που κινείται μεταξύ των θέσεων ξ και ξ_c , κινείται επίσης και προς την κάτω κατεύθυνση (z) της αύλακας. Ο χρόνος παραμονής του σωματιδίου σε εκβολέα αξονικού μήκος ℓ είναι:

$$t = \frac{\ell}{U_b \bar{u}_\ell(\xi)} \quad [2.94]$$

όπου $\bar{u}_\ell(\xi)$ είναι η μέση ταχύτητα του σωματιδίου στην αξονική κατεύθυνση, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{u}_\ell(\xi) = u_\ell(\xi)t_f(\xi) + u_\ell(\xi_c)[1 - t_f(\xi)] \quad [2.95]$$

Το προφίλ της ταχύτητας στην αξονική κατεύθυνση, για ρηχή αύλακα λαμβάνεται απ' ευθείας από τις εξισώσεις [2.76] και [2.88]:

$$u_\ell(\xi) = 3\xi(1-\xi) \left(1 + \frac{Q_p}{Q_d} \right) \sin\phi \cos\phi \quad [2.96]$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις [2.95] και [2.96] στην εξίσωση [2.94] μαζί με τις εξισώσεις [2.91] και [2.92], λαμβάνεται ο χρόνος παραμονής στον εκβολέα ως συνάρτηση του ξ :

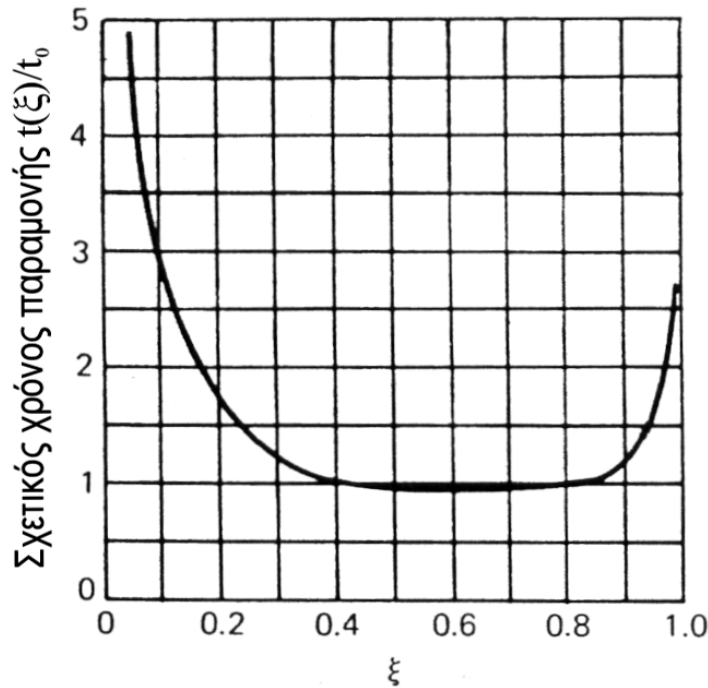
$$t(\xi) = \left[\frac{\ell}{3U_b(1+Q_p/Q_d)\sin\phi\cos\phi} \right] \frac{3\xi - 1 + 3\sqrt{1+2\xi-3\xi^2}}{\xi[1-\xi+\sqrt{1+2\xi-3\xi^2}]}, \frac{2}{3} \leq \xi \leq 1 \quad [2.97]$$

Ανάλογη είναι η έκφραση που λαμβάνεται για τη θέση ξ_c στο κάτω μέρος της αύλακας, αντικαθιστώντας όπου ξ τον όρο ξ_c στην εξίσωση [2.97]. Τον ελάχιστο χρόνο παραμονής t_0 τον έχουν τα σωματίδια στη θέση $\xi=2/3$ (μηδενική εγκάρσια ταχύτητα), και αυτός είναι:

$$t_0 = \frac{3\ell}{2U_b(1+Q_p/Q_d)\sin\phi\cos\phi} = \frac{3Z}{2U_z(1+Q_p/Q_d)} \quad [2.98]$$

όπου Z είναι το μήκος της αύλακας, και U_z είναι η συνιστώσα της ταχύτητας στην επιφάνεια του κυλίνδρου κατά την κάτω κατεύθυνση (z) της αύλακας.

Στο Σχήμα 2.40 γίνεται η γραφική παράσταση του σχετικού χρόνου παραμονής t/t_0 ως συνάρτηση του ξ . Παρατηρείται ότι για μια ευρεία περιοχή της αύλακας, ο χρόνος παραμονής είναι ίσος με τον ελάχιστο. Οι χρόνοι παραμονής αυξάνουν σημαντικά καθώς πλησιάζουμε στον πυθμένα ή στην οροφή της αύλακας.



Σχήμα 2.40: Ο σχετικός χρόνος παραμονής ως συνάρτηση της θέσης ξ στην αύλακα.

Το κλάσμα της ογκομετρικής παροχής για το ρευστό στο πάνω μέρος της αύλακας στην περιοχή μεταξύ ξ και $\xi+d\xi$, που αντιστοιχεί σε χρόνους παραμονής μεταξύ t και $t+dt$, είναι:

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{U_z WH}{Q} u_z(\xi) d\xi = \frac{U_z WH}{Q} \left[\xi + 3\xi(1-\xi) \frac{Q_p}{Q_d} \right] d\xi \quad [2.99]$$

Αλλά στο κάτω μέρος της αύλακας υπάρχει το αντίστοιχο κλάσμα ροής μεταξύ ξ_c και $\xi_c-d\xi_c$, το οποίο επίσης χαρακτηρίζεται από χρόνους παραμονής t και $t+dt$:

$$\frac{dQ_c}{Q} = \frac{U_z WH}{Q} u_z(\xi_c) |d\xi_c| = \frac{U_z WH}{Q} \left[\xi_c + 3\xi_c(1-\xi_c) \frac{Q_p}{Q_d} \right] |d\xi_c| \quad [2.100]$$

Το συνολικό κλάσμα της ογκομετρικής παροχής για το ρευστό το οποίο αντιστοιχεί σε χρόνους παραμονής t και $t+dt$ είναι το άθροισμα των εξισώσεων [2.99] και [2.100]. Η σχέση αυτή αποτελεί επίσης ορισμό της *συνάρτησης κατανομής του χρόνου παραμονής* (Residence Time Distribution, RTD) $f(t)dt$:

$$f(t)dt = \frac{dQ + dQ_c}{Q} \quad [2.101]$$

Με αντικατάσταση των εξισώσεων [2.99] και [2.100] στην εξίσωση [2.101] και με παραγωγή της εξίσωσης [2.102] που προκύπτει, έχουμε:

$$d\xi_c = \frac{1 - 3\xi - \sqrt{1 + 2\xi - 3\xi^2}}{2\sqrt{1 + 2\xi - 3\xi^2}} d\xi \quad [2.102]$$

και λαμβάνοντας υπόψη $|d\xi_c| = -d\xi_c$, λαμβάνεται:

$$f(t)dt = \frac{3\xi[1 - \xi + \sqrt{1 + 2\xi - 3\xi^2}]}{\sqrt{1 + 2\xi - 3\xi^2}} d\xi \quad [2.103]$$

Ο μέσος χρόνος παραμονής υπολογίζεται από τις εξισώσεις [2.101] και [2.97] :

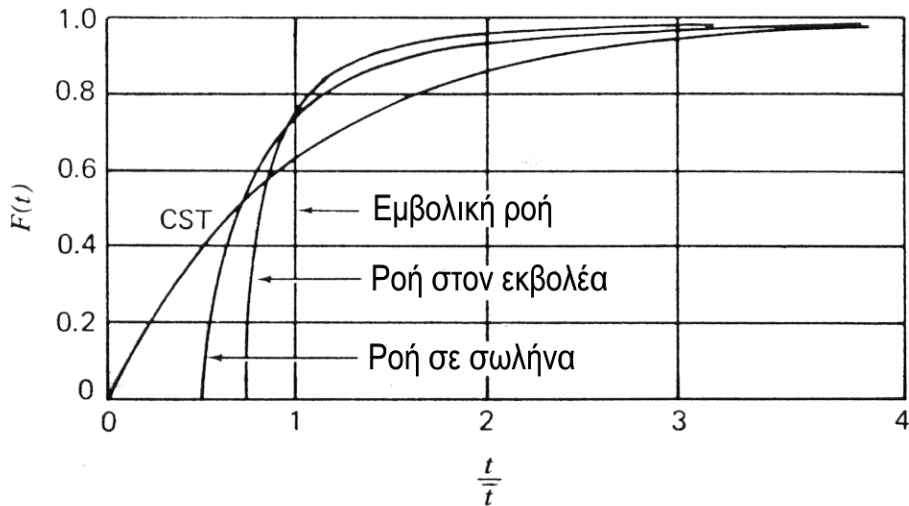
$$\bar{t} = \int_{t_0}^{\infty} tf(t)dt = \frac{4t_0}{3} \quad [2.104]$$

όπου t_0 δίνεται από την εξίσωση [2.98].

Η αθροιστική συνάρτηση της κατανομής του χρόνου παραμονής $F(t)$ λαμβάνεται με ολοκλήρωση της εξίσωσης [2.103]:

$$F(t) = F(\xi) = \frac{1}{2} \left[3\xi^2 - 1 + (\xi - 1)\sqrt{1 + 2\xi - 3\xi^2} \right] \quad [2.105]$$

Στο Σχήμα [2.41] φαίνεται η γραφική παράσταση της $F(t)$ ως συνάρτηση του ανηγμένου χρόνου $t/\bar{t}$ και συγκρίνεται η νευτωνική εμβολική ροή σε κυλινδρικό σωλήνα με αυτή ενός συνεχώς αναδευόμενου δοχείου (CST). Μόνον το 5% περίπου της ογκομετρικής παροχής, παραμένει για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από τον διπλάσιο του μέσου χρόνου παραμονής στον εκβολέα.



Σχήμα 2.41: Οι αθροιστικές συναρτήσεις των χρόνων παραμονής $F(t)$ ως συνάρτηση του χρόνου $t/\bar{t}$, για ροή σε εκβολέα, εμβολική ροή, ισοθερμοκρασιακή ροή σε σωλήνα, και ροή σε συνεχώς αναδευόμενο δοχείο.

Συναρτήσεις κατανομής της παραμόρφωσης

Οι συνιστώσες του ρυθμού παραμόρφωσης $\dot{\gamma}_{yx}(\xi)$ και $\dot{\gamma}_{yz}(\xi)$ μπορούν να υπολογισθούν από το προφίλ των ταχυτήτων που δίνεται από τις εξισώσεις [2.76] και [2.88]:

$$\dot{\gamma}_{yx}(\xi) = \frac{U_x}{H} \frac{du_x}{d\xi} = \frac{2U_b \sin \phi}{H} (1-3\xi) \quad [2.106]$$

και

$$\dot{\gamma}_{yz}(\xi) = \frac{U_z}{H} \frac{du_z}{d\xi} = \frac{U_b \cos \phi}{H} \left[1 + 3(1-2\xi) \frac{Q_p}{Q_d} \right] \quad [2.107]$$

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, αυτές είναι οι μοναδικές συνιστώσες του τανυστή του ρυθμού παραμόρφωσης. Επομένως μπορούμε να γράψουμε μια έκφραση για το μέγεθος του τανυστή του ρυθμού παραμόρφωσης:

$$\dot{\gamma}(\xi) = (\dot{\gamma}_{yx}^2 + \dot{\gamma}_{yz}^2)^{1/2} = \frac{U_b}{H} R\left(\xi, \theta, \frac{Q_p}{Q_d}\right) \quad [2.108]$$

όπου

$$R\left(\xi, \theta, \frac{Q_p}{Q_d}\right) = \left\{ 4(1-3\xi)^2 \sin^2 \theta + \left[1 + 3(1-2\xi) \frac{Q_p}{Q_d} \right] \cos^2 \theta \right\}^{1/2} \quad [2.109]$$

Μια αντίστοιχη έκφραση για το $\dot{\gamma}(\xi_c)$ λαμβάνεται με αντικατάσταση όπου ξ το ξ_c στις εξισώσεις [2.108] και [2.109]. Η φορά της διάτμησης ενός σωματιδίου του ρευστού διαφέρει στις θέσεις ξ και ξ_c . Το γεγονός αυτό δημιουργεί δυσκολίες στον προσδιορισμό της συνολικής παραμόρφωσης που εξασκείται στο σωματίδιο του ρευστού που κινείται μεταξύ των θέσεων ξ και ξ_c . Για την επίλυση του προβλήματος αυτού απαιτείται να ακολουθηθεί η πραγματική τρισδιάστατη πορεία της ροής ενός ρευστού σωματιδίου. Σε μια πρώτη προσέγγιση θεωρούμε ότι η συνολικά απαιτούμενη παραμόρφωση στο πάνω και στο κάτω μέρος της αύλακας είναι αθροιστική. Επομένως η συνολική παραμόρφωση που αποκτά το σωματίδιο του ρευστού μετά από χρόνο t είναι:

$$\gamma(\xi) = \dot{\gamma}(\xi)t_f(\xi)t(\xi) + \dot{\gamma}(\xi_c)[1-t_f(\xi)]t(\xi) \quad [2.110]$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση [2.97] και [2.108] στην εξίσωση [2.110] λαμβάνεται:

$$\gamma(\xi) = \frac{1}{3H} \left(\frac{1}{1+Q_p/Q_d} \right) \left[E_1\left(\xi, \theta, \frac{Q_p}{Q_d}\right) + E_2\left(\xi, \theta, \frac{Q_p}{Q_d}\right) \right] \quad [2.111]$$

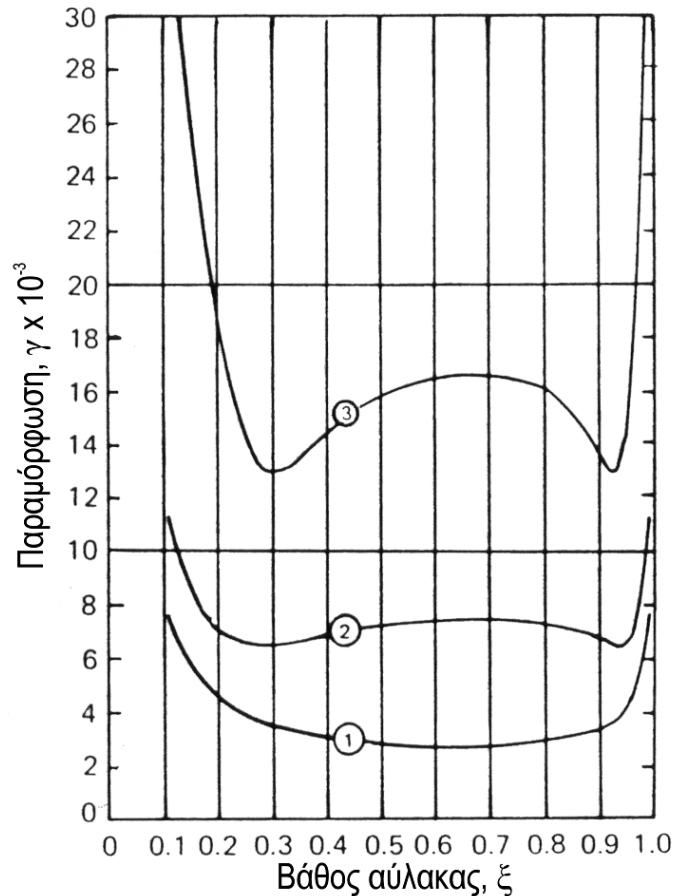
όπου

$$E_1\left(\xi, \theta, \frac{Q_p}{Q_d}\right) = \frac{2}{\cos \phi} \frac{t_f(\xi) \left[(1-3\xi)^2 + \frac{\cot^2 \phi}{4} \left(1 + 3 \frac{Q_p}{Q_d} - 6\xi \frac{Q_p}{Q_d} \right)^2 \right]^{1/2}}{\xi_c(1-\xi_c) + [t_f(\xi)](\xi - \xi_c)(1-\xi - \xi_c)} \quad [2.112]$$

και

$$E_2(\xi, \theta, \frac{Q_p}{Q_d}) = \frac{1}{\sin \phi} \frac{[1 - t_f(\xi)] \left[4(1 - 3\xi_c)^2 \tan^2 \phi + \left(1 + 3\frac{Q_p}{Q_d} - 6\xi_c \frac{Q_p}{Q_d} \right)^2 \right]^{1/2}}{\xi_c(1 - \xi_c) + [t_f(\xi)](\xi - \xi_c)(1 - \xi - \xi_c)} \quad [2.113]$$

Στο Σχήμα 2.42 παρουσιάζεται η κατανομή της συνολικής παραμόρφωσης ως συνάρτηση της θέσης ξ , για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις του λόγου των ογκομετρικών παροχών Q_p/Q_d .

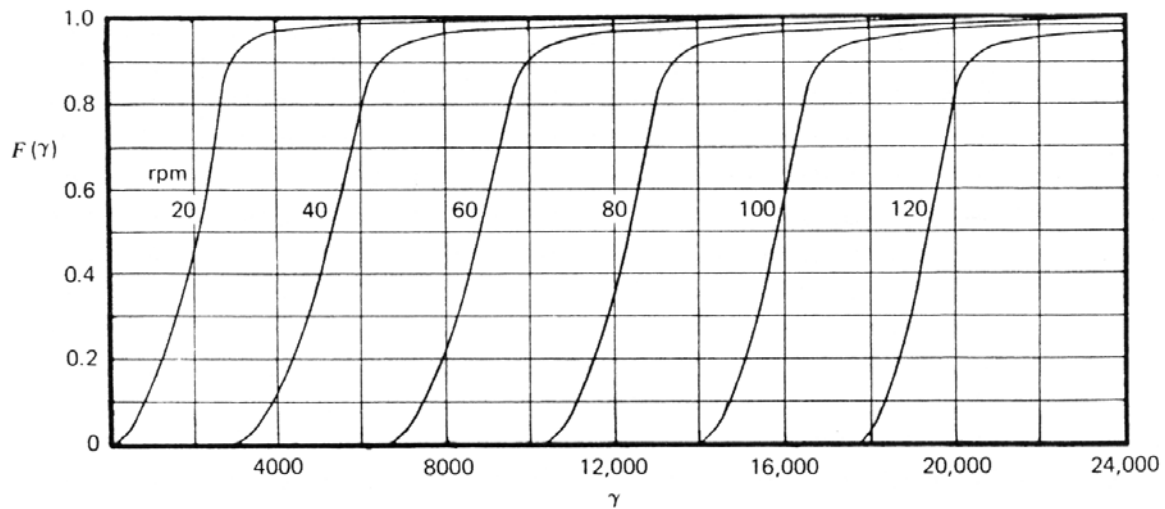


Σχήμα 2.42: Η συνολική παραμόρφωση ως συνάρτηση της θέσης ξ στην αύλακα του κοχλία, για ① $Q_p/Q_d=0$, ② $Q_p/Q_d=-0.5$, ③ $Q_p/Q_d=-0.75$. Οι υπολογισμοί έγιναν για αξονικό μήκος 2.5m, βάθος αύλακας 0.5 cm, και γωνία έλικας 20°.

Παρατηρείται ότι για καθαρά εμβολική ροή η ελάχιστη παραμόρφωση συμβαίνει στη θέση $\xi=2/3$, αλλά όταν αρχίζει να αναπτύσσεται ροή πίεσης ($Q_p/Q_d < 0$) η ελάχιστη παραμόρφωση λαμβάνεται σε άλλη θέση. Όπως και στην περίπτωση των χρόνων παραμονής, η διατμητική τάση είναι ομοιόμορφη για σχετικά μεγάλο εύρος τιμών ξ .

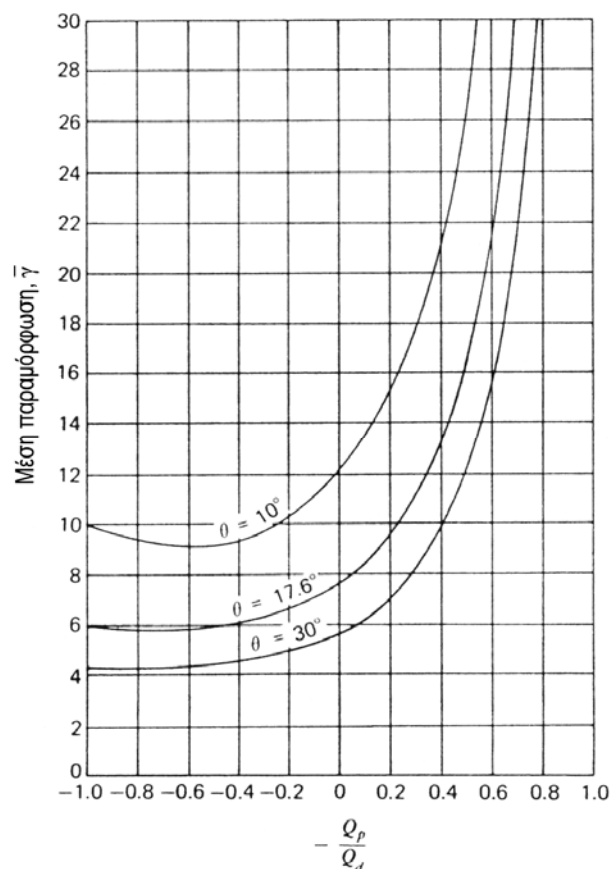
Στο Σχήμα 2.43 παρουσιάζεται η αθροιστική συνάρτηση κατανομής των παραμορφώσεων $F(\gamma)$, για διάφορες ταχύτητες περιστροφής του κοχλία. Παρατηρείται ότι η κατανομή είναι σχετικά στενή. Αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του κοχλία για σταθερή ογκομετρική παροχή οδηγεί σε αύξηση της ροής λόγω

πίεσης, γεγονός που συνοδεύεται από μετατόπιση της συνάρτησης κατανομής της παραμόρφωσης σε υψηλότερες τιμές.



Σχήμα 2.43: Η αθροιστική συνάρτηση $F(\gamma)$ για διάφορες ταχύτητες περιστροφής του κοχλίου, σε εκβολέα διαμέτρου 15 cm, λόγου $L/D=20:1$, σταθερής ογκομετρικής παροχής (250Kgr/hr), σταθερού βάθους αύλακας 1.5 cm.

Στο Σχήμα 2.44 δίνεται ένα γενικευμένο διάγραμμα της μέσης παραμόρφωσης $\bar{\gamma}$ ως συνάρτηση του λόγου Q_p/Q_d και της γωνίας της έλικας ϕ . Όταν $Q_p/Q_d=-1$, η γ τείνει στο άπειρο και αυτή η συνθήκη αντιστοιχεί στην περίπτωση κλειστής εξόδου.

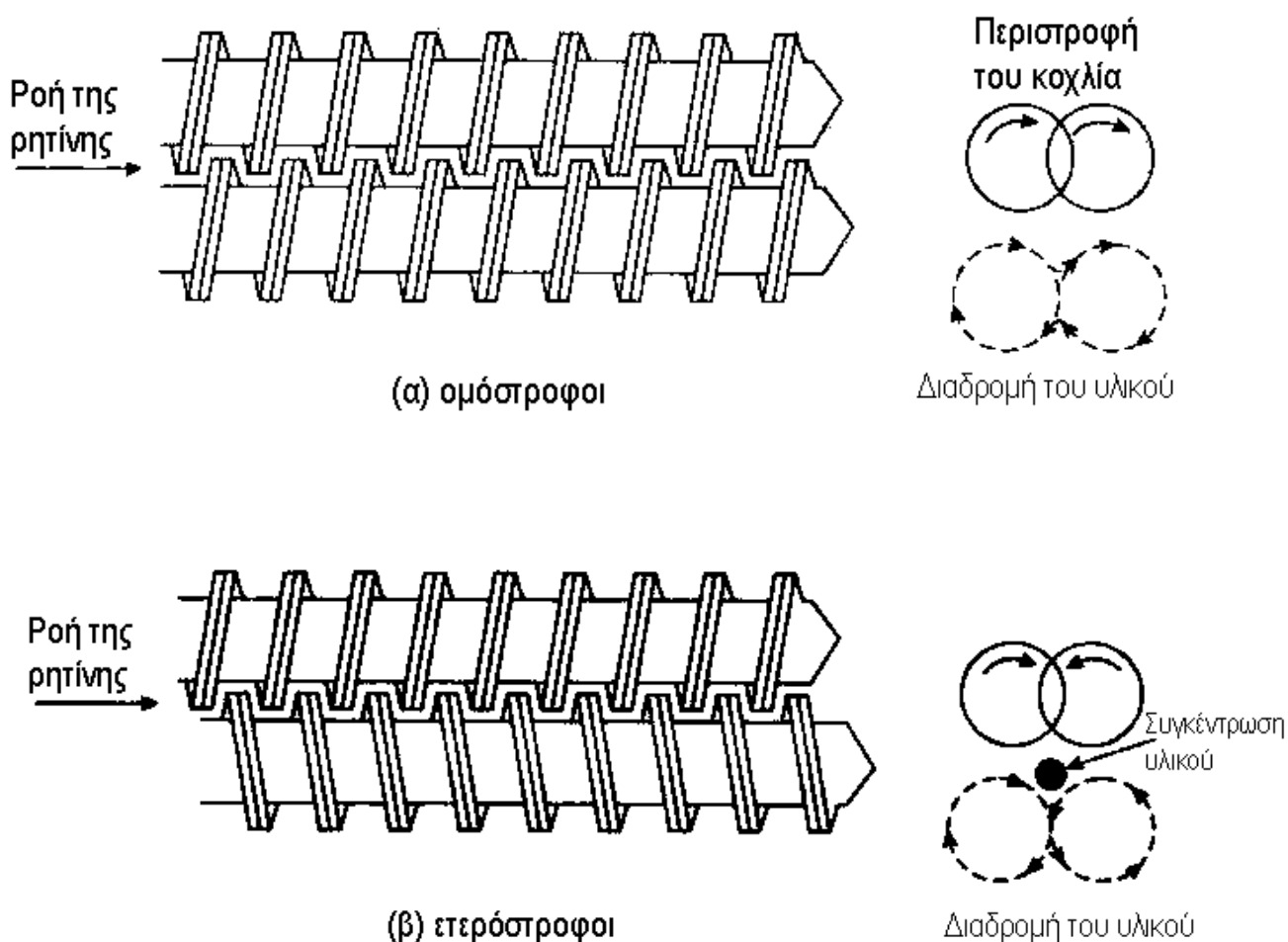


Σχήμα 2.44: Η μέση παραμόρφωση $\bar{\gamma}$ ως συνάρτηση του λόγου Q_p/Q_d για διάφορες τιμές της γωνίας ελίκωσης και για $\ell/H=-1$. Όταν $Q_p/Q_d=-1$, η γ τείνει στο άπειρο, συνθήκη που αντιστοιχεί σε λειτουργία κλειστής ροής.

2.7 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΚΒΟΛΗΣ ΔΥΟ ΚΟΧΛΙΩΝ

Ένα σύστημα εκβολής μπορεί να έχει περισσότερους από έναν κοχλίες. Η πιο συνηθέστερη περίπτωση είναι αυτή των *εκβολέων δίδυμου κοχλίου* (twin screw extruder) όπου οι δύο παράλληλοι κοχλίες περιστρέφονται μέσα σε κατάλληλα σχεδιασμένο κύλινδρο.

Ανάλογα με το αν οι κοχλίες περιστρέφονται κατά την ίδια ή αντίθετη φορά οι διπλοκόχλιοι εκβολείς διακρίνονται σε ομόστροφους (co-rotating) και σε ετερόστροφους (counter-rotating) αντίστοιχα.



Σχήμα 2.45: (α) Ομόστροφοι και (β) ετερόστροφοι δίδυμοι κοχλίες.

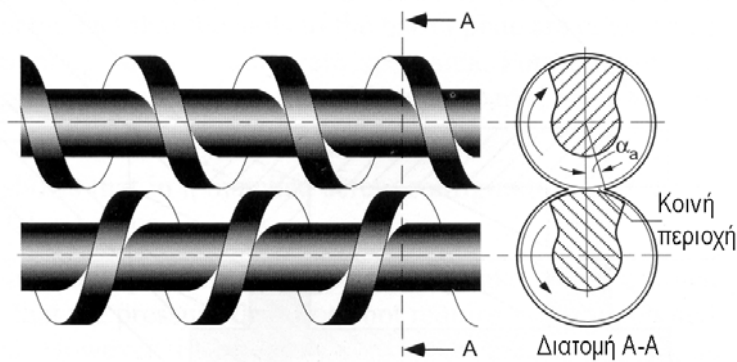
Στους *ομόστροφους* κοχλίες το υλικό μεταφέρεται από τον ένα κοχλίο στον άλλο. Στους *ετερόστροφους* κοχλίες το πολυμερές οδηγείται στο σημείο συνάντησης των δύο κοχλίων όπου δημιουργείται μια συσσώρευση υλικού, το οποίο μεταφέρεται κατά μήκος του κοχλίου προς την έξοδο (Σχήμα 2.45).

Αν οι σπείρες του ενός κοχλία εφάπτονται με τις σπείρες του άλλου κοχλία έχουμε τους *εφαπτόμενους* (non-intermeshing) κοχλίες (Σχήμα 2.46).

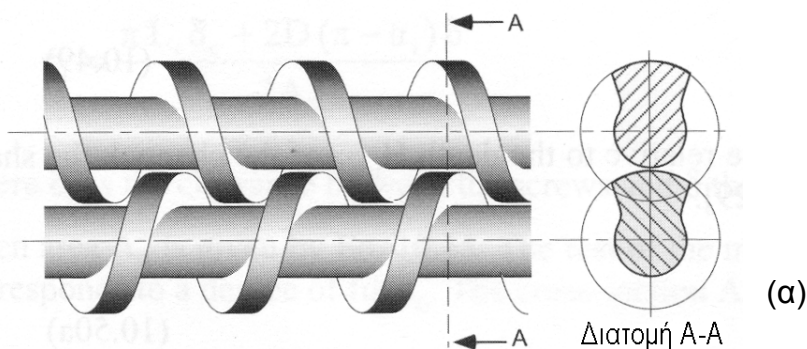
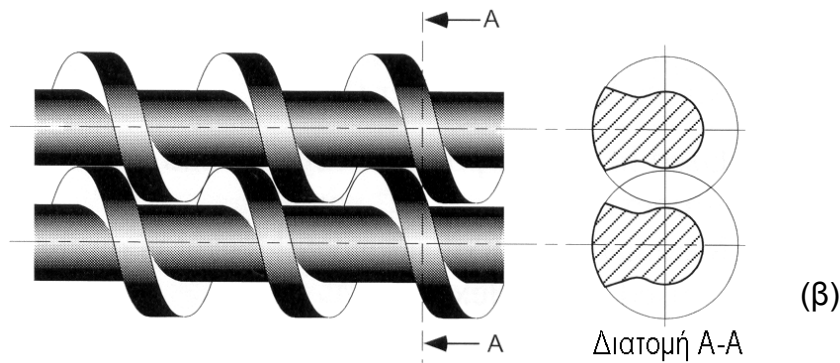
Όταν οι σπείρες του ενός κοχλία εισχωρούν στην εκγλυφή του άλλου κοχλία έχουμε τους *συμπλεκόμενους* (intermeshing) κοχλίες (Σχήμα 2.47).

Στην περίπτωση των συμπλεκόμενων κοχλιών υπάρχει η ακόλουθη διάκριση:

- η σπείρα να εισχωρεί και να καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της εκγλυφής οπότε οι κοχλίες καλούνται *συζευκτοί* (conjugated) και
- η σπείρα να καλύπτει ένα μέρος της εκγλυφής οπότε οι κοχλίες καλούνται *ασύζευκτοι* (non-conjugated)



Σχήμα 2.46: Εφαπτόμενοι ετερόστροφοι δίδυμοι εκβολείς



Σχήμα 2.47: Συμπλεκόμενοι (α) ετερόστροφοι και (β) ομόστροφοι, δίδυμοι εκβολείς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1. Tadmor Z, and Gogos C.G., “Principles of Polymer Processing”, SPE Monographs, Wiley-Interscience, New York (1979).
2. Παναγιώτου Κ., “Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών”, ΠΗΓΑΣΟΣ Θεσσαλονίκη (2001).
3. Μητσούλης Ευάγγ., “Βασικές Αρχές Μορφοποίησης Πολυμερών”, ΕΜΠ (1999)
4. Ανδρεόπουλος Α.Γ., “Επεξεργασία Πολυμερών & Σχεδιασμός Προϊόντων”, ΕΜΠ (2004).
5. Vlachopoulos J., “Introduction to Plastics Processing”, McMaster Univ. Ontario Canada (2001).
6. Fried J.R., “Polymer Science and Technology”, Prentice Hall PTR, New Jersey (1995).
7. Rauwendall Chr., “Polymer Extrusion”, Hanser Publ. 4th ed. (2001).
8. Bikales N.M., “Extrusion and other Plastics Operations”, Wiley Interscience (1971).
9. Strong A.B., “Plastics: Materials and Processing”, Prentice Hall, 2nd ed. (2000).
10. Osswald T.A., “Polymer Processing: Fundamentals” Hanser Publ. (1998).

3. Έγχυση

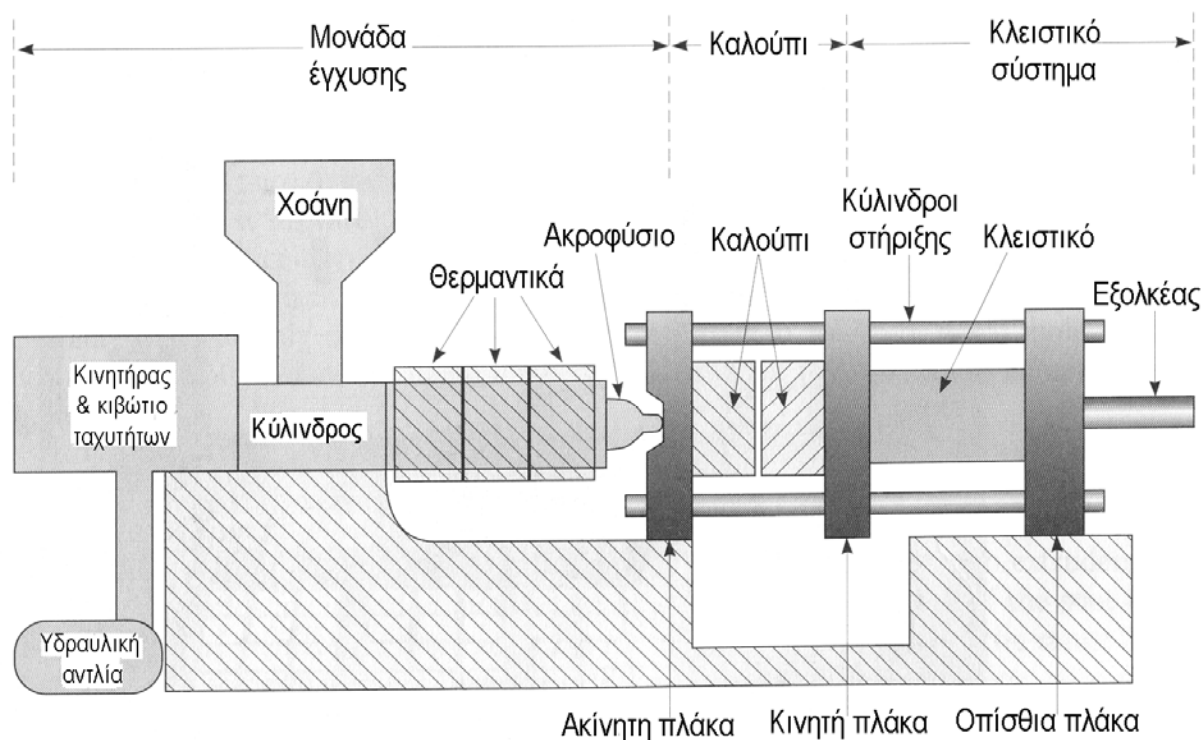
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αντίθεση με τη διαδικασία μορφοποίησης με εκβολή με την οποία παίρνουμε αντικείμενα συνεχούς μορφής με σταθερή διατομή, η διαδικασία μορφοποίησης με έγχυση χρησιμοποιείται για την παραγωγή διακριτών αντικειμένων με πολύπλοκο σχήμα και με εξωτερική επιφάνεια που χαρακτηρίζεται από ποικιλία στην υφή της.

Θερμοπλαστικά και θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή, σε μεγάλη ποικιλία σχημάτων μορφοποιούνται με έγχυση. Σήμερα, υπολογίζεται ότι τα ένα τρίτο των θερμοπλαστικών μορφοποιούνται με αυτή την τεχνική, και περισσότερο από το μισό του εξοπλισμού της βιομηχανίας μορφοποίησης πολυμερών αποτελείται από μηχανές έγχυσης.

Ένας λόγος που κάνει αυτή την τεχνική δημοφιλή είναι ότι τα αντικείμενα που παράγονται χαρακτηρίζονται από πολύ καλή επαναλλειψιμότητα, καθώς επίσης και το γεγονός ότι αποτελεί μια πλήρως αυτοματοποιημένη διεργασία με υψηλή απόδοση σε χαμηλό κόστος.

Τα μειονεκτήματα της τεχνικής αυτής είναι το υψηλό κόστος κατασκευής των καλουπιών καθώς και το υψηλό ποσοστό των υπολειμμάτων της μορφοποίησης (scrap).



Σχήμα 3.1: Μηχανή μορφοποίησης με έγχυση, όπου φαίνονται τα τρία βασικά τμήματα του εξοπλισμού.

3.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΓΧΥΣΗΣ

Ο εξοπλισμός μιας μονάδας έγχυσης περιλαμβάνει τρεις κύριες λειτουργίες, οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1:

- i) τη μονάδα έγχυσης
- ii) το καλούπι μορφοποίησης
- iii) το κλειστικό σύστημα

3.2.1 Μονάδα έγχυσης

Ο ρόλος της μονάδας έγχυσης είναι να μετατρέψει το στερεό πολυμερές σε τήγμα, και στη συνέχεια να γίνει η έγχυση στο καλούπι. Η πολυμερική ρητίνη, σε μορφή πελλετών ή σκόνης, τροφοδοτείται στη μηχανή έγχυσης μέσω της χοάνης τροφοδοσίας. Από διαφορετικές χοάνες μπορούν να τροφοδοτηθούν ταυτόχρονα μέσα ενίσχυσης, χρώματα και άλλα πρόσθετα. Στην περίπτωση αυτή η μηχανή έγχυσης λειτουργεί και ως εξοπλισμός ανάμειξης. Λόγω όμως του περιορισμένου μεγέθους (μικρό μήκος του κυλίνδρου πλαστικοποίησης) των περισσότερων μηχανών έγχυσης, η ικανότητα ανάμειξης είναι περιορισμένη. Για το λόγο αυτό πληρωτικά υλικά και άλλα πρόσθετα γίνονται μίγμα σε ξεχωριστή διαδικασία με τη χρήση εκβολέα ανάμειξης.

Δύο είναι τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την τήξη και την έγχυση της ρητίνης σε μονάδες έγχυσης. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη είναι η μηχανή *τύπου παλινδρομούντος κοχλία* (reciprocating screw). Ο άλλος τύπος είναι η μηχανή έγχυσης *τύπου εμβόλου* (ram ή plunger).

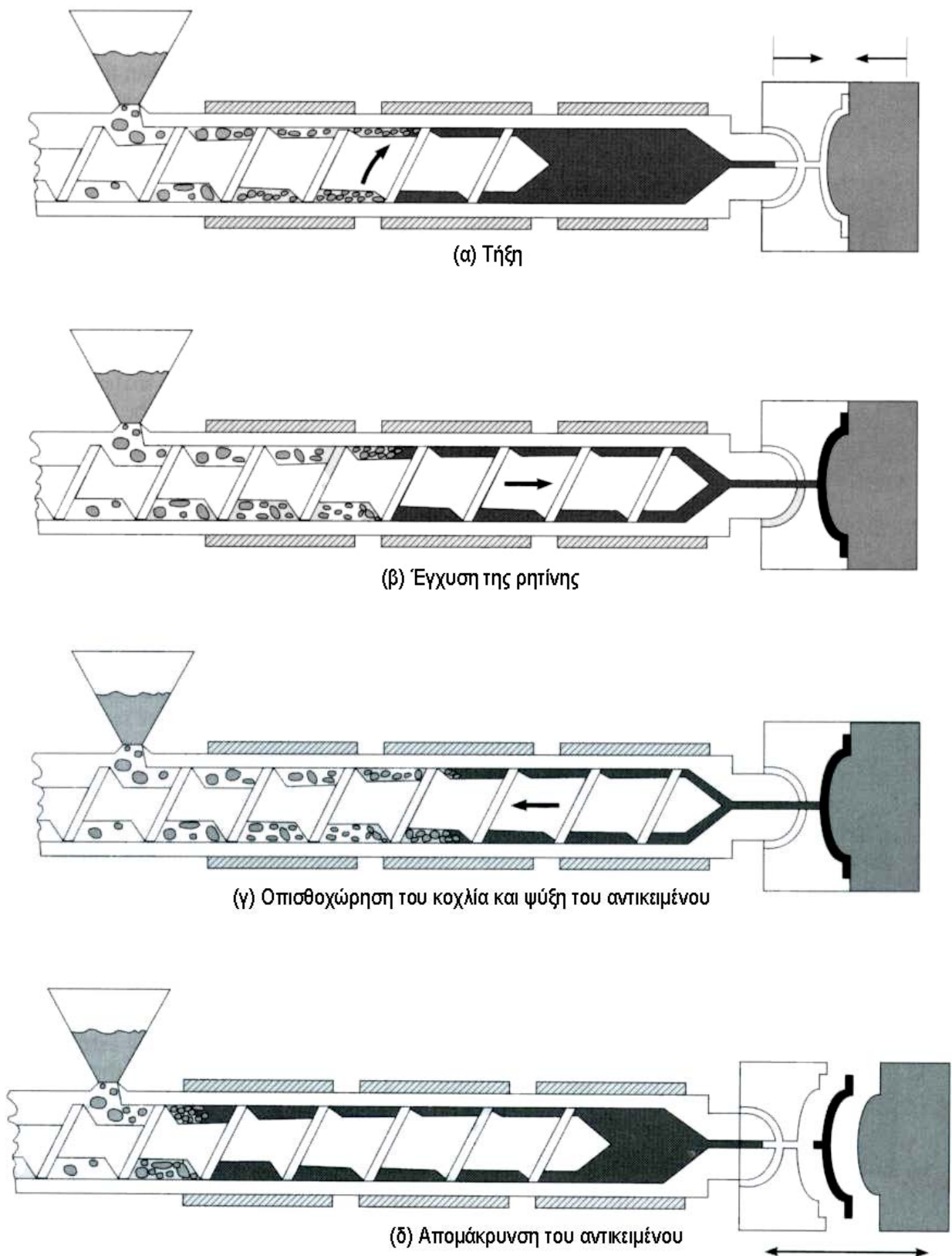
i. Μηχανή έγχυσης τύπου παλινδρομούντος κοχλία

Ο σχεδιασμός του κοχλία είναι παρόμοιος με αυτόν του κοχλία ενός συστήματος εκβολής. Υπάρχουν οι τρεις ζώνες: τροφοδοσίας, συμπίεσης/τήξης και δοσιμετρίας. Σε μια μηχανή έγχυσης μορφοποιούνται διαφορετικοί τύποι πολυμερών, για το λόγο αυτό οι κοχλίες δεν είναι εξειδικευμένοι για συγκεκριμένο τύπο υλικού αλλά είναι *ενρείας χρήσης* (general purpose screws).

Οι κοχλίες των μηχανών έγχυσης είναι μικρότερου μήκους από αυτούς των εκβολέων. Τυπικές τιμές του λόγου L/D είναι από 12:1 έως 20:1. Οι τιμές αυτές υποδηλώνουν ότι η ικανότητα ανάμειξης των μηχανών έγχυσης είναι πολύ περιορισμένη σε σύγκριση με τους τυπικούς εκβολείς.

Το πρώτο βήμα του κύκλου μορφοποίησης (Σχήμα 3.2α) μιας μηχανής έγχυσης παλινδρομούντος κοχλία είναι η περιστροφή του κοχλία ώστε να λιώσει η ρητίνη. Η ρητίνη γίνεται τήγμα από μηχανική διάτμηση και από θερμική ενέργεια που προέρχεται από τα θερμαντικά στοιχεία του κυλίνδρου. Το τήγμα του πολυμερούς μεταφέρεται και συλλέγεται στο χώρο μέσα στον κύλινδρο που βρίσκεται μπροστά

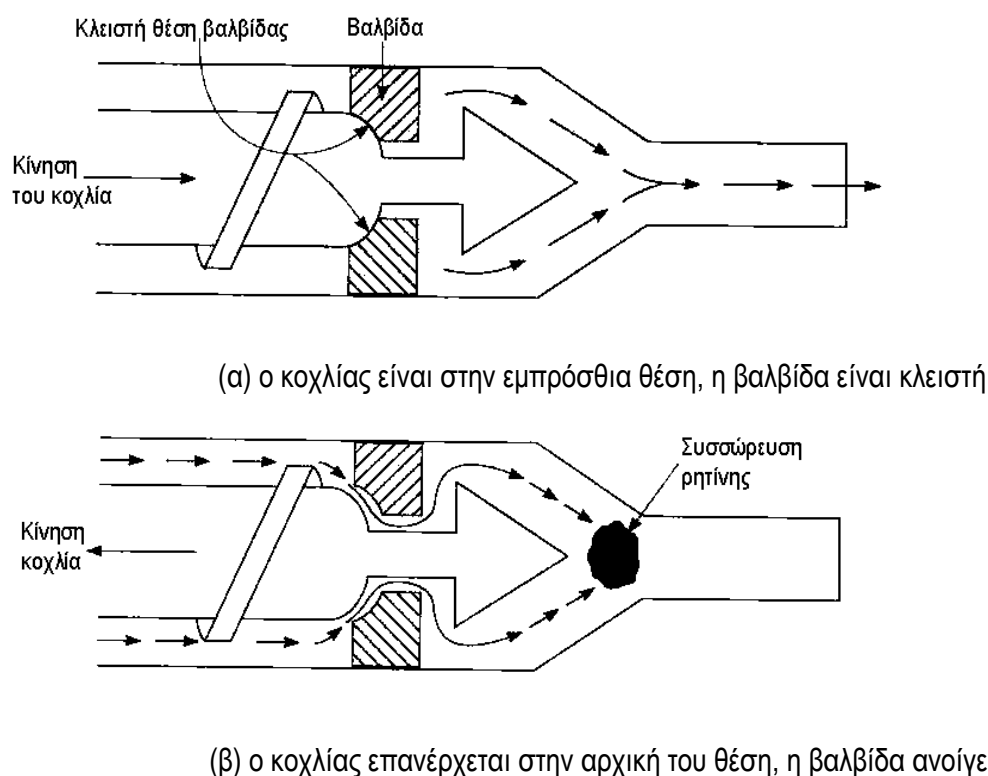
από τον κοχλία όπου δημιουργείται μια δεξαμενή τήγματος. Κατά το βήμα αυτό το καλούπι είναι κλειστό.



Σχήμα 3.2: Ο κύκλος έγχυσης μηχανής τύπου παλινδρομούντος κοχλία.

Όταν έχει τακεί η απαραίτητη για την έγχυση ποσότητα πολυμερούς (Σχήμα 3.2β), ο κοχλίας σταματά να περιστρέφεται, μετακινείται προς τα εμπρός, και λειτουργώντας σαν έμβολο ωθεί τη ρητίνη προς την έξοδο του κυλίνδρου ώστε να εγχυθεί στο καλούπι.

Για να διασφαλισθεί ότι η ρητίνη δεν ρέει προς τα πίσω, υπάρχουν *βαλβίδες ελέγχου της ροής* στο άκρο του κοχλία (Σχήμα 3.3). Ο κοχλίας μένει στην εμπρόσθια θέση και διατηρεί την πίεση μέχρις ότου το πολυμερές αρχίσει να στερεοποιείται στο καλούπι. Όταν ο κοχλίας οπισθοχωρεί στην αρχική του θέση, η βαλβίδα ανοίγει και επιτρέπει στη ρητίνη να ξαναγεμίσει το χώρο που υπάρχει εμπρός από τον κοχλία.



Σχήμα 3.3: Βαλβίδα ελέγχου ροής: όταν ο κοχλίας ωθεί το τήγμα προς το καλούπι αποτρέπει τη ροή του ρευστού προς τα πίσω.

Μια σημαντική παράμετρος που δείχνει το μέγεθος μιας μηχανής έγχυσης είναι το βάρος της ρητίνης που μπορεί να εγχυθεί (shot size). Επειδή το βάρος εξαρτάται από την πυκνότητα του πολυμερούς, ως ουσία αναφοράς για την ταξινόμηση των μηχανών χρησιμοποιείται το πολυστυρένιο.

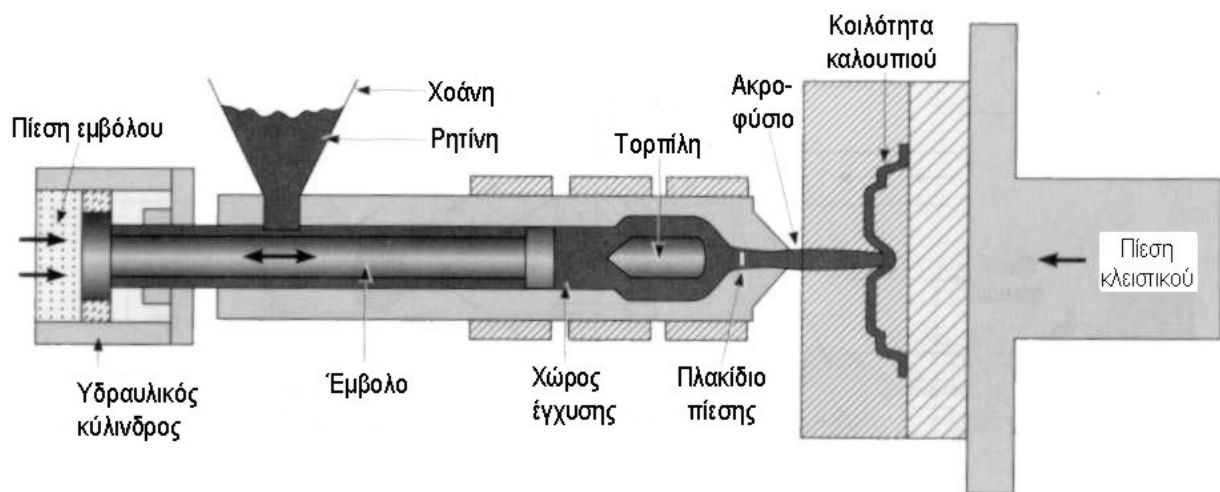
Κατά τη διάρκεια του κύκλου μορφοποίησης με έγχυση, η ρητίνη μεταφέρεται στο καλούπι μέσα από το *ακροφύσιο* (nozzle) το οποίο προσαρμόζεται στο καλούπι μέσω του *διαύλου* (sprue).

Το τρίτο (Σχήμα 3.2γ) και τέταρτο στάδιο (Σχήμα 3.2δ) του κύκλου έγχυσης, αποτελούν η οπισθοχώρηση του κοχλία ώστε να δημιουργηθεί ο απαραίτητος χώρος στο άκρο του για να γεμίσει με τήγμα, και η συνέχιση της ψύξης του αντικείμενου στο καλούπι. Ενώ το αντικείμενο ψύχεται ο κοχλίας περιστρέφεται και τήκεται το πολυμερές για την επόμενη έγχυση. Μόλις ολοκληρωθεί η ψύξη το καλούπι ανοίγει, απομακρύνεται το αντικείμενο, κλείνει και ο κύκλος της έγχυσης επαναλαμβάνεται.

ii. Μηχανή έγχυσης τύπου εμβόλου

Ένα άλλο είδος μηχανής έγχυσης είναι η *τύπου εμβόλου* (ram injection). Στη μηχανή αυτή μια προκαθορισμένη ποσότητα πολυμερούς εισέρχεται στον κύλινδρο μέσω της χοάνης τροφοδοσίας. Το έμβολο ενεργοποιείται με υδραυλική πίεση και ωθεί το υλικό κατά μήκος του κυλίνδρου, όπου θερμαίνεται και τήκεται υπό πίεση προκειμένου να εγχυθεί στο καλούπι. Για να διευκολυνθεί η τήξη υπολειμμάτων άτηκτης ρητίνης, η ρητίνη ωθείται ώστε να περάσει από το λεπτό διάκενο μεταξύ διανομέα τύπου τορπίλης και κυλίνδρου. Στη συνέχεια το τήγμα υπό την πίεση του εμβόλου διέρχεται μέσω του ακροφυσίου και εγχύεται στο καλούπι.

Οι μηχανές έγχυσης τύπου εμβόλου αναπτύχθηκαν πρώτα από τις μηχανές παλινδρομούντος κοχλία και γενικά έχουν μικρότερο κόστος εξοπλισμού.



Σχήμα 3.4: Μηχανή έγχυσης τύπου εμβόλου.

Συγκρίνοντας τα δύο συστήματα, τα πλεονεκτήματα της μηχανής τύπου παλινδρομούντος κοχλία είναι τα ακόλουθα:

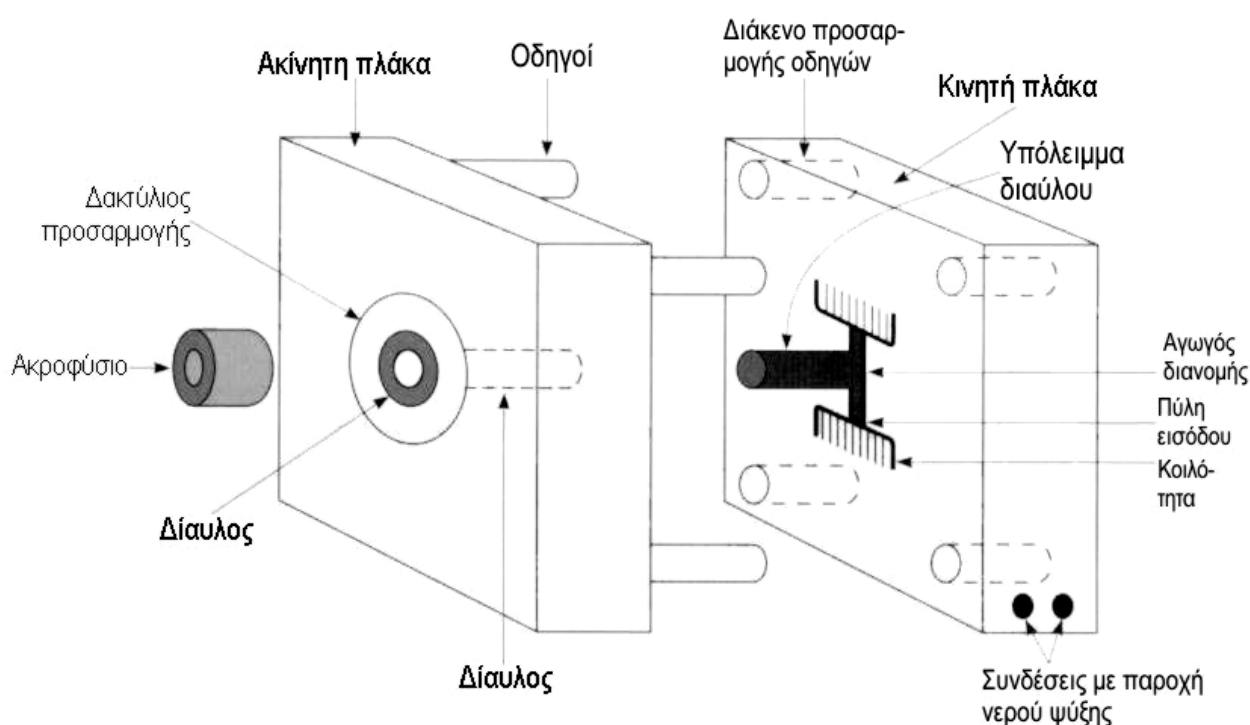
- ποιο ομοιόμορφη τήξη
- αποτελεσματικότερη ανάμειξη και διασπορά των προσθέτων στη ρητίνη
- χαμηλότερες πιέσεις έγχυσης
- λιγότερες εσωτερικές τάσεις στα μορφοποιημένα αντικείμενα
- συντομότερους κύκλους μορφοποίησης
- μεγαλύτερο εύρος στην ποσότητα έγχυσης σε σχέση με τη δυναμικότητα έγχυσης

3.2.2 Καλούπι μορφοποίησης

Το καλούπι μορφοποίησης (Σχήμα 3.5) αποτελείται από δύο βασικά μέρη, το κινητό και το ακίνητο, πάνω στα οποία είναι αποτυπωμένη η μορφή του προς μορφοποίηση αντικειμένου ως μια *κοιλότητα* (cavity). Τα μέρη αυτά είναι στερεωμένα πάνω στην κινητή και ακίνητη πλάκα αντίστοιχα, της μηχανής έγχυσης. Το μέγεθος του καλουπιού δεν πρέπει να έχει μεγαλύτερη επιφάνεια από αυτή που επιτρέπουν οι ράβδοι στήριξης της μηχανής.

Η σύνδεση της μονάδας έγχυσης με το καλούπι γίνεται μέσω του *ακροφυσίου* (nozzle) το οποίο βρίσκεται στο τέλος της μονάδας έγχυσης, και εισχωρεί μέσω οπής στην ακίνητη πλάκα του καλουπιού. Η κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού και το ακροφύσιο επικοινωνούν μέσω του *διαύλου* (sprue). Ο διάυλος έχει συνήθως μορφή κόλουρου κώνου με τη μεγαλύτερη βάση προς το μέρος του καλουπιού.

Προσοχή πρέπει να δίνεται κατά την τοποθέτηση του καλουπιού, ώστε να υπάρχει πλήρης ευθυγράμμιση μεταξύ του ακροφυσίου και του διαύλου. Στην ευθυγράμμιση αυτή βοηθά ο δακτύλιος προσαρμογής. Από το διάυλο το τήγμα διοχετεύεται μέσω των *αγωγών διανομής* (runners) στις κοιλότητες. Το ακροφύσιο θερμαίνεται από τον κύλινδρο και αποτελεί το σημείο από όπου το τήγμα διαχωρίζεται από το στερεοποιημένο πολυμερές στο διάυλο, λόγω της ψύξης του καλουπιού.



Σχήμα 3.5: Σχηματικό διάγραμμα καλουπιού δύο τμημάτων.

Η ψύξη του καλουπιού γίνεται με κυκλοφορία ψυχρού μέσου, συνήθως νερού, μέσα από ειδικά κανάλια. Το περίγραμμα των καναλιών αυτών είναι πολύ σημαντικό γιατί προσδιορίζει τον τρόπο ψύξης και κατά συνέπεια τη θερμική συστολή και το ρυθμό κρυστάλλωσης του μορφοποιημένου αντικειμένου.

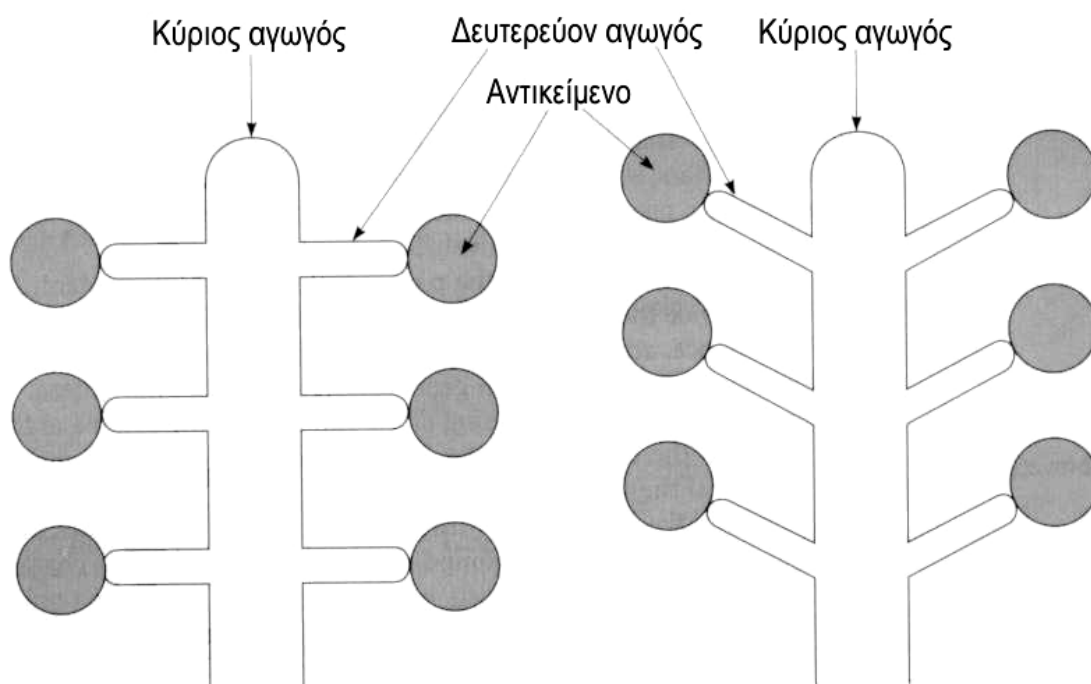
Αγωγοί διανομής

Οι αγωγοί διανομής αποτελούν το σύστημα μεταφοράς του τήγματος από το δίαυλο στις κοιλότητες μορφοποίησης. Ψύξη λαμβάνει χώρα κατά μήκος των αγωγών διανομής, επομένως πρέπει να έχουν το απαραίτητο μέγεθος ώστε να διασφαλίζεται η ροή της ρητίνης για να γεμίσουν πλήρως οι κοιλότητες μορφοποίησης.

Τα χαρακτηριστικά ροής του τήγματος (ιξώδες, αντοχή τήγματος κλπ), η θερμοκρασία και άλλα στοιχεία όπως οι απαιτήσεις για διαστατική ακρίβεια και ομοιομορφία του αντικειμένου, αποτελούν σημαντικές παραμέτρους που προσδιορίζουν τη διάμετρο και το μήκος των αγωγών διανομής. Αν η διάμετρος του αγωγού είναι πολύ μικρή και το μήκος του πολύ μεγάλο, υπάρχει περίπτωση η ρητίνη να στερεοποιηθεί πριν γεμίσει πλήρως η κοιλότητα μορφοποίησης. Αν το σύστημα των αγωγών έγχυσης έχει μεγάλες διαστάσεις, τότε για τη μορφοποίηση ενός αντικειμένου απαιτείται να εγχυθεί μεγάλη ποσότητα τήγματος και επομένως έχουμε σημαντικές ποσότητες πλαστικών απορριμμάτων.

Η βέλτιστη ροή της ρητίνης μέσα από τους αγωγούς διανομής εξαρτάται από το σχήμα και από τις διαστάσεις τους. Αγωγοί κυκλικής διατομής δίνουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά ροής αλλά είναι δύσκολο να κατασκευασθούν και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως τραπεζοειδή σχήματα.

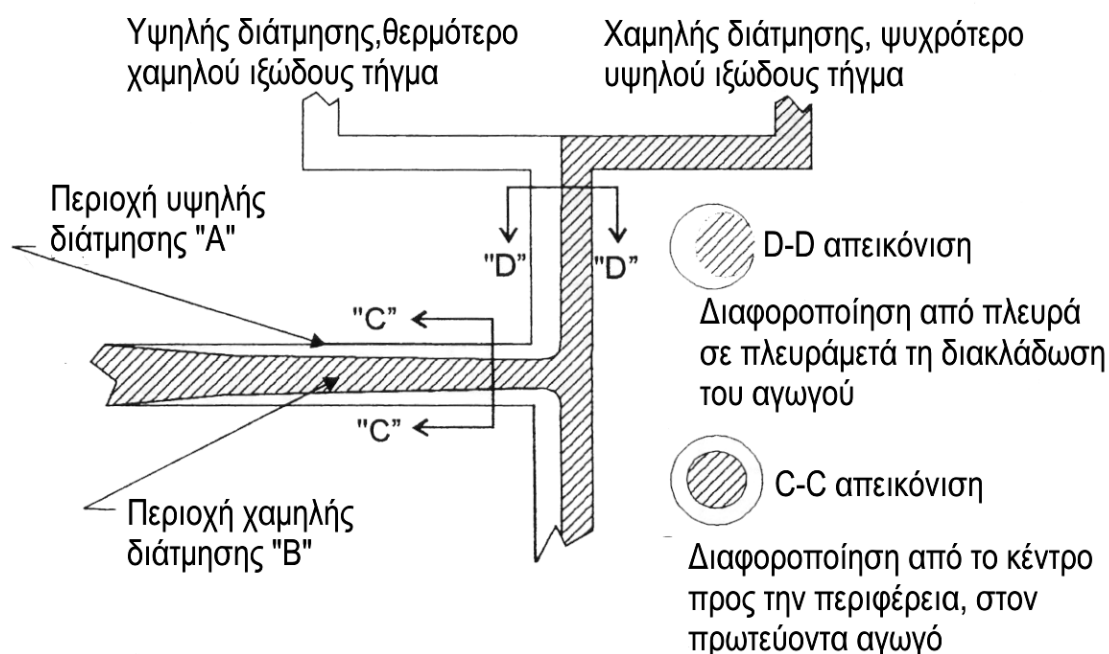
Όταν εκτός από τον κύριο αγωγό υπάρχουν και δευτερεύοντες αγωγοί διανομής, η ροή στους δευτερεύοντες αγωγούς θα πρέπει να γίνεται υπό γωνία στην κατεύθυνση ροής (Σχήμα 3.6), ώστε να ελαχιστοποιούνται οι διατμητικές τάσεις που ασκούνται στο πολυμερικό τήγμα.



Σχήμα 3.6: Σχηματική παράσταση δευτερευόντων αγωγών έγχυσης, απλών και υπό γωνία.

Ασυμμετρίες κατά τη ροή μέσα στις κοιλότητες μορφοποίησης απαντώνται συχνά όταν υπάρχουν περισσότερες από δύο διακλαδώσεις σε ένα σύστημα αγωγών διανομής. Καθώς το πολυμερές ρέει κατά μήκος του κύριου αγωγού, αναπτύσσεται περιοχή υψηλών διατμητικών τάσεων στην εξωτερική περιφέρεια της ροής του τήγματος. Όταν το ρεύμα του τήγματος διαμοιράζεται στη διακλάδωση του αγωγού, τα εξωτερικά στρώματα των υψηλών διατμητικών τάσεων του κύριου αγωγού θα προχωρήσουν κατά μήκος του αριστερού τοιχώματος του αριστερού κλάδου του δευτερεύοντος αγωγού έγχυσης. Το κεντρικό στρώμα των χαμηλών διατμητικών τάσεων από τον κύριο αγωγό, θα προχωρήσει στην αντίθετη πλευρά του αριστερού κλάδου του δευτερεύοντος αγωγού. Κατά τον ίδιο τρόπο τα εξωτερικά στρώματα των υψηλών διατμητικών τάσεων του κύριου αγωγού θα προχωρήσουν στη δεξιά πλευρά του δεξιού κλάδου του δευτερεύοντος αγωγού, ενώ το στρώμα των χαμηλών τάσεων του κέντρου θα προχωρήσει προς την αντίθετη αριστερή πλευρά.

Αν το τήγμα υποστεί μια ακόμη υποδιαίρεση μέσα από τριτεύον σύστημα αγωγών, το ρευστό των υψηλών τάσεων από το δευτερεύον σύστημα θα ακολουθήσει τη διακλάδωση προς την εσωτερική πλευρά του καλουπιού, ενώ το ρεύμα των χαμηλών τάσεων θα ακολουθήσει τον αγωγό της εξωτερικής πλευράς.



Σχήμα 3.7: Εγκάρσια απεικόνιση των περιοχών υψηλής και χαμηλής διάτμησης.

Αποτέλεσμα αυτής της κατανομής είναι ότι το τήγμα που βρίσκεται σε αυτούς τους αγωγούς έχει διαφορετικό ιξώδες, θερμοκρασία και ρυθμό ροής, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ελλιπή πλήρωση σε κάποιες από τις κοιλότητες του καλουπιού.

Η έλλειψη συμμετρίας που δημιουργείται σε σύστημα αγωγών διανομής του τήγματος επηρεάζεται από τη γεωμετρία, το πολυμερές και τη διαδικασία μορφοποίησης. Γενικά, αγωγοί μεγάλης διαμέτρου μειώνουν τη διαφοροποίηση στις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται.

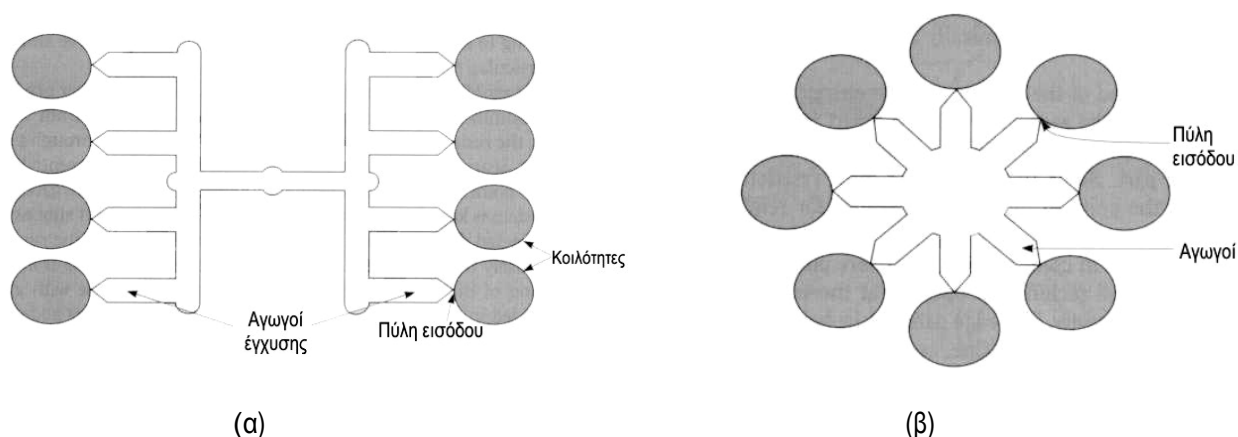
Ζυγοστάθμιση αγωγών διανομής

Βασικός στόχος στο σχεδιασμό των αγωγών έγχυσης καλουπιού *πολλαπλών κοιλοτήτων* (multicavity molds) είναι η διανομή με ομοιόμορφο τρόπο του τήγματος στις διαφορετικές κοιλότητες του καλουπιού, ώστε να επιτευχθεί ακρίβεια και ομοιομορφία στις τελικές διαστάσεις του μορφοποιημένου αντικειμένου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση *ζυγοσταθμισμένων* (balanced) αγωγών διανομής. Στην περίπτωση αυτή εξασφαλίζεται η πλήρωση της κάθε κοιλότητας με τον ίδιο ρυθμό.

Η ακρίβεια των διαστάσεων των μορφοποιημένων αντικειμένων είναι βελτιωμένη, γιατί λόγω της συμμετρίας οι αγωγοί έχουν το ίδιο μέγεθος και μήκος με αποτέλεσμα όλες οι κοιλότητες να δέχονται την ίδια πίεση έγχυσης.

Μια άλλη συνθήκη που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό των αγωγών διανομής είναι ότι το μήκος τους θα πρέπει να ελαχιστοποιείται ώστε να περιορίζεται η ποσότητα των απορριμμάτων που θα προκύψουν κατά τη στερεοποίηση του προς μορφοποίηση αντικειμένου.

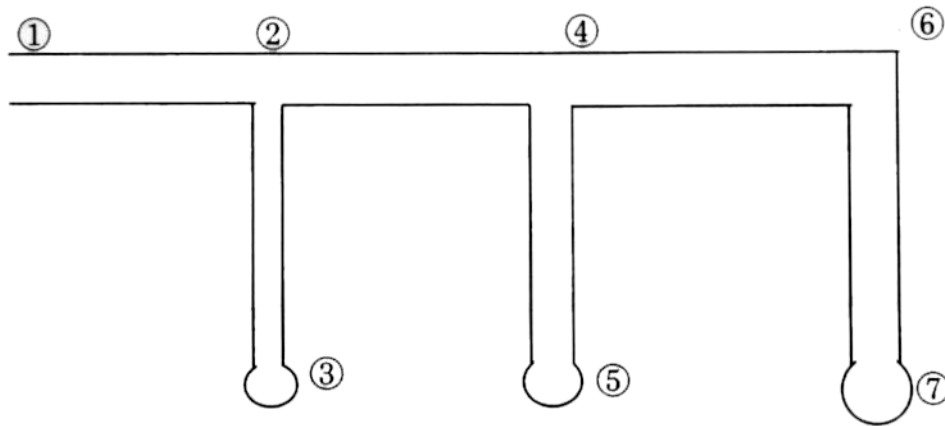
Καθώς το τήγμα του πολυμερούς ρέει μέσα στους αγωγούς, το εμπρόσθιο μέτωπο του τήγματος βρίσκεται σε άμεση επαφή με τον ψυχρό αέρα των αγωγών και ψύχεται συντομότερα σε σχέση με το υπόλοιπο ρεύμα του ρευστού. Το στερεοποιημένο αυτό τμήμα μπορεί να φράξει την είσοδο στην κοιλότητα μορφοποίησης. Για το λόγο αυτό στα σημεία που η ροή αλλάζει κατεύθυνση, σχεδιάζονται οι *επεκτάσεις των αγωγών* (cold-well extensions) ώστε να δεσμεύεται αυτό το κομμάτι της ροής.



Σχήμα 3.8: Ασύμμετρο (α) και συμμετρικό (ισοζυγισμένο) (β) σύστημα αγωγών έγχυσης.

Ομοιογένεια στην πλήρωση της κοιλότητας μπορεί να επιτευχθεί με τη διαφοροποίηση στη διάμετρο των δευτερευόντων αγωγών, σε σχέση με την απόσταση από τον κύριο αγωγό έγχυσης (Σχήμα 3.9).

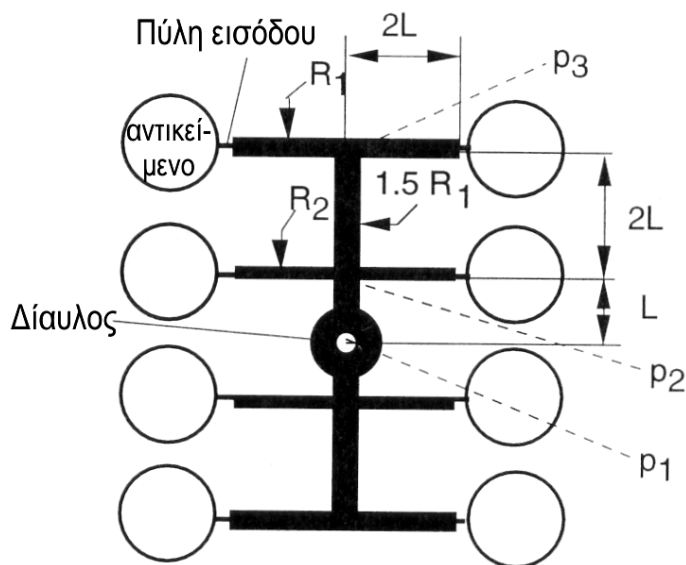
Μετά τη μορφοποίηση το αντικείμενο καθαρίζεται από το δίαυλο, τους αγωγούς διανομής και την πύλη εισόδου που το συνοδεύουν, και τα τμήματα αυτά απομακρύνονται ως απορρίμματα.



Σχήμα 3.9: Ζυγοστάθμιση αγωγών διανομής με διαφοροποίηση στη διατομή.

Παράδειγμα:

Θεωρούμε το καλούπι πολλαπλών κοιλοτήτων όπως αυτό που απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 3.10: Σχηματική παράσταση συστήματος αγωγών διανομής.

Για να επιτευχθεί καλή ποιότητα στο τελικό μορφοποιημένο αντικείμενο πρέπει όλες οι κοιλότητες να είναι ισοζυγισμένες. Για δεδομένο ρυθμό ογκομετρικής παροχής Q , μήκος L και ακτίνα R_1 , ζητείται να υπολογισθεί η ακτίνα R_2 και οι πιέσεις P_1 , P_2 και P_3 ώστε το σύστημα να είναι ισοζυγισμένο.

Για να είναι ισοζυγισμένο το σύστημα θα πρέπει η ροή σε όλες τις κοιλότητες να είναι η ίδια. Επίσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η πτώση πίεσης που συμβαίνει στα διάφορα τμήματα του συστήματος των αγωγών διανομής.

Θεωρούμε μη-Νευτωνικό ρευστό που υπακούει στον εκθετικό νόμο και ισοθερμοκρασιακές συνθήκες ροής.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση Haagen-Poiseuille:

$$Q = \frac{\pi R^3}{s+3} \left(\frac{R \Delta P}{2mL} \right)^s$$

όπου $s=1/n$

Εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης στα διάφορα τμήματα των αγωγών δίνει:

$$\text{Τμήμα 1: } 4Q = \frac{\pi(1.5R_1)^3}{s+3} \left(\frac{1.5R_1(P_1 - P_2)}{2mL} \right)^s$$

$$\text{Τμήμα 2: } 2Q = \frac{\pi(1.5R_1)^3}{s+3} \left(\frac{1.5R_1(P_2 - P_3)}{4mL} \right)^s$$

$$\text{Τμήμα 3: } Q = \frac{\pi(R_2)^3}{s+3} \left(\frac{R_2(P_2 - 0)}{4mL} \right)^s$$

$$\text{Τμήμα 4: } Q = \frac{\pi R_1^3}{s+3} \left(\frac{R_1(P_3 - 0)}{4mL} \right)^s$$

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις γίνεται υπολογισμός των άγνωστων παραμέτρων P_1 , P_2 , P_3 και R_2 .

Καλούπια με θερμαινόμενους αγωγούς διανομής (hot runner molds)

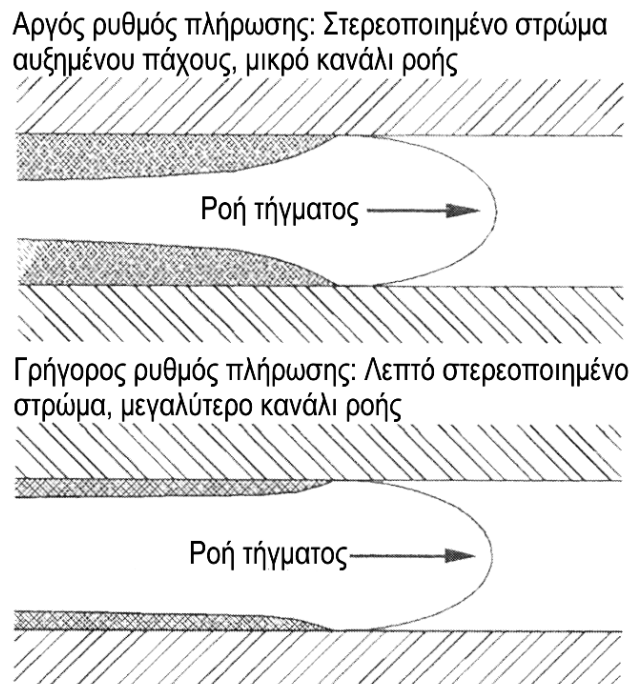
Για να περιορισθεί η ποσότητα των απορριμμάτων, το πλαστικό διατηρείται στους αγωγούς διανομής σε ρευστή κατάσταση θερμαίνοντάς τους με ειδικά θερμαντικά στοιχεία (hot runners). Ο σχεδιασμός της μήτρας είναι τέτοιος ώστε το περιεχόμενο των αγωγών διανομής να παραμένει στους αγωγούς κατά την απομάκρυνση του αντικειμένου. Στην επόμενη έγχυση συμπαρασύρεται από το τήγμα και μεταφέρεται στην κοιλότητα μορφοποίησης. Στην περίπτωση αυτή ο χρόνος έγχυσης μειώνεται και το μέγεθος του συστήματος των αγωγών έγχυσης πρέπει να συνδυάζεται με την ποσότητα που απαιτείται να εγχυθεί ώστε να γεμίσει πλήρως η κοιλότητα μορφοποίησης. Η προσθήκη της θέρμανσης των αγωγών αυξάνει το κόστος κατασκευής του καλουπιού (περίπου 30%), αλλά το γεγονός αυτό αντισταθμίζεται με βελτίωση στην απόδοση της διεργασίας μορφοποίησης, ιδιαίτερα για μεγάλους όγκους παραγωγής.

Η ροή του πλαστικού τήγματος σε έναν αγωγό είναι αρκετά πολύπλοκη διαδικασία καθώς ο ρυθμός διάτμησης και η θερμοκρασία, και κατά συνέπεια το ιξώδες, διαφοροποιούνται κατά μήκος και εγκάρσια του αγωγού. Ο ρυθμός διάτμησης είναι μέγιστος στους αγωγούς διανομής και στην πύλη εισόδου ενός καλουπιού, όπου και η ταχύτητα του τήγματος γίνεται μέγιστη. Ο υψηλός ρυθμός διάτμησης στα εξωτερικά

τοιχώματα του αγωγού μειώνει το ιξώδες του τήγματος λόγω της μη-νευτωνικής συμπεριφοράς του καθώς και της ανάπτυξης θερμότητας λόγω ιξώδους τριβής. Η ανάπτυξη θερμότητας λόγω τριβής οδηγεί σε αυξημένη θερμοκρασία στα εξωτερικά στρώματα, σε σύγκριση τη θερμοκρασία του ρευστού στο κέντρο του αγωγού.

Ανάπτυξη στερεοποιημένου οριακού στρώματος

Κατά τη ροή του τήγματος στον αγωγό διανομής, καθώς το ρευστό έρχεται σε επαφή με τα ψυχρά τοιχώματα ψύχεται και σχηματίζει ένα λεπτό στερεοποιημένο στρώμα/“φλοιό”. Από το πάχος αυτού του στρώματος καθορίζεται η πραγματική εγκάρσια επιφάνεια του αγωγού. Σε υψηλούς ρυθμούς ροής, η ανάπτυξης θερμότητας λόγω ιξώδους τριβής περιορίζει την ανάπτυξη αυτού του στρώματος. Η μείωση του πάχους του στερεοποιημένου στρώματος περιορίζει τη *στένωση του πεδίου ροής*, γεγονός που έχει άμεση επίδραση στην πτώση πίεσης. Η επίδραση του ρυθμού ροής στο στερεοποιημένο στρώμα αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11: Επίδραση του ρυθμού ροής τήγματος στο πάχος του στερεοποιημένου στρώματος.

Οι ακόλουθες παράμετροι προσδιορίζουν την ανάπτυξη και το πάχος του στερεοποιημένου στρώματος:

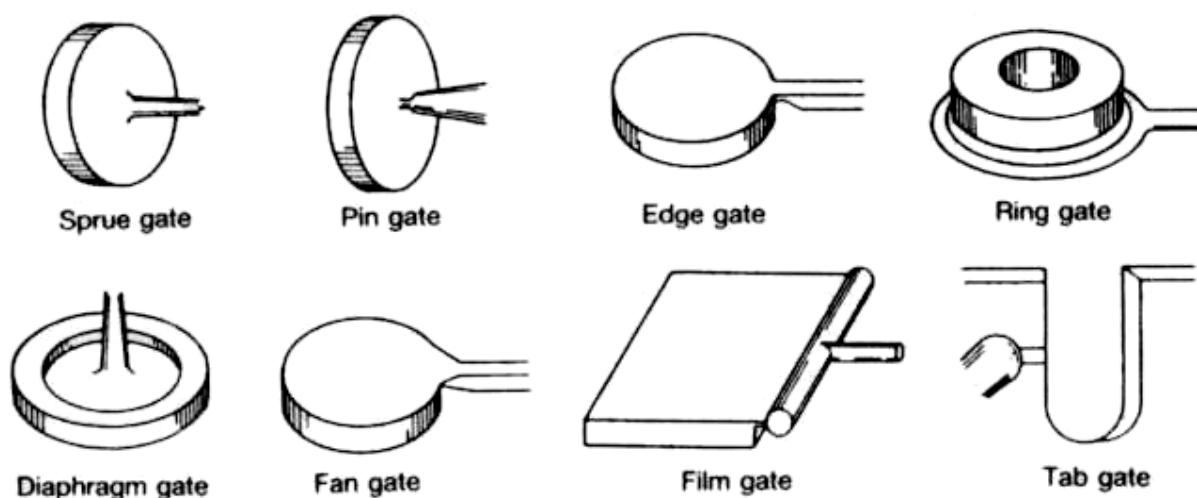
- ⇒ Οι θερμικές ιδιότητες του θερμοπλαστικού πολυμερούς (π.χ. θερμική αγωγιμότητα, ειδική θερμότητα)
- ⇒ Οι θερμοκρασίες του τήγματος και του καλουπιού
- ⇒ Οι θερμικές ιδιότητες του καλουπιού
- ⇒ Ο τοπικός ρυθμός ροής
- ⇒ Ο χρόνος παραμονής του τήγματος

Το στερεοποιημένο αυτό στρώμα του πολυμερούς αποτελεί φραγμό στη μεταφορά της θερμότητας με αγωγή από το θερμό τήγμα στην επιφάνεια του καλουπιού. Η θερμική αγωγιμότητα των θερμοπλαστικών είναι πολύ χαμηλότερη (της τάξης του δύο) από αυτή του χάλυβα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του καλουπιού. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη το κενό που δημιουργείται στην κοιλότητα μορφοποίησης κατά την ψύξη του πολυμερικού τήγματος. Λόγω της θερμικής συστολής, το αντικείμενο απομακρύνεται από τα τοιχώματα του καλουπιού με αποτέλεσμα να δημιουργείται κενός χώρος που επιτείνει τη δυσκολία στην απομάκρυνση της θερμότητας.

Όπως θα δούμε αναλυτικά στη συνέχεια, για να έχουμε αποτελεσματικότερη μεταφορά θερμότητας, σύντομους χρόνους μορφοποίησης και για μορφοποιημένα αντικείμενα υψηλής ποιότητας, πρέπει να εφαρμοσθεί στην κοιλότητα για αρκετό χρονικό διάστημα η κατάλληλη *πίεση συμπίεσης* (packing pressure). Η εφαρμογή για κάποιο διάστημα της πίεσης συμπίεσης στην κοιλότητα μορφοποίησης επιτρέπει να εισέλθει επιπλέον ποσότητα πολυμερούς σε αυτή. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται η συστολή κατά την ψύξη του αντικειμένου στο καλούπι, βελτιώνεται η επαφή του με τα τοιχώματα και επομένως έχουμε αποτελεσματικότερη μεταφορά θερμότητας, γεγονός που τελικά οδηγεί σε συντομότερους κύκλους μορφοποίησης.

Πύλη εισόδου κοιλότητας

Ο αγωγός διανομής συνδέεται με την κοιλότητα μορφοποίησης του καλουπιού μέσω της *πύλης εισόδου* (gate). Το σχήμα της πύλης επηρεάζει τον τρόπο που θα γεμίσει η κοιλότητα καθώς τις διαστάσεις και τις ιδιότητες του τελικού αντικειμένου. Καθοριστικό σημείο στο σχεδιασμό της πύλης αποτελεί η δυνατότητα να γίνεται στο σημείο αυτό εύκολος διαχωρισμός του μορφοποιημένου αντικειμένου από το υπόλοιπο σύστημα των αγωγών έγχυσης, επιτρέποντας ταυτόχρονα την ομαλή έγχυση του αντικειμένου.



Σχήμα 3.12: Διάφορα σχέδια της πύλης εισόδου.

Για το σχεδιασμό της θέσης που θα τοποθετηθεί η πύλη εισόδου σε ένα αντικείμενο, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα:

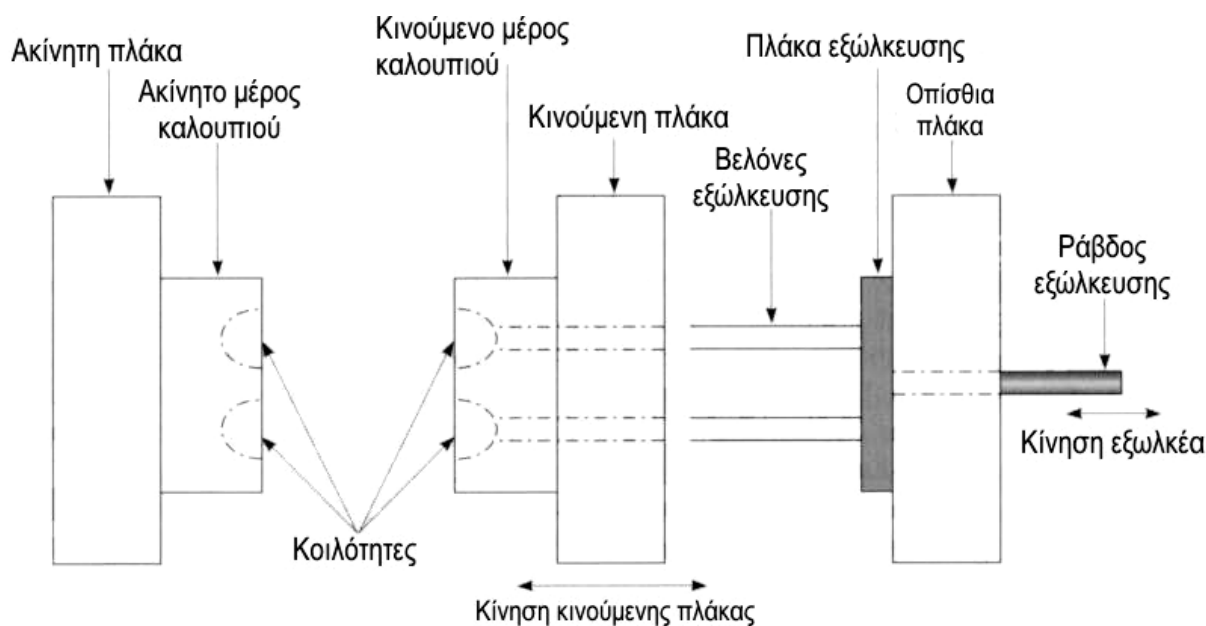
- Η διαφοροποίηση στο πάχος των προς μορφοποίηση αντικειμένων: Η πύλη πρέπει να τοποθετείται στη περιοχή του μεγαλύτερου πάχους. Τοποθέτηση της πύλης στην λεπτότερη περιοχή περιορίζει τον έλεγχο της διαδικασίας συμπίεσης στις περιοχές αυξημένου πάχους. Τα γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε συρρίκνωση, σκέβρωση και κενά.
- Η θέση της πύλης εισόδου καθορίζει τη δημιουργία *γραμμών συγκόλλησης* (weld lines).
- Η θέση της πύλης εισόδου επιδρά στη μορφή του πεδίου ροής και κατ' επέκταση στη συρρίκνωση του αντικειμένου. Ο προσανατολισμός λόγω ροής (flow induced orientation) οδηγεί σε ανομοιόμορφη συρρίκνωση και πιθανά σε σκέβρωση ή δημιουργία εσωτερικών τάσεων (residual stresses).
- Το μήκος ροής μεταξύ του αγωγού διανομής και του αντικειμένου μορφοποίησης: το μήκος των αγωγών διανομής επηρεάζει την πίεση έγχυσης, στην τελική τιμή της οποίας συμμετέχει και η γεωμετρία της πύλης στην κοιλότητα, ούτως ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική έγχυση.

Κοιλότητες μορφοποίησης

Η ρητίνη εισέρχεται στις κοιλότητες μέσω της πύλης εισόδου, γεμίζει την κάθε κοιλότητα και ακολούθως με ψύξη παραλαμβάνονται τα μορφοποιημένα αντικείμενα. Προσοχή πρέπει να δοθεί στον αριθμό των κοιλοτήτων που έχει κάθε καλούπι, και ο οποίος συσχετίζεται με τις απαιτήσεις του όγκου παραγωγής. Κατασκευάζονται καλούπια με μια μόνο κοιλότητα μορφοποίησης αλλά η πιο κοινή πρακτική, ειδικά για μικρά αντικείμενα με μεγάλους όγκους παραγωγής, είναι η κατασκευή πολλαπλών κοιλοτήτων σε ένα καλούπι.

Σύστημα εξώλκευσης

Για να διευκολυνθεί η απομάκρυνση των αντικειμένων από το καλούπι χρησιμοποιείται το σύστημα εξώλκευσης. Το σύστημα εξώλκευσης αποτελείται από βελόνες οι οποίες στηρίζονται στην πλάκα εξώλκευσης (Σχήμα 3.13). Όταν το καλούπι ανοίγει το σύστημα εξώλκευσης κινείται προς το μέρος του και οι βελόνες διαπερνούν, μέσα από λεπτές οπές, το κινητό τμήμα του καλουπιού και απομακρύνουν το μορφοποιημένο αντικείμενο.



Σχήμα 3.13: Σύστημα εξώλκευσης μονάδας έγχυσης.

3.2.3 Κλειστικό σύστημα

Η λειτουργία του κλειστικού συστήματος (clamping unit) είναι να ασκεί την απαραίτητη πίεση ώστε να αποφεύγονται οι διαρροές του τήγματος από την επιφάνεια επαφής των ξεχωριστών τμημάτων που απαρτίζουν το καλούπι μορφοποίησης, μετά την έγχυση της ρητίνης και κατά τη διάρκεια της ψύξης.

Η απαιτούμενη δύναμη του κλειστικού (F) συνδέεται με την πίεση έγχυσης (P) και την επιφάνεια των κοιλοτήτων του καλούπιού (A) με την ακόλουθη σχέση:

$$F = P \times A$$

Δύναμη κλειστικού = (Πίεση έγχυσης) ×
(Συνολική εγκάρσια επιφάνεια των κοιλοτήτων)

Από τον ορισμό αυτό φαίνεται ότι οποιαδήποτε αύξηση στην πίεση έγχυσης ή στην εγκάρσια επιφάνεια των κοιλοτήτων μορφοποίησης θα επιφέρει αύξηση στη δύναμη του κλειστικού ώστε να διατηρηθεί το καλούπι κλειστό.

Η δύναμη του κλειστικού αποτελεί το μέγεθος για την κατάταξη των μηχανών έγχυσης.

Η πίεση έγχυσης εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως :

- Το ιξώδες της ρητίνης που πρόκειται να εγχυθεί
- Τη θερμοκρασία
- Το μέγεθος, το μήκος και το είδος (θερμαινόμενοι ή όχι) των αγωγών διανομής
- Ο τύπος και το μέγεθος της πύλης εισόδου
- Το βάθος των κοιλοτήτων μορφοποίησης του καλούπιού

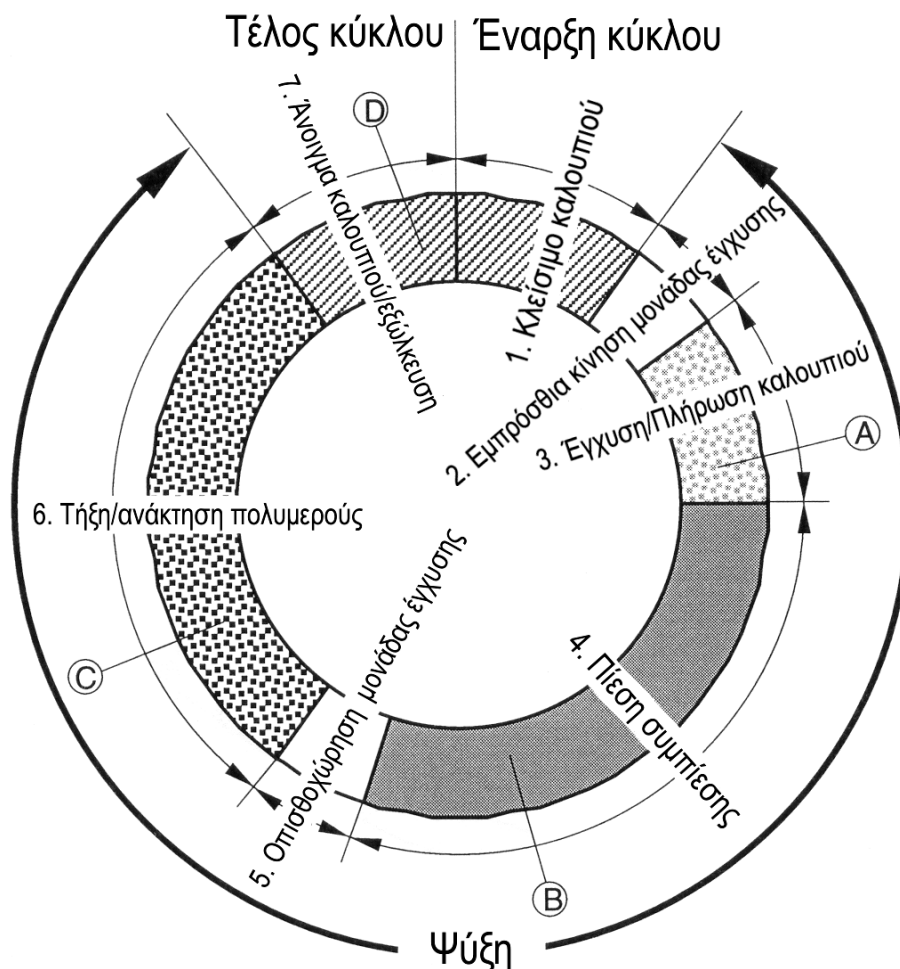
3.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΥΚΛΟΥ ΕΓΧΥΣΗΣ

3.3.1 Ο ΚΥΚΛΟΣ ΕΓΧΥΣΗΣ

Η σειρά με την οποία συμβαίνουν οι διάφορες φάσεις κατά τη μορφοποίηση με έγχυση αποτυπώνονται στο Σχήμα 3.14, και ονομάζεται κύκλος έγχυσης. Ο κύκλος ξεκινά με το κλείσιμο του καλούπιού και ακολουθεί η έγχυση του πολυμερούς στην κοιλότητα του καλούπιού. Μόλις ολοκληρωθεί πλήρωση της κοιλότητας, ακολουθεί το στάδιο όπου ασκείται πίεση για κάποιο χρόνο ώστε να εισέλθει επιπλέον ποσότητα (συμπύεση) και να περιορισθεί το φαινόμενο της συρρίκνωσης του αντικειμένου κατά την ψύξη. Στο επόμενο στάδιο, ο κοχλίας οπισθοχωρεί και περιστρέφεται για να τροφοδοτήσει τη δεξαμενή τήγματος στο χώρο που βρίσκεται εμπρός του κοχλίου. Μόλις το αντικείμενο ψυχθεί, το καλούπι ανοίγει και το αντικείμενο εξωλκύεται. Από το Σχήμα 3.14 γίνεται φανερό ότι μεγάλο μέρος του κύκλου έγχυσης καλύπτει η ψύξη του αντικειμένου μέσα στο καλούπι, ενώ ο χρόνος που κλείνει το καλούπι και εξωλκύεται το αντικείμενο διαρκούν μερικά δευτερόλεπτα.

Ο συνολικός χρόνος του κύκλου έγχυσης περιγράφεται από τη σχέση:

$$t_{\text{κύκλου}} = t_{\text{κλειστό καλούπι}} + t_{\text{ψύξης}} + t_{\text{εξώλκευσης}}$$



Σχήμα 3.14: Κύκλος έγχυσης.

Προσδιορισμός του χρόνου ψύξης κατά τη μορφοποίηση με έγχυση

Ο χρόνος ψύξης για αντικείμενο με μορφή επίπεδης πλάκας πάχους h δίνεται από τη σχέση:

$$t_{\psi\upsilon\chi\eta\varsigma} = \frac{h^2}{\pi\alpha} \ln\left(\frac{8}{\pi^2} \frac{T_M - T_W}{T_D - T_W}\right) \quad [3.1]$$

Για γεωμετρία κυλίνδρου διαμέτρου D ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$t_{\psi\upsilon\chi\eta\varsigma} = \frac{D^2}{23.14\alpha} \ln\left(0.692 \frac{T_M - T_W}{T_D - T_W}\right) \quad [3.2]$$

όπου α : συντελεστής θερμικής διάχυσης,

T_M : η θερμοκρασία του τήγματος

T_W : η θερμοκρασία του καλουπιού και

T_D : η μέση θερμοκρασία του αντικειμένου κατά τη φάση της εξώλκευσης

3.3.2 Συρρίκνωση

Κατά το σχεδιασμό αντικειμένων με την τεχνική της έγχυσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η μεταβολή στην πυκνότητα των πολυμερών σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και την πίεση που επικρατεί στην κοιλότητα μορφοποίησης. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες η πυκνότητα του πολυμερούς, για σταθερή πίεση, είναι σημαντικά χαμηλότερη από την πυκνότητα σε συνθήκες περιβάλλοντος. Επομένως αν το καλούπι έχει πληρωθεί στην υψηλή θερμοκρασία του τήγματος και με υψηλή πίεση έγχυσης, κατά τη διάρκεια της ψύξης το πολυμερές “συρρικνώνεται” και επέρχονται αποκλίσεις στο μορφοποιημένο αντικείμενο από τις διαστάσεις της κοιλότητας μορφοποίησης του καλουπιού. Αν η θερμοκρασία είναι σταθερή, η πυκνότητα αυξάνει με την αύξηση της πίεσης. Διατηρώντας για αρκετό διάστημα υψηλή την πίεση έγχυσης, επιτρέπεται να εισέλθει στην κοιλότητα μεγαλύτερη ποσότητα υλικού μειώνοντας έτσι την τελική συρρίκνωση του τελικού αντικειμένου. Η επιπλέον αυτή πίεση που ασκείται στο καλούπι για να εισέλθει πρόσθετη ποσότητα πολυμερούς καλείται πίεση συμπίεσης (packing pressure), και χρησιμοποιείται για να περιορισθεί το φαινόμενο της συρρίκνωσης στο μορφοποιημένο αντικείμενο.

Αν η συρρίκνωση είναι η ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις, το μορφοποιημένο αντικείμενο θα ήταν εντελώς όμοιο με την κοιλότητα μορφοποίησης αλλά μικρότερου μεγέθους. Το πρόβλημα της συρρίκνωσης στην περίπτωση αυτή λύνεται μεγαλώνοντας κατάλληλα τις διαστάσεις της κοιλότητας. Συνήθως η συρρίκνωση δεν είναι ομοιόμορφη λόγω της ανομοιόμορφης ψύξης. Οι λεπτές διατομές ψύχονται ταχύτερα από τις παχύτερες, οπότε η πυκνότητα αυξάνεται ταχύτερα στις πρώτες από ότι στις δεύτερες. Η διαφορά αυτή οδηγεί σε τοπικές διαφορές πίεσης οι οποίες τείνουν να προκαλέσουν ροή του υλικού από τις παχύτερες στις λεπτότερες διατομές.

Το φαινόμενο αυτό καλείται “*εσωτερική ροή*” και είναι άμεση συνέπεια της συρρίκνωσης.

Διακρίνουμε δύο ειδών συρρικνώσεις τη *γραμμική* (s_L) και την *ογκομετρική* (s_V):

$$s_L = \frac{L^* - L}{L^*} \quad [3.3]$$

όπου L^* η γραμμική διάσταση της κοιλότητας, και L η αντίστοιχη διάσταση του μορφοποιημένου αντικειμένου σε συγκεκριμένη πίεση και θερμοκρασία αναφοράς.

Η ογκομετρική συρρίκνωση (s_V) δίνεται από τη σχέση:

$$s_V = \frac{V^* - V}{V^*} \quad [3.4]$$

όπου V^* ο όγκος της κοιλότητας, και V ο αντίστοιχος όγκος του μορφοποιημένου αντικειμένου σε συγκεκριμένη πίεση και θερμοκρασία αναφοράς.

Αν m είναι η μάζα του πολυμερούς στην κοιλότητα μορφοποίησης στις συνθήκες έγχυσης, m θα είναι η μάζα του μορφοποιημένου αντικειμένου μετά την ψύξη. Οι ειδικοί όγκοι του πολυμερούς στις δύο παραπάνω καταστάσεις είναι διαφορετικές. Έστω v και v_0 οι ειδικοί όγκοι του πολυμερούς στην κοιλότητα μορφοποίησης στις συνθήκες πλήρωσης και για το μορφοποιημένο αντικείμενο στις συνθήκες αναφοράς, αντίστοιχα. Ισχύει :

$$V = mv_0 \quad \text{και} \quad V^* = mv \quad [3.5]$$

Ο ειδικός όγκος v στις συνθήκες πλήρωσης μπορεί να υπολογιστεί αν γνωρίζουμε την καταστατική εξίσωση στην οποία υπακούει το πολυμερές. Μια εύχρηστη καταστατική εξίσωση δύο παραμέτρων είναι η ακόλουθη:

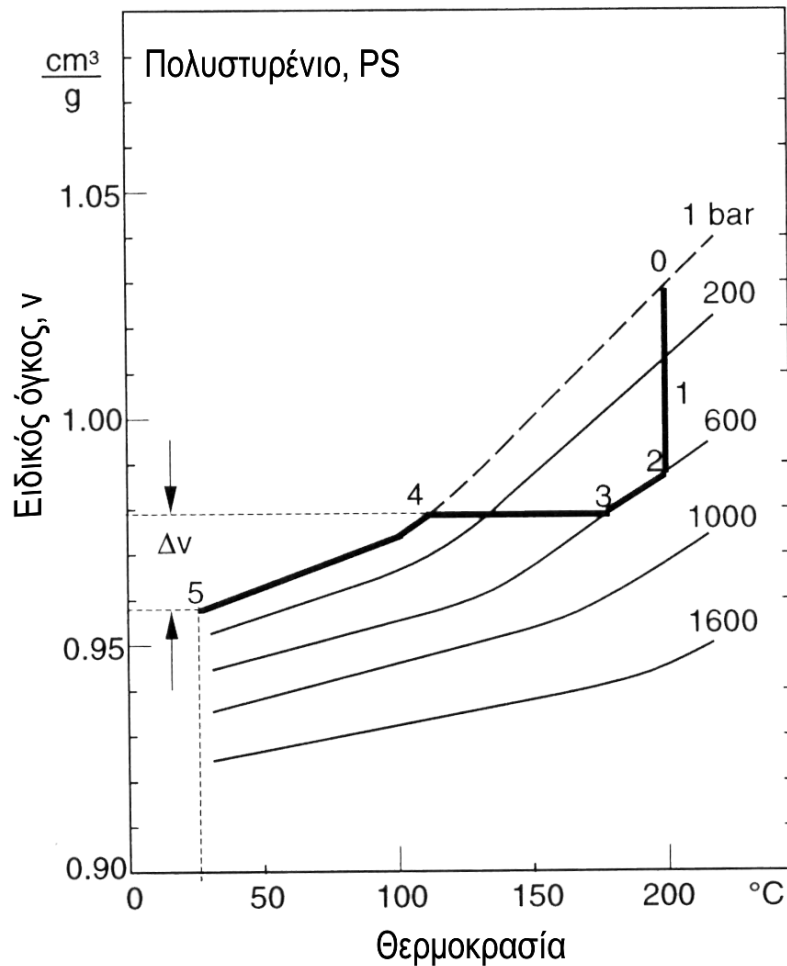
$$(P + \pi)(v - b) = \frac{RT}{M} \quad [3.6]$$

όπου M το μοριακό βάρος της επαναλαμβανόμενης ομάδας του πολυμερούς, T η θερμοκρασία, P η πίεση, v ο ειδικός όγκος.

Χρησιμοποιώντας τη μέση θερμοκρασία του αντικειμένου και την πίεση στην κοιλότητα μορφοποίησης, η διεργασία έγχυσης μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας το διάγραμμα PvT που παριστάνεται στο Σχήμα 3.15. Για να παρακολουθήσουμε τη διεργασία στο διάγραμμα PvT , πρέπει η θερμοκρασία και η πίεση να αναχθούν στους ίδιους χρόνους. Το διάγραμμα αυτό φανερώνει τις εξής βασικές διαδικασίες:

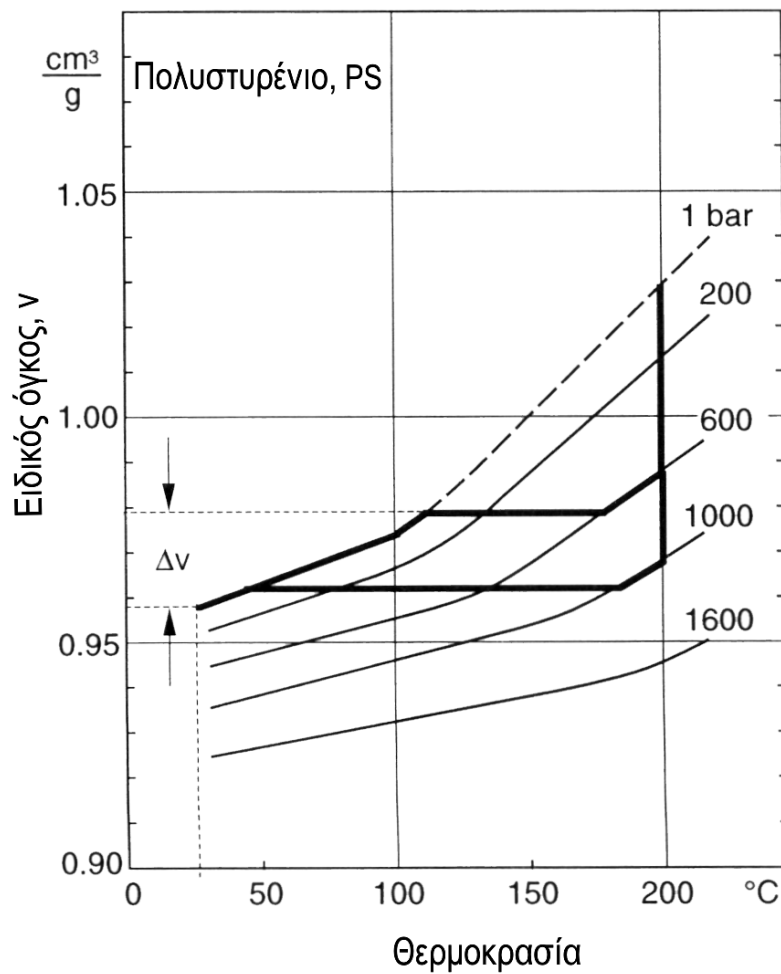
- ⇒ Ισοθερμοκρασιακή έγχυση (0-1)
- ⇒ Αύξηση της πίεσης στην πίεση συμπίεσης (1-2)
- ⇒ Ισοβαρής ψύξη κατά τη διάρκεια της συμπίεσης (2-3)
- ⇒ Ισόχωρη ψύξη μετά την ψύξη της εισόδου στην κοιλότητα και πτώση της πίεσης στην ατμοσφαιρική (3-4)
- ⇒ Ισοβαρής ψύξη στη θερμοκρασία περιβάλλοντος (4-5)

Το σημείο στο διάγραμμα P-vT όπου ξεκινά η τελική ισοσοβαρής ψύξη (4), ελέγχει τη συνολική συρρίκνωση του αντικειμένου Δv . Το σημείο αυτό επηρεάζεται από δύο βασικές παραμέτρους της διεργασίας: τη θερμοκρασία του τήγματος T_M και την πίεση συμπίεσης P_H όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.16.



Σχήμα 3.15: Διάγραμμα P-vT κατά τη διάρκεια κύκλου μορφοποίησης με έγχυση.

Στο Σχήμα 3.16 η έγχυση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.15 συγκρίνεται με μία άλλη όπου εξασκείται μεγαλύτερη πίεση συμπίεσης.



Σχήμα 3.16: Διάγραμμα P-vT δύο διαφορετικών κύκλων έγχυσης.

3.3.3. Βασικές παράμετροι κύκλου έγχυσης

Οι βασικές παράμετροι οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της μορφοποίησης με έγχυση είναι οι εξής:

- Η θερμοκρασία του τήγματος
- Η θερμοκρασία του καλουπιού
- Η πίεση έγχυσης και η πίεση συμπίεσης
- Η χρονική διάρκεια των διαφόρων σταδίων του κύκλου της έγχυσης

Θερμοκρασία τήγματος

Οι θερμοκρασίες κατά μήκος του κυλίνδρου της μηχανής έγχυσης ρυθμίζονται έτσι ώστε να ελέγχεται το ιξώδες του τήγματος. Οι θερμοκρασίες αυτές είναι συνήθως χαμηλότερες από τη θερμοκρασία τήξης της ρητίνης ώστε να μένει περιθώριο για ανάπτυξη θερμότητας λόγω ιξώδους τριβής από την κίνηση του κοχλία. Είναι σημαντικό να γίνει συνδυασμός της θέρμανσης με τον τύπο της ρητίνης, τα χαρακτηριστικά της μηχανής και την ποσότητα που πρόκειται να εγχυθεί.

Ιδιαίτερη σημασία για τη διεργασία έχει η ρύθμιση της θερμοκρασίας στο ακροφύσιο, η οποία εξαρτάται από το σχήμα του, τον τύπο της ρητίνης και την ποσότητα που πρόκειται να εγχυθεί. Το ακροφύσιο λειτουργεί ως αγωγός μεταφοράς του τήγματος και δεν πρέπει να επηρεάζει τη θερμοκρασία του. Στην ιδανική περίπτωση η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του τήγματος από το ακροφύσιο πρέπει να είναι ίδιες.

Θερμοκρασία καλουπιού

Η θερμοκρασία του καλουπιού ελέγχεται από την κυκλοφορία νερού ψύξης. Υπάρχουν περιπτώσεις που απαιτείται θέρμανση του καλουπιού ώστε να ελέγχεται ο ρυθμός κρυστάλλωσης και η ανάπτυξη θερμικών τάσεων στο μορφοποιημένο αντικείμενο. Σε άλλες περιπτώσεις είναι επιθυμητό το καλούπι να ψύχεται γρήγορα, γεγονός που οδηγεί σε συντομότερους χρόνους μορφοποίησης. Περιορισμό στη θερμοκρασία του καλουπιού αποτελεί το σημείο στο οποίο επέρχεται ψύξη στην πύλη εισόδου πριν ολοκληρωθεί η πλήρωση της κοιλότητας. Το μέγεθος της πύλης πρέπει να προσαρμόζεται ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη ροή στην κοιλότητα μορφοποίησης στη χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία.

Συνοψίζοντας οι παράμετροι που επηρεάζουν τη θερμοκρασία του συστήματος τήγματος-καλουπιού, είναι οι εξής:

- ⇒ Ποσότητα έγχυσης: μεγάλες ποσότητες απαιτούν περισσότερη θερμότητα
- ⇒ Ρυθμός έγχυσης: ταχεία πλήρωση οδηγεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες τήγματος λόγω διάτμησης
- ⇒ Μέγεθος του συστήματος των αγωγών έγχυσης: μεγάλο μήκος απαιτεί υψηλότερες θερμοκρασίες
- ⇒ Πάχος αντικειμένου μορφοποίησης: για μεγάλο πάχος απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος ψύξης και μορφοποίηση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Πίεση έγχυσης

Η πίεση έγχυσης πρέπει να είναι ελάχιστη δυνατή ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο της *ελλιπούς πλήρωσης* (short shot) στην κοιλότητα μορφοποίησης. Επίσης πρέπει να είναι αρκετά υψηλή και να εξασκείται για αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να περιορίζεται το φαινόμενο της συρρίκνωσης κατά την ψύξη του αντικειμένου, με την προσθήκη επιπλέον ποσότητας ρητίνης στην κοιλότητα μορφοποίησης.

Όπως έχει αναφερθεί η διαδικασία κατά την οποία εισέρχεται επιπλέον ποσότητα της ρητίνης στην κοιλότητα, για να περιορισθεί η συρρίκνωση του τελικού αντικειμένου, καλείται συμπίεση. Περιορισμούς στην πίεση έγχυσης αποτελούν η δυναμικότητα του κλειστικού συστήματος και η αντοχή σε υψηλά φορτία του καλουπιού καθώς και των εξαρτημάτων της μηχανής.

Συνήθως η εφαρμογή της πίεσης γίνεται σε δύο στάδια: στο αρχικό στάδιο εφαρμόζεται υψηλή πίεση για να γίνει η έγχυση της ρητίνης και να γεμίσει η κοιλότητα μορφοποίησης, και στο επόμενο στάδιο εφαρμόζεται η πίεσης συμπίεσης.

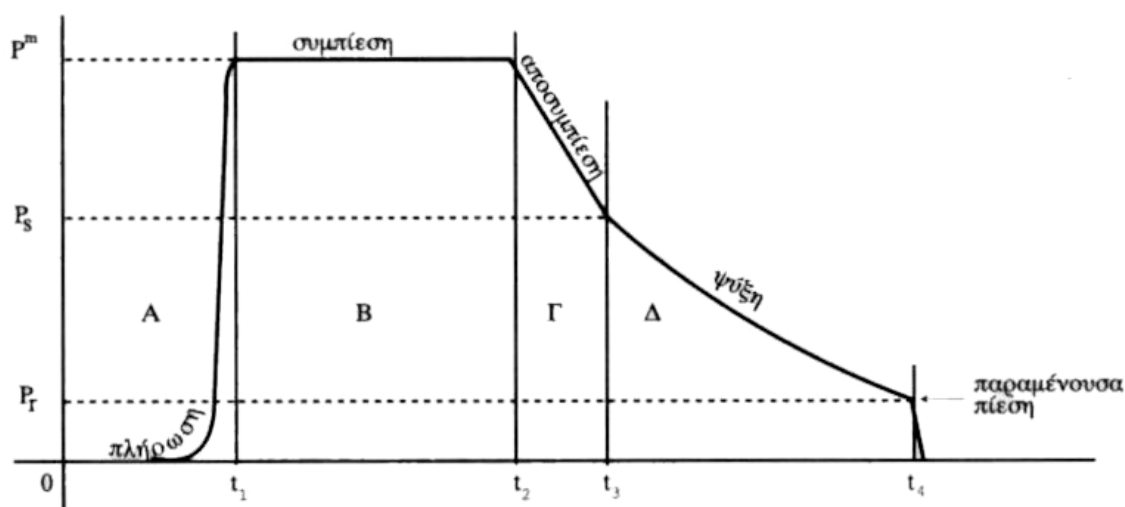
Σύμφωνα με τα παραπάνω η μεταβολή της πίεσης κατά τη διάρκεια ενός κύκλου έγχυσης, συνοψίζεται στα ακόλουθα στάδια (Σχήμα 3.17):

Στάδιο έγχυσης: από τη στιγμή που ο κοχλίας κινείται προς τα εμπρός και εξωθεί τήγμα στο καλούπι. Στο καλούπι δεν αναπτύσσεται πίεση μέχρι τη στιγμή που η κοιλότητα θα πληρωθεί με το πολυμερικό τήγμα. Τότε η πίεση παίρνει τη μέγιστη τιμή P^m .

Στάδιο συμπίεσης: Καθώς το πολυμερικό τήγμα αρχίζει να ψύχεται, η πυκνότητα αυξάνει. Η πίεση μπορεί να διατηρηθεί σταθερή αν ο κοχλίας συνεχίζει να πιέζει προς τα εμπρός τήγμα αναγκάζοντας να εισέλθει στην κοιλότητα επιπλέον ποσότητα πολυμερούς.

Στάδιο αποσυμπίεσης: Ο κοχλίας οπισθοχωρεί στην αρχική του θέση. Η πίεση στην κοιλότητα αναγκάζει μέρος του πολυμερούς να μετακινηθεί έξω από το καλούπι, και η πίεση στην κοιλότητα μειώνεται. Αν υπάρχει βαλβίδα ελέγχου της ροής στην είσοδο του καλουπιού, η πίεση παραμένει σχεδόν σταθερή.

Στάδιο ψύξης: ξεκινά με τη στερεοποίηση του πολυμερούς στην πύλη εισόδου στην κοιλότητα. Στο στάδιο αυτό δεν μπορεί να υπάρξει ροή ή εκροή στην κοιλότητα. Η πίεση μειώνεται σταδιακά καθώς το αντικείμενο ψύχεται.



Σχήμα 3.17: Η μεταβολή της πίεσης στην κοιλότητα μορφοποίησης σε συνάρτηση με το χρόνο κατά τον κύκλο έγχυσης.

Ρυθμός έγχυσης

Στις περισσότερες των περιπτώσεων η ρητίνη πρέπει να εισέλθει στην κοιλότητα όσο γίνεται πιο γρήγορα. Παρόλα αυτά ο βέλτιστος ρυθμός έγχυσης εξαρτάται από τη γεωμετρία του προς μορφοποίηση αντικειμένου, το μέγεθος και το σχήμα της πύλης εισόδου και από τη θερμοκρασία του τήγματος. Σε περίπτωση μεγάλης διάρκειας του σταδίου έγχυσης της ρητίνης στην κοιλότητα, είναι πιθανό να επέλθει πρόωρη στερεοποίηση του τήγματος. Για το λόγο αυτό, όταν μορφοποιούνται αντικείμενα μεγάλου πάχους ή η πύλη εισόδου έχει μικρές διαστάσεις είναι προτιμητέο ο ρυθμός έγχυσης να είναι αργός ώστε η συνεχόμενη ροή της ρητίνης από την πύλη εισόδου να αποτρέπει την στερεοποίησή της και να δίνει τον απαραίτητο χρόνο για να γεμίσει η κοιλότητα. Το αντίστροφο ακολουθείται για αντικείμενα με μικρό πάχος.

Χρόνος παραμονής/ ή συμπίεσης

Από τη στιγμή που θα γεμίσει η κοιλότητα μορφοποίησης, το χρονικό διάστημα για το οποίο εξασκείται ακόμη πίεση στην κοιλότητα καλείται χρόνος παραμονής. Η δύναμη που ασκείται κατά τη συμπίεση βοηθά στη σταθεροποίηση των διαστάσεων του προς μορφοποίηση αντικειμένου.

Χρόνος ψύξης

Χρόνος ψύξης είναι το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που δεν ασκείται πλέον πίεση στην κοιλότητα μέχρι να ανοίξει το καλούπι.

Χρόνος εξώλκευσης

Είναι ο χρόνος από τη στιγμή που ανοίγει το καλούπι, γίνεται εξώλκευση του αντικειμένου και ξανακλείνει. Πρέπει να δίνεται προσοχή κατά το στάδιο αυτό ώστε η εξώλκευση να γίνεται με τέτοιο τρόπο που να μην παραμορφώνεται το μορφοποιημένο αντικείμενο.

3.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΕΓΧΥΣΗΣ

3.4.1 Πλήρωση καλουπιού

Η θερμοκρασία με την οποία το τήγμα οδηγείται στο καλούπι καθώς και ο ρυθμός έγχυσης, προσδιορίζουν το ιξώδες του πολυμερούς που εισέρχεται στην κοιλότητα μορφοποίησης. Υψηλή θερμοκρασία τήγματος έχει ως αποτέλεσμα χαμηλές τιμές ιξώδους και επομένως απαιτούνται χαμηλότερες πιέσεις για την πλήρωση του καλουπιού.

Η μείωση της διαμέτρου των αγωγών διανομής του τήγματος, αυξάνει το ρυθμό διάτμησης και μειώνει το ιξώδες του πολυμερούς λόγω του φαινομένου της *διατμητικής λέπτυνσης* των μη-νευτωνικών πολυμερών, καθώς και της ανάπτυξης ιξώδους θερμότητας.

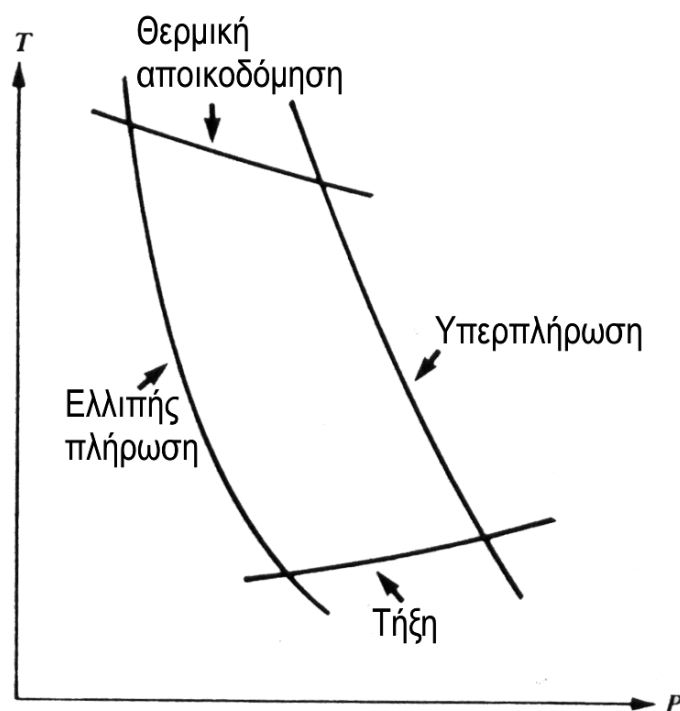
Σε κάθε μορφοποίηση με έγχυση, το θερμό τήγμα εγχύεται στο ψυχρό καλούπι. Η θερμότητα που παίρνει το πολυμερές από τη μονάδα έγχυσης, μεταφέρεται με αγωγή κατά τη ροή του ρευστού στους αγωγούς διανομής. Επίσης στο πολυμερικό τήγμα, κατά τη ροή του στους στενούς αγωγούς, αναπτύσσεται θερμότητα λόγω ιξώδους τριβής η οποία είναι εντονότερη στα εξωτερικά στρώματα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός ροής στην περίπτωση αυτή, τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμότητα που ελευθερώνεται.

Επομένως η θερμοκρασία του πολυμερούς κατά μήκος του αγωγού διανομής προέρχεται από το ισοζύγιο:

- της θερμότητας που μεταφέρεται με αγωγή από το θερμό τήγμα,
- της θερμότητας που αναπτύσσεται λόγω τριβής και
- της θερμότητας που μεταφέρεται με αγωγή στο ψυχρό καλούπι.

Είναι σημαντικό για δεδομένο πολυμερές και για συγκεκριμένη γεωμετρία της κοιλότητας μορφοποίησης που πρόκειται να γεμίσει, να προσδιορισθεί η “περιοχή έγχυσης” στο διάγραμμα πίεσης-θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 3.18 παρουσιάζεται μια εμπειρική απάντηση που δείχνει την προσδιοριζόμενη πειραματικά “περιοχή μορφοποίησης”, στο διάγραμμα πίεσης-θερμοκρασίας έγχυσης.



Σχήμα 3.18: Σχηματικό διάγραμμα της περιοχής έγχυσης η οποία πρέπει να προσδιορίζεται για δεδομένο πολυμερές και κοιλότητα καλουπιού.

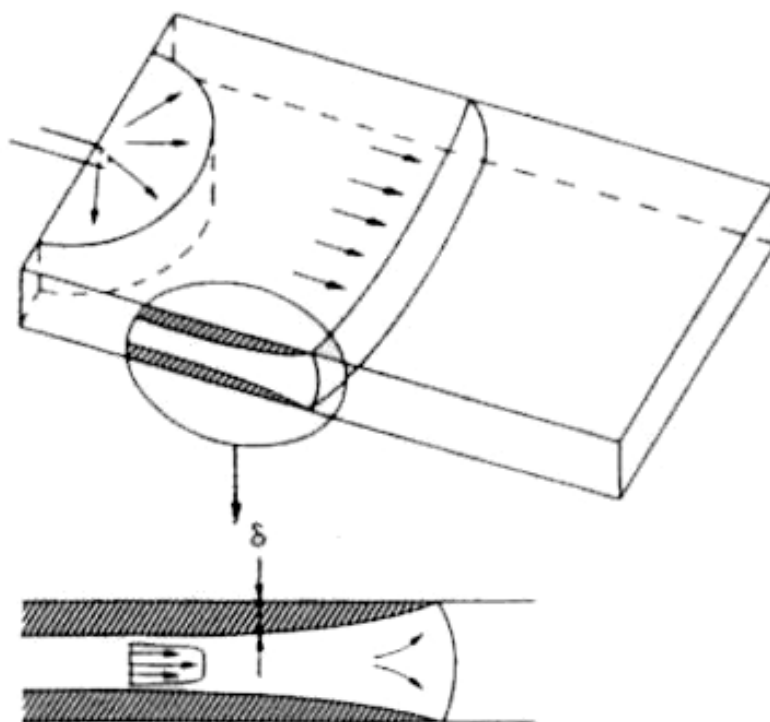
Η περιοχή περιορίζεται από τέσσερις καμπύλες. Κάτω από την καμπύλη της τήξης το πολυμερές είτε είναι στερεό ή δεν ρέει. Πάνω από την καμπύλη της κορυφής το πολυμερές υφίσταται θερμική αποικοδόμηση. Αριστερά από την καμπύλη της

ελλιπούς έγχυσης η κοιλότητα δεν γεμίζει πλήρως, και δεξιά από την καμπύλη της “υπερπλήρωσης” το τήγμα εκρέει από τα σημεία που ενώνονται τα ξεχωριστά τμήματα που απαρτίζουν το καλούπι και δημιουργούνται πλεονάζοντα κομμάτια στο μορφοποιημένο αντικείμενο.

Μια άλλη πρακτική προσέγγιση στην ερώτηση της ευχέρειας έγχυσης, ειδικά όταν συγκρίνονται μεταξύ τους διαφορετικά πολυμερή, είναι η χρήση καλουπιού τυποποιημένων διαστάσεων όπου η κοιλότητα μορφοποίησης έχει τη μορφή σπирάλ, και μετράται το μήκος πλήρωσης κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες έγχυσης.

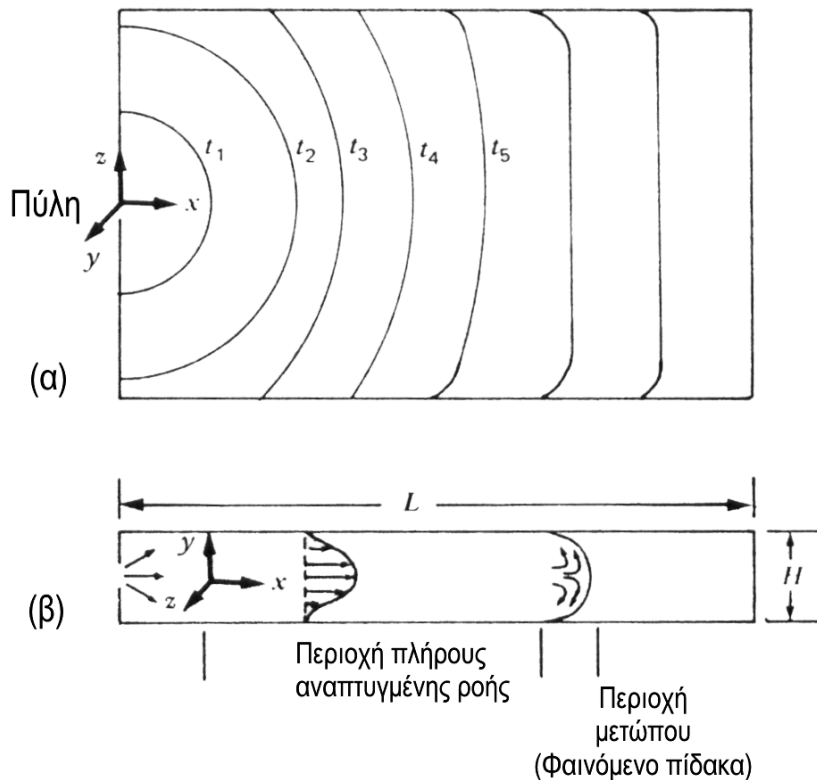
3.4.2 Το φαινόμενο πίδακα

Σε καλούπι ορθογώνιας διατομής το πολυμερικό τήγμα εισέρχεται από την πύλη εισόδου στην κοιλότητα υπό πίεση και προχωρεί κατά διαδοχικά μέτωπα (Σχήμα 3.19). Σε εγκάρσια απεικόνιση αυτής της ροής, τα στοιχεία του ρευστού κοντά στον κεντρικό άξονα κινούνται ταχύτερα από αυτά κοντά στα τοιχώματα και η ροή προχωρά κατά μέτωπα και παίρνει την *μορφή ενός πίδακα* (fountain-like pattern).



Σχήμα 3.19: Πλήρωση της κοιλότητας από μέτωπο πολυμερικού τήγματος.

Κατά τα πρώτα στάδια της πλήρωσης, η ροή είναι ακτινική και το αναπτυσσόμενο μέτωπο του τήγματος κυκλικό (Σχήμα 3.20α). Ο χαρακτήρας της ροής αλλάζει καθώς το μέτωπο του τήγματος απομακρύνεται από την πύλη, όπου το σχήμα του μετώπου είναι είτε επίπεδο για ισοθερμοκρασιακή πλήρωση ή καμπύλο για γέμισμα ψυχρού καλουπιού.



Σχήμα 3.20: Σχηματική παράσταση της ροής κατά την πλήρωση ορθογώνιας κοιλότητας της οποίας το πλάτος είναι πολύ μεγαλύτερο από πάχος της: (α) κάτοψη των μετώπων ροής σε διάφορα χρονικά διαστήματα, (β) πλάγια όψη του προφίλ της ταχύτητας στην περιοχή πλήρους αναπτυγμένης ροής και τη ροή τύπου πίδακα στην περιοχή του αναπτυσσόμενου μετώπου.

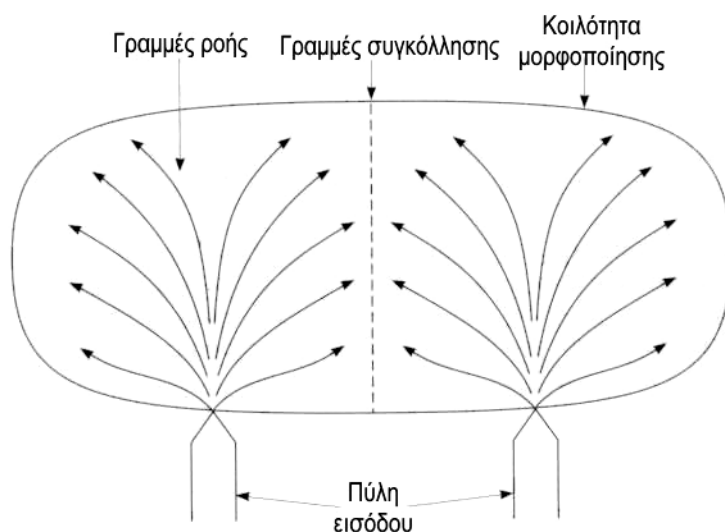
Κοντά στην πύλη εισόδου και μακριά από το μέτωπο, η ροή είναι πλήρως ανεπτυγμένη και αποτελεί ροή διάτμησης. Το τήγμα περνά από το κέντρο της κοιλότητας, φθάνει στο μέτωπο, γυρνά και εναποτίθεται στο τοίχωμα όπου και στερεοποιείται.

3.4.3 Γραμμές συγκόλλησης (weld lines)

Γραμμές συγκόλλησης δημιουργούνται στα σημεία που ενώνονται τα μέτωπα από διαφορετικά πεδία ροής. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται για παράδειγμα στην περίπτωση όπου σε μία κοιλότητα μορφοποίησης υπάρχουν περισσότερες από μία πύλες εισόδου (Σχήμα 3.21). Αυτό απαιτείται στην μορφοποίηση μεγάλων ή σύνθετων αντικειμένων όπου η πλήρης και ομαλή πλήρωση της κοιλότητας απαιτεί περισσότερες από μία εισόδους.

Για να αντιμετωπισθούν τα προβλήματα που επιφέρει η παρουσία των γραμμών συγκόλλησης θα πρέπει η έγχυση να γίνεται με τέτοιο ρυθμό ώστε η θερμοκρασία του τήγματος να διατηρείται σε υψηλά επίπεδα. Κατάλληλος ρυθμός πλήρωσης δημιουργεί θερμότητα λόγω ιξώδους τριβής και ισοσταθμίζει τη θερμότητα που μεταφέρεται από το τήγμα στο ψυχρό καλούπι. Η υψηλή θερμοκρασία του τήγματος

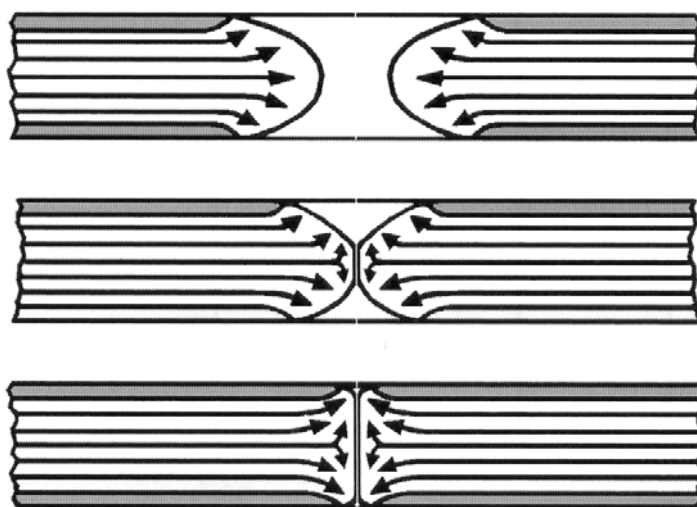
καθώς και επαρκής πίεση και διάρκεια της συμπίεσης περιορίζει την απώλεια των αντοχών λόγω των γραμμών συγκόλλησης.



Σχήμα 3.21: Γραμμή συγκόλλησης σε κοιλότητα μορφοποίησης δύο εισόδων.

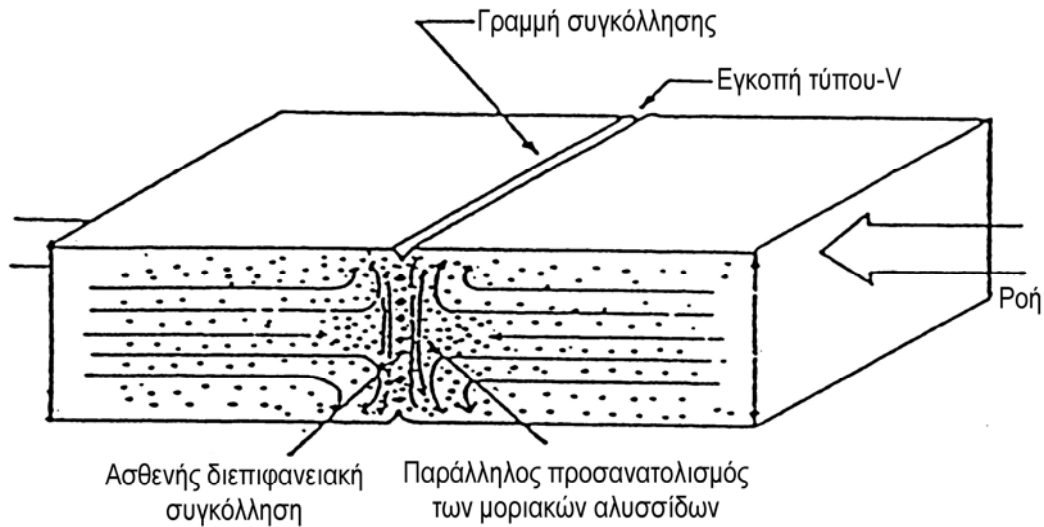
Οι γραμμές συγκόλλησης αποτελούν σημεία αδυναμίας του μορφοποιημένου αντικειμένου γιατί συμβαίνει ανεπαρκής συνένωση των δύο επιφανειών. Στα σημεία αυτά δημιουργούνται επίσης επιφανειακές ατέλειες με μορφές τύπου-V.

Οπτικές ατέλειες δημιουργούνται όταν επανενώνονται δύο διαφορετικά μέτωπα στην κοιλότητα, τα οποία έχουν παραβολικό σχήμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.22. Η ροή με μορφή πίδακα που εμφανίζουν τα πλαστικά όταν ρέουν σε αγωγούς ωθεί το τήγμα από την κεντρική γραμμή του μετώπου προς τα τοιχώματα. Όταν τα δύο μέτωπα συναντώνται, σχεδόν ακαριαία το πλαστικό γεμίζει την εγκοπή που δημιουργείται από την παραβολική μορφή του μετώπου με υλικό που προέρχεται από το κέντρο. Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα να περιορίζεται σημαντικά η εγκοπή τύπου-V από το μορφοποιημένο αντικείμενο.



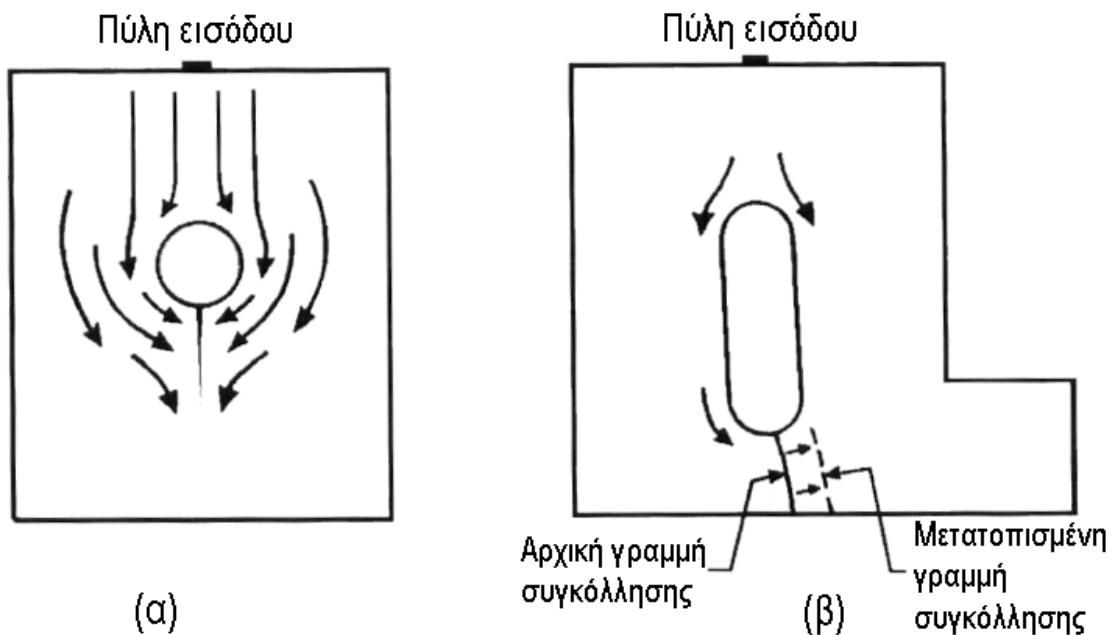
Σχήμα 3.22: Γραμμές συγκόλλησης όταν συναντώνται δύο διαφορετικά μέτωπα ροής.

Η εγκοπή τύπου-V δεν μπορεί να εξαλειφθεί πλήρως γιατί είναι το αποτέλεσμα του παγιδευμένου αέρα από κάθε επιφάνεια μέσα στο καλούπι (Σχήμα 3.23).



Σχήμα 3.23: Σχηματική απεικόνιση της εγκοπής τύπου-V.

Γραμμές συγκόλλησης δημιουργούνται επίσης όταν στη ροή ενός ρευστού παρεμβάλλεται ένα εμπόδιο, οπότε η ροή διαχωρίζεται και επανενώνεται. Στην περίπτωση αυτή όταν τα δύο μέτωπα επανενώνονται, η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια δεν αλλάζει πολύ και η γραμμή συγκόλλησης εξαφανίζεται καθώς αναπτύσσεται η ροή (Σχήμα 3.24α). Υπάρχει επίσης η περίπτωση, η ροή να μετατοπίσει τη γραμμή κάθετα στην αρχική φορά σχηματισμού της (Σχήμα 3.24β).



Σχήμα 3.24: Γραμμές συγκόλλησης με εμπόδιο στη ροή: (α) η γραμμή συγκόλλησης εξαφανίζεται μετά από κάποια απόσταση, (β) μετατόπιση της γραμμής συγκόλλησης κάθετα στην αρχική γραμμή.

3.4.4 Συρρίκνωση

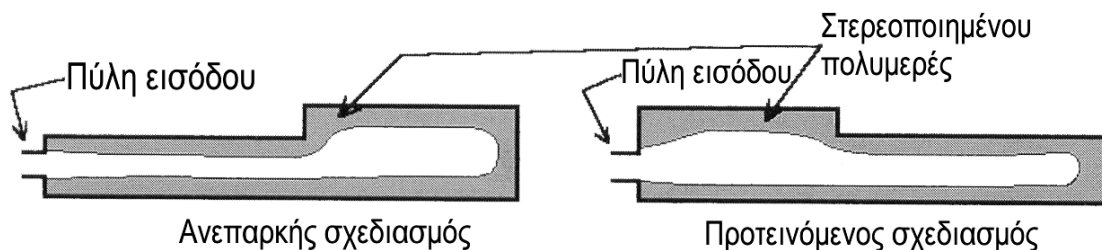
Η συρρίκνωση του καλουπιού (mold shrinkage) είναι η διαφορά στις διαστάσεις του τελικού αντικειμένου και στις διαστάσεις του καλουπιού, λόγω της θερμικής συστολής.

Το ποσοστό της συρρίκνωσης εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως:

- Η θερμοκρασία της ρητίνης
- Ο τύπος της ρητίνης
- Η ροή της ρητίνης στην κοιλότητα του καλουπιού
- Λειτουργικές παράμετροι όπως η πίεση έγχυσης και η χρονική διάρκεια εφαρμογής πίεσης στο καλούπι, η θέση της πύλης εισόδου στην κοιλότητα
- Πρόσθετα στη ρητίνη

Άμορφα πολυμερή (PVC, ABS, PS) παρουσιάζουν μικρότερη συρρίκνωση σε σύγκριση με περισσότερα κρυσταλλικά πολυμερή (νάυλον, πολυπροπυλένιο, πολυαιθυλένιο).

Στο Σχήμα 3.25 φαίνεται το πρόβλημα σχεδιασμού της θέσης της πύλης εισόδου σε πιο σύνθετα σχέδια αντικειμένων προς μορφοποίηση. Αν η πύλη εισόδου δεν τοποθετηθεί στο παχύτερο τμήμα του αντικειμένου (Σχήμα 3.25 ανεπαρκής σχεδιασμός), το λεπτότερο τμήμα θα ψυχθεί πρώτο και κατά συνέπεια η πίεση συμπίεσης δε θα είναι δυνατό να εξασκηθεί στο παχύτερο τμήμα το οποίο θα εξακολουθεί να ψύχεται και να συρρικνώνεται.



Σχήμα 3.25: Προτεινόμενη θέση της πύλης εισόδου, κατά το σχεδιασμό αντικειμένου με διαφοροποίηση στο πάχος.

Η αδυναμία να γίνει αποτελεσματική συμπίεση στο τμήμα του αντικειμένου με το μεγαλύτερο πάχος οδηγεί σε αυξημένο ποσοστό συρρίκνωσης των περιοχών αυτών.

3.4.5 Επίδραση της ροής στη συρρίκνωση

I. Προσανατολισμός προερχόμενος από διατμητικές τάσεις (shear-induced orientation)

Επίσης μια άλλη, όχι τόσο σημαντική, παράμετρος που επηρεάζει τη συρρίκνωση είναι ο προσανατολισμός των μορίων που προέρχεται από τη γεωμετρία του καλουπιού.

Κατά τη διαδικασία μορφοποίησης με έγχυση, το τήγμα του πολυμερούς ωθείται με πίεση από τον κύλινδρο τήξης στο ψυχρό καλούπι. Καθώς το τήγμα ρέει από τους αγωγούς διανομής προς την κοιλότητα μορφοποίησης, αναπτύσσεται πεδίο διατμητικών τάσεων μεταξύ του κινούμενου ρευστού και των ακίνητων τοιχωμάτων των αγωγών. Το πεδίο των διατμητικών τάσεων που προκύπτει επιδρά στο τήγμα και προσανατολίζει τις μοριακές αλυσίδες προς την κύρια φορά της παραμόρφωσης. Το ποσοστό του προσανατολισμού είναι συνάρτηση των εφαρμοζόμενων διατμητικών τάσεων, οι οποίες είναι συνήθως υψηλότερες από 100,000 Pa. Ο προσανατολισμός, δηλαδή η τάξη αυτή των μορίων, οδηγεί σε μια σχετικά υψηλής ενέργειας κατάσταση, γεγονός που μειώνει την εντροπία του συστήματος. Με την πάροδο του χρόνου, αν το τήγμα δεν ψυχθεί, χάνει τον προσανατολισμό του και επιστρέφει σε μια κατάσταση αυξημένης τυχαιότητας. Αυτή η δύναμη επαναφοράς μπορεί να περιγραφεί με τον όρο *ελαστικότητα της εντροπίας* (entropy elasticity). Λόγω ότι ο βασικός προσανατολισμός συμβαίνει στην κατεύθυνση της ροής, η επαναφορά στον τυχαίο προσανατολισμό θα μειώσει σημαντικά το μήκος της μάζας στη φορά της αρχικά εφαρμοζόμενης τάσης. Επομένως θα αυξηθεί η συρρίκνωση προς την κατεύθυνση της ροής, συγκριτικά με την εγκάρσια στη ροή κατεύθυνση.

Για οικονομικούς λόγους το καλούπι διατηρείται ψυχρό ώστε να ελαχιστοποιείται ο χρόνος μορφοποίησης του αντικειμένου. Ως αποτέλεσμα, τα εξωτερικά στρώματα της ροής του τήγματος, που έρχονται σε άμεση επαφή με τα τοιχώματα του καλουπιού στερεοποιούνται ακαριαία. Αυτός ο τρόπος ψύξης οδηγεί σε απότομη μείωση του ελεύθερου όγκου, περιορίζει οποιαδήποτε επαναφορά των μοριακών αλυσίδων και ο προσανατολισμός τους “παγώνει”. Η περιοχή υψηλού προσανατολισμού έχει ισχυρή τάση να συρρικνώνεται προς τη φορά του προσανατολισμού.

Το εξωτερικό στερεοποιημένο στρώμα απομονώνει τα εσωτερικά στρώματα του τήγματος από τα ψυχρά τοιχώματα του καλουπιού, η ψύξη γίνεται με αργότερους ρυθμούς και δίνεται χρόνος στις προσανατολισμένες μοριακές αλυσίδες για επαναφορά στην αρχική κατάσταση. Κατά συνέπεια σε αυτές τις περιοχές υπάρχει μικρότερο ποσοστό “ακίνητοποιημένου” προσανατολισμού και επομένως μικρότερη τάση για συρρίκνωση στην κατεύθυνση της ροής.

Η διαφοροποίηση στον προσανατολισμό και στην επαναφορά των μοριακών αλυσίδων συνεχίζεται σε εγκάρσια διατομή, σε οποιαδήποτε περιοχή του προς μορφοποίηση αντικειμένου. Σε όλο το πάχος και σε οποιαδήποτε θέση του αντικειμένου, υπάρχουν διαφοροποιήσεις στο ρυθμό ψύξης, στη φορά της ροής, και στις διατμητικές τάσεις που ασκούνται στο πολυμερές κατά τις φάσεις της έγχυσης και της συμπίεσης. Ο διαφορετικός βαθμός συρρίκνωσης που παρουσιάζεται μεταξύ

των διαφορετικών στρωμάτων, τα οποία συνδέονται μηχανικά μεταξύ τους, έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη *εσωτερικών τάσεων* (residual stress) γεγονός που συμβάλλει στη σκέβρωση και στην πρόωρη αστοχία του αντικειμένου.

Όπως αναφέρθηκε ο προσανατολισμός στα εξωτερικά στρώματα είναι μεγαλύτερος ως αποτέλεσμα των ισχυρότερων διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται κοντά στα τοιχώματα. Επίσης τα εξωτερικά στρώματα ψύχονται πιο γρήγορα, με αποτέλεσμα να “εγκλωβίζεται” ο προσανατολισμός των μοριακών αλυσίδων.

Στον κύκλο έγχυσης κατά τη φάση της συμπίεσης, δημιουργείται στένωση του πεδίου ροής λόγω της συνεχούς αύξησης στο πάχος του στερεοποιημένου εξωτερικού στρώματος. Καθώς τα εξωτερικά τοιχώματα του αγωγού ροής του τήγματος μεταφέρονται προς το εσωτερικό (το πάχος του στερεοποιημένου στρώματος αυξάνει), μεταφέρεται κατ’ ακολουθία προς το εσωτερικό και η περιοχή των υψηλών διατμητικών τάσεων. Ο μειωμένος ρυθμός ροής κατά τη φάση της συμπίεσης αναμένεται να μειώσει το ρυθμό διάτμησης, παρ’ όλα αυτά οι διατμητικές τάσεις διατηρούνται σε υψηλά επίπεδα καθώς υψηλές πιέσεις δρουν στο πιο ιξώδες πολυμερές. Εν τούτοις παρά την αύξηση στο πεδίο των διατμητικών τάσεων κοντά στο κέντρο, ο ρυθμός ψύξης σε αυτή την περιοχή είναι αρκετά χαμηλός, γεγονός που δίνει περισσότερο χρόνο για χαλάρωση στις μοριακές αλυσίδες. Όπως φαίνεται από τα παραπάνω η “καθαρή” συρρίκνωση των πλαστικών αντικειμένων κατά τη μορφοποίηση με έγχυση είναι αρκετά σύνθετο φαινόμενο και αποτελεί αποτέλεσμα συνδυασμού πολλών παραμέτρων.

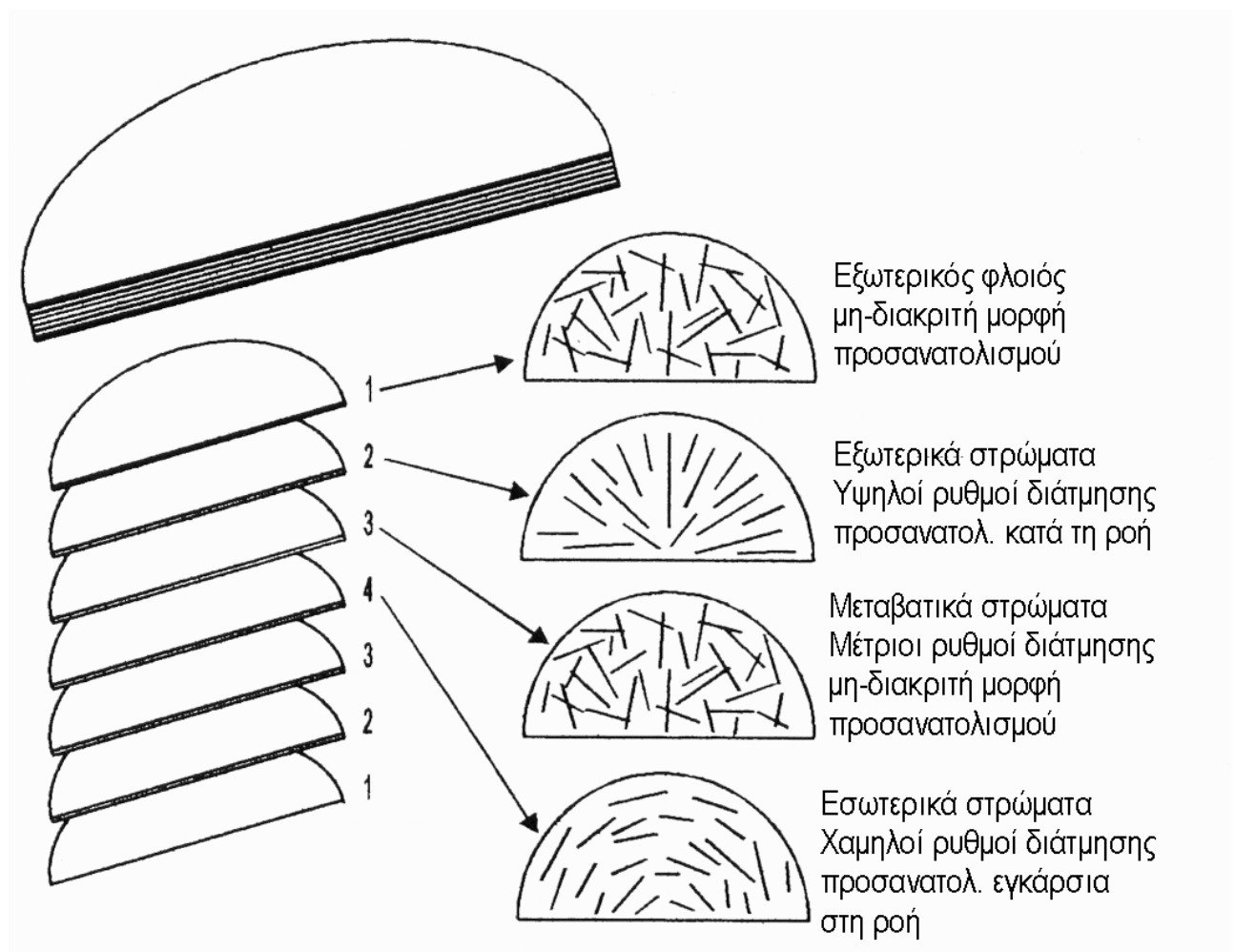
II. Προσανατολισμός προερχόμενος από ροή επιμήκυνσης (extensional flow-induced orientation)

Η συρρίκνωση των πλαστικών γίνεται ακόμη πιο πολύπλοκο φαινόμενο από τις δυνάμεις λόγω ροής επιμήκυνσης οι οποίες συμβαίνουν όταν έχουμε διαχωρισμό ή συνένωση της ροής. Σε ένα μακρύ και στενό αντικείμενο με πύλη εισόδου στο ένα άκρο, η ροή είναι αποκλειστικά γραμμική και δεν έχουμε παρεκτροπές. Σε αυτή την περίπτωση μόνο διατμητικές τάσεις επιδρούν και προσανατολίζουν το πολυμερές.

Σε αντιπαράθεση μπορούμε να αναφέρουμε την περίπτωση ενός δίσκου όπου το τήγμα εισέρχεται από το κέντρο και εξαπλώνεται προς την περιφέρεια καθώς γεμίζει η κοιλότητα. Καθώς το τήγμα διαχωρίζεται στην κοιλότητα η ροή του δεν είναι μόνο ακτινική από την πύλη εισόδου αλλά στην πραγματικότητα υπάρχει και μια συνιστώσα κάθετη σε αυτή την κατεύθυνση, η οποία αναφέρεται ως ροή επιμήκυνσης. Η συνθήκη αυτή είναι ανάλογη με την επιφάνεια ενός μπαλονιού που φουσκώνει και το οποίο υφίσταται τανυσμό κάθετα στην κατεύθυνση της διόγκωσής του. Αυτή η εκτατική ροή επιδρά στο πολυμερές και έχει ως αποτέλεσμα προσανατολισμό σε κατεύθυνση εγκάρσια στη ροή.

Επομένως η “καθαρή” συρρίκνωση επηρεάζεται όχι μόνο από τον προσανατολισμό της ροής αλλά και από το μηχανισμό που αυτή ακολουθεί (διατμητική ή επιμήκυνσης). Στο σχήμα 3.26, φαίνεται ο αναμενόμενος προσανατολισμός σε

εγκάρσια διατομή στο μισό κομμάτι δίσκου στον οποίο αναπτύσσεται ακτινική ροή. Στα εξωτερικά στρώματα κοντά στα τοιχώματα του καλουπιού, οι συνθήκες μηδενικής διάτμησης έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη τυχαίου προσανατολισμού. Μετά από αυτό το στρώμα αναμένεται ο κυρίαρχος μηχανισμός του προσανατολισμού να είναι οι διατμητικές τάσεις. Στο μεσαίο στρώμα της εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου το πεδίο των διατμητικών τάσεων εξαφανίζεται. Ως αποτέλεσμα στο κέντρο της εγκάρσιας διατομής του δίσκου υπερισχύουν οι εφελκυστικές δυνάμεις του αναπτυσσόμενου μετώπου της εκτατικής ροής, και προσανατολίζουν το πολυμερές κάθετα στη ροή. Στα ενδιάμεσα στρώματα μεταξύ των δύο ακραίων αυτών θέσεων εμφανίζονται και οι δύο τύποι δυνάμεων, δηλ. διατμητικές και εκτατικές. Ο τελικός προσανατολισμός σε αυτές τις περιοχές θα εξαρτάται από το ποιος τύπος δυνάμεων θα υπερισχύσει.



Σχήμα 3.26: Επίδραση της ροής διάτμησης και ροής επιμήκυνσης στην κατανομή του προσανατολισμού σε εγκάρσια στρώματα κατά το πάχος του αντικειμένου, στο οποίο αναπτύσσεται ακτινική ροή.

3.4.6 Σκέβρωση

Η σκέβρωση (warping) ενός αντικειμένου που μορφοποιείται με έγχυση προκύπτει από τη διαφοροποίηση στο βαθμό συρρίκνωσης στα διάφορα σημεία του. Η διαφοροποίηση στη συρρίκνωση προκαλεί την ανάπτυξη τάσεων σε όλη τη μάζα του αντικειμένου, οι οποίες μπορούν να αντιμετωπισθούν από την ακαμψία της δομής του. Οι τάσεις που αναπτύσσονται από τη διαφοροποίηση στη συρρίκνωση μπορούν να οδηγήσουν σε:

- i. άμεση σκέβρωση του αντικειμένου
- ii. πρόωρη αστοχία από την επίδραση των εσωτερικών τάσεων
- iii. κανένα εμφανές αποτέλεσμα λόγω της ικανότητας του υλικού και της γεωμετρίας του αντικειμένου να ανθίσταται στις αναπτυσσόμενες εσωτερικές τάσεις.

Όπως αναφέρθηκε διαφοροποίηση στη συρρίκνωση σε ένα μορφοποιημένο αντικείμενο έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων που μπορούν να οδηγήσουν στη σκέβρωση. Σκέβρωση επέρχεται όταν οι εσωτερικές τάσεις που αναπτύσσονται ξεπερνούν τη μηχανική αντοχή του μορφοποιημένου αντικειμένου.

Οι κυριότερες αιτίες που προκαλούν τη διαφοροποίηση στη συρρίκνωση είναι οι εξής:

Προσανατολισμός:

Όσο μεγαλύτερη είναι η έκταση του προσανατολισμού, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφοροποίηση στη συρρίκνωση που επιφέρει. Όσο μεγαλύτερες είναι οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά την έγχυση τόσο αυξάνει ο προσανατολισμός και οι εσωτερικές τάσεις, επομένως και η πιθανότητα για εμφάνιση σκέβρωσης. Υψηλές διατμητικές τάσεις συνήθως εμφανίζονται κοντά στην πύλη εισόδου και στην περιοχή όπου ολοκληρώνεται η πλήρωση της κοιλότητας. Θερμό καλούπτι μπορεί να επιτρέψει να χαλαρώσει κατά ένα μέρος ο προσανατολισμός των μοριακών αλυσίδων.

Τοπική ογκομετρική συρρίκνωση:

Διαφοροποίηση στην ογκομετρική συρρίκνωση προέρχεται από τη διαφοροποίηση στο πάχος των τοιχωμάτων, στις πιέσεις και στον τρόπο ψύξης του αντικειμένου. Περιοχές ενός αντικειμένου με λεπτά τοιχώματα, ή περιοχές που μορφοποιούνται με υψηλή πίεση ή σε χαμηλές θερμοκρασίες αναμένεται να παρουσιάζουν μικρότερη συρρίκνωση από ότι περιοχές μεγαλύτερου πάχους ή τμήματα που μορφοποιούνται σε χαμηλές πιέσεις ή σε υψηλές θερμοκρασίες.

Ψύξη:

Γενικά αναμένεται σε ένα θερμό καλούπτι οι μοριακές αλυσίδες να χαλαρώνουν και να μειώνεται κατά ένα μέρος ο αρχικός προσανατολισμός τους. Αντίθετη συμπεριφορά παρατηρείται σε ένα ψυχρό καλούπτι.

Η θερμοκρασία του καλουπιού επηρεάζει τη θερμική συστολή, και την κρυσταλλικότητα που αναπτύσσεται στα ημικρυσταλλικά πολυμερή. Περιοχές που

μορφοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες αναμένεται να παρουσιάζουν μεγαλύτερη συρρίκνωση σε σύγκριση με τη μορφοποίηση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Επίσης περιοχές που υφίστανται υψηλές πιέσεις κατά τη φάση της πλήρωσης της κοιλότητας και της συμπίεσης, συρρικνώνονται λιγότερο από τις περιοχές που έχουν μορφοποιηθεί σε χαμηλές πιέσεις. Υψηλές πιέσεις ασκούνται στην περιοχή κοντά στην πύλη εισόδου της κοιλότητας και μειώνονται όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο αυτό.

Υπάρχουν τρεις λειτουργικές παράμετροι που επηρεάζουν τη διαφοροποίηση στη συρρίκνωση και κατ' επέκταση στη σκέβρωση του αντικειμένου:

- Χρόνος ψύξης
- Θερμοκρασία ψύξης
- Κατανομή της ψύξης στην κοιλότητα μορφοποίησης.

Αυξημένοι χρόνοι ψύξης σε δεδομένη θερμοκρασία καλουπιού επιτρέπουν στο υλικό να γίνει πιο άκαμπτο και επομένως να ανθίσταται στη σκέβρωση. Ένα σχετικά θερμό καλούπι αναμένεται να περιορίσει τον προσανατολισμό των μοριακών αλυσίδων και τις αναπτυσσόμενες εσωτερικές τάσεις. Επίσης ο σχεδιασμός του συστήματος ψύξης στο καλούπι επηρεάζει τον τρόπο ψύξης του αντικειμένου, καθώς έλλειψη συμμετρίας στον τρόπο ψύξης οδηγεί σε ανομοιόμορφη ψύξη του αντικειμένου.

3.4.7 Επίδραση της παραγωγικής διαδικασίας στις μηχανικές ιδιότητες του μορφοποιημένου αντικειμένου

Σχεδόν όλα τα θερμοπλαστικά πολυμερή που μορφοποιούνται με έγχυση παρουσιάζουν ανισοτροπία στις μηχανικές ιδιότητες, γεγονός που αποδίδεται στον προσανατολισμό που προέρχεται κατά τη ροή του τήγματος. Όσο περισσότερο προσανατολίζεται ένα πολυμερές τόσο μεγαλύτερη είναι η ανισοτροπία που παρουσιάζει. Ο τελικός προσανατολισμός ενός μορφοποιημένου αντικειμένου είναι συνάρτηση των διατμητικών τάσεων, του ρυθμού ψύξης και των ροϊκών πεδίων που αναπτύσσονται. Οι υψηλές διατμητικές τάσεις αποτελούν, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τη δύναμη που προσανατολίζει τις αλυσίδες του πολυμερούς. Όσο πιο γρήγορα γίνεται η ψύξη τόσο μεγαλύτερο ποσοστό προσανατολισμού διατηρείται στο τελικό αντικείμενο. Σε ένα αντικείμενο με λεπτά τοιχώματα αναπτύσσονται υψηλές διατμητικές τάσεις και ψύχεται πιο γρήγορα, επομένως αναμένεται να εμφανίζονται εντονότερα τα χαρακτηριστικά της ανισοτροπίας στις ιδιότητες από ότι σε αντικείμενο μεγαλύτερου πάχους.

Σε θερμότερο καλούπι ή σε αντικείμενο με σημαντικό πάχος, δίνεται περισσότερος χρόνος στις προσανατολισμένες αλυσίδες να χαλαρώσουν ή στην περίπτωση των ημικρυσταλλικών πολυμερών δίνεται χρόνος για το σχηματισμό μεγαλύτερων και περισσότερων κρυσταλλινών.

Επίσης η μεταφορά θερμότητας είναι επαρκής για τις μοριακές αλυσίδες που βρίσκονται κοντά στα τοιχώματα της κοιλότητας. Κατά συνέπεια είναι αυξημένη η πιθανότητα να “παγώσει” ο προσανατολισμός των μοριακών αλυσίδων που έχει επέλθει λόγω ροής, για τα στρώματα του πολυμερούς που είναι κοντά στην επιφάνεια σε σύγκριση με τα εσωτερικά στρώματα.

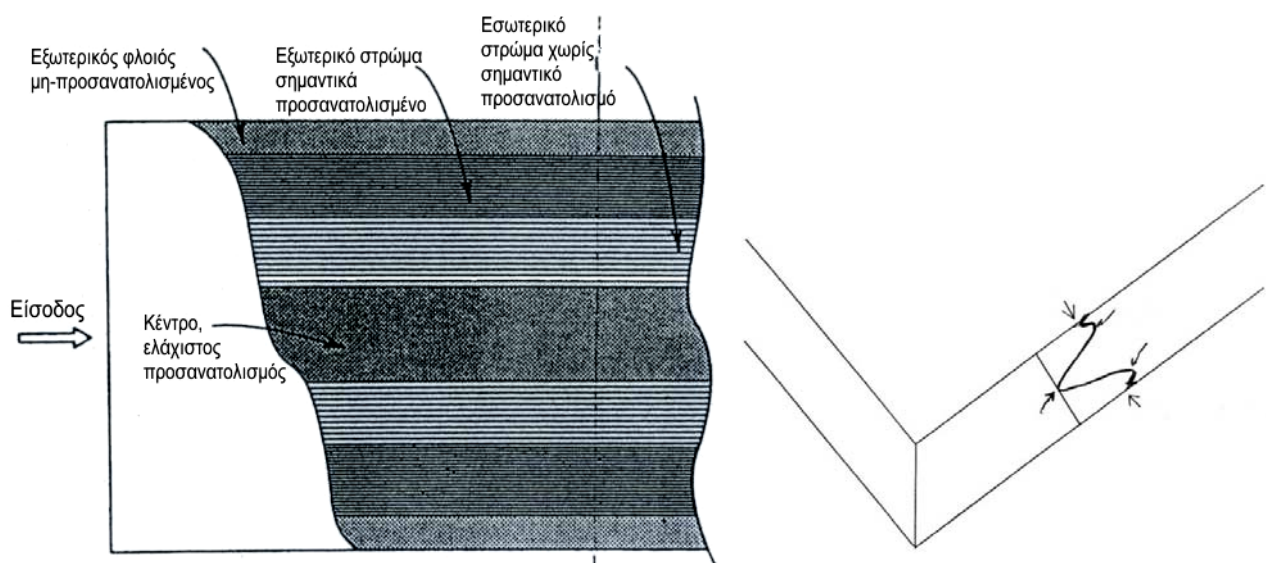
Επομένως αναμένεται ο ακόλουθος προσανατολισμός από το κέντρο προς το εξωτερικά στρώματα του μορφοποιημένου αντικειμένου:

(α) κοντά στο κέντρο ελάχιστος προσανατολισμός λόγω του ότι η βαθμίδα των διατμητικών τάσεων είναι σχεδόν μηδενική

(β) όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο έχουμε αύξηση του προσανατολισμού λόγω διατμητικής ροής η οποία φθάνει στο μέγιστο, ενώ παράλληλα όσο πλησιάζουμε στα τοιχώματα έχουμε ταχύτερη ψύξη

(γ) κοντά στα τοιχώματα έχουμε κάποιο προσανατολισμό λόγο διάτμησης (η βαθμίδα διάτμησης έχει χαμηλές τιμές) και επιπροσθέτως προσανατολισμό λόγω ροής επιμήκυνσης που αποδίδεται στο φαινόμενο της ροής τύπου πίδακα

(δ) στην περιοχή των τοιχωμάτων υπάρχει ελάχιστος προσανατολισμός που αποδίδεται στη ροή επιμήκυνσης λόγω του φαινομένου του πίδακα.



Σχήμα 3.27: Διαφοροποίηση του προσανατολισμού σε συνάρτηση με την απόσταση.

Το προσανατολισμένο πλαστικό αν φορτισθεί σε εφελκυσμό κατά τη φορά προσανατολισμού, το υλικό θα παρουσιάσει μεγαλύτερες αντοχές και ελατή θραύση.

Οι παράμετροι που έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στον προσανατολισμό είναι:

- Η θερμοκρασία του τήγματος
- Ο ρυθμός έγχυσης
- Η πίεση συμπίεσης και
- Ο ρυθμός ψύξης

Έχει αποδειχθεί ότι μείωση της θερμοκρασίας του τήγματος οδηγεί σε μέγιστη τάση και παραμόρφωση κατά τη δοκιμή σε εφελκυσμό. Χαμηλότερη θερμοκρασία τήγματος έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερες τιμές ιξώδους και επομένως αύξηση των διατμητικών τάσεων στο πολυμερές, οι οποίες οδηγούν σε μεγαλύτερο προσανατολισμό στην κατεύθυνση της ροής. Ανάλογη συμπεριφορά παρουσιάζεται όταν χρησιμοποιούνται γρήγοροι ρυθμοί έγχυσης.

Ο χρόνος και η πίεση συμπίεσης αυξάνουν τον προσανατολισμό κατά τον κύκλο μορφοποίησης. Παρά το γεγονός ότι κατά τη φάση αυτή ο ρυθμός ροής και διάτμησης είναι σημαντικά χαμηλότερος, το αυξημένο ιξώδες του πολυμερούς κατά τη φάση της ψύξης οδηγεί στην ανάπτυξη υψηλών διατμητικών τάσεων. Επιπλέον σε συνθήκες υψηλών διατμητικών τάσεων, το τήγμα αρχίζει να στερεοποιείται “δεσμεύοντας” μεγαλύτερο ποσοστό προσανατολισμού.

Επίσης οι μηχανικές ιδιότητες επηρεάζονται σημαντικά από τον τοπικό ρυθμό ψύξης. Όσο πιο γρήγορα γίνεται η ψύξη τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του προσανατολισμού των μοριακών αλυσίδων που “παγώνει” στο τελικό μορφοποιημένο αντικείμενο.

Σε ημικρυσταλλικά πολυμερή η ανάπτυξη της μέγιστης κρυσταλλικότητας προϋποθέτει θερμότητα και χρόνο. Επομένως στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται χαμηλότερες θερμοκρασίες καλουπιού και γεωμετρίες αντικειμένων με λεπτά τοιχώματα, οι ρυθμοί ψύξης που αναπτύσσονται είναι πολύ υψηλοί για να επιτρέψουν να αναπτυχθεί πλήρως η κρυσταλλική του δομή, η οποία θα δώσει στο αντικείμενο τις αντίστοιχες ιδιότητες. Αντίθετα, σε αντικείμενα με διατομή αυξημένου πάχους, οι υψηλές θερμοκρασίες διατηρούνται για περισσότερο χρόνο, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται υψηλότερα ποσοστά κρυσταλλικότητας.

3.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ

Μια πλήρης προσομοίωση της διαδικασίας πλήρωσης ενός καλουπιού που χρησιμοποιείται στη μορφοποίηση με έγχυση, απαιτεί τον υπολογισμό του προφίλ της ταχύτητας και της θερμοκρασίας σε όλη την περιοχή ροής καθώς επίσης τη θέση και τη μορφή του αναπτυσσόμενου μετώπου. Αυτό θα ήταν επαρκές κατ’ αρχήν για τον προσδιορισμό της κατανομής του προσανατολισμού των μοριακών αλυσίδων, η οποία επηρεάζει τη μορφολογία του προς μορφοποίηση αντικειμένου και η οποία αναπτύσσεται κατά την ψύξη και τη στερεοποίησή του. Αν ήταν διαθέσιμο ένα τέτοιο πλήρες μοντέλο, θα αποτελούσε βοηθητικό εργαλείο για το θεωρητικό σχεδιασμό του καλουπιού καθώς και την αριστοποίηση των συνθηκών μορφοποίησης για να επιτευχθούν συγκεκριμένες απαιτήσεις ιδιοτήτων για τα παραγόμενα αντικείμενα.

Το πρόβλημα αυτό είναι σύνθετο ακόμα και για απλές γεωμετρίες καλουπιών και γίνεται εξαιρετικά δύσκολο να επιλυθεί στην περίπτωση πολύπλοκων σχημάτων. Εντούτοις σημαντικές πληροφορίες μπορούν να ληφθούν απομονώνοντας

ξεχωριστές “περιοχές ροής” για την προσομοίωση της διεργασίας πλήρωσης. Κάθε τέτοια περιοχή απαιτεί ξεχωριστή προσέγγιση και μαθηματική ανάλυση.

Από το Σχήμα 3.20(β) μπορούμε να διακρίνουμε τις ακόλουθες περιοχές για την ανάλυση της διεργασίας:

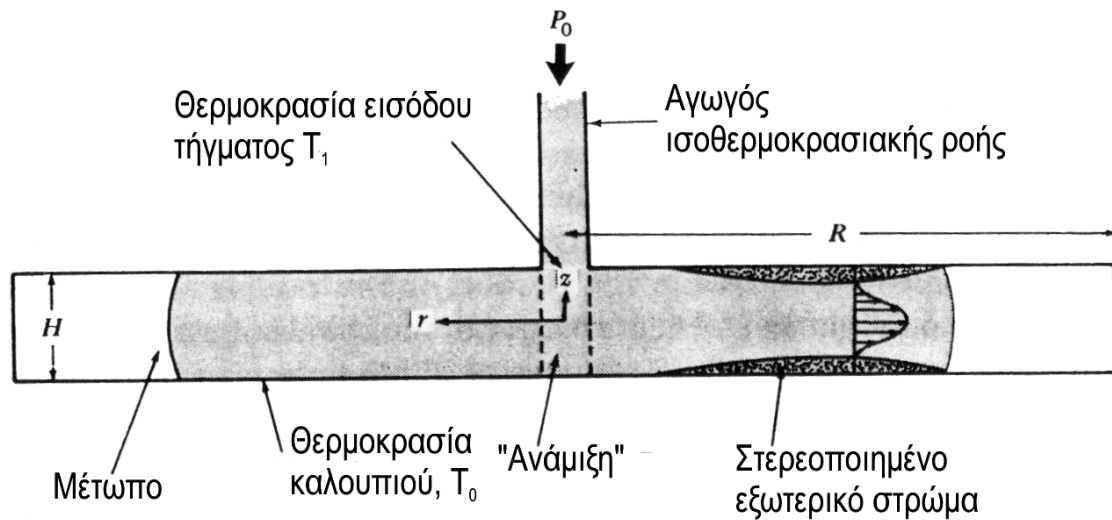
- i. Η περιοχή της “πλήρους” αναπτυγμένης ροής. Κατά τη διαδικασία της πλήρωσης το μεγαλύτερο μέρος του τήγματος ρέει σε σχεδόν πλήρως αναπτυγμένη ροή, στο στενό διάκενο που δημιουργείται μεταξύ των ψυχρών τοιχωμάτων. Η φύση αυτής της ροής προσδιορίζει το χρόνο που απαιτείται για την πλήρωση της κοιλότητας και τον προσανατολισμό του αντικειμένου, καθώς επίσης και την πιθανότητα να συμβεί “ελλιπής” πλήρωση.
- ii. Στην περιοχή κοντά στο μέτωπο. Η περιοχή αυτή προσδιορίζει τις ιδιότητες της εξωτερικής επιφάνειας του αντικειμένου (δημιουργία φλοιού) καθώς και τη δημιουργία γραμμών συγκόλλησης.
- iii. Η περιοχή της πύλης εισόδου στην κοιλότητα μορφοποίησης. Αυτή η περιοχή είναι καθοριστική στην έναρξη της διαδικασίας πλήρωσης της κοιλότητας. Η συνεισφορά της μειώνεται καθώς το θερμό τήγμα προωθείται στο εσωτερικό της κοιλότητας.

Υπενθυμίζεται ότι ο τρόπος που γίνεται η πλήρωση του καλουπιού – και καθορίζεται από τη θέση του αναπτυσσόμενου μετώπου του τήγματος – επηρεάζει τη θέση των γραμμών συγκόλλησης, την κατανομή του προσανατολισμού και μπορεί να είναι η αιτία για τυχόν ελλιπή πλήρωση του καλουπιού.

3.5.1 Περιοχή πλήρους αναπτυγμένης ροής

Στην ανάλυση που ακολουθεί θα μελετηθεί πολυμερικό τήγμα που γεμίζει κοιλότητα τύπου δίσκου. Η πύλη εισόδου είναι τοποθετημένη στο κέντρο του δίσκου (Σχήμα 3.28).

Θα χρησιμοποιηθεί σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων (r,z) . Κατά τη διαδικασία πλήρωσης της κοιλότητας δημιουργείται ένα στερεοποιημένο επιφανειακό στρώμα, το οποίο μειώνει την εγκάρσια διατομή της περιοχής ροής του τήγματος.



Σχήμα 3.28: Σχηματική παράσταση εγκάρσιας τομής της διεργασίας χύτευσης σε κοιλότητα μορφοποίησης σχήματος δίσκου με κεντρική τροφοδοσία. Παρουσιάζεται το στερεοποιημένο εξωτερικό στρώμα και το προφίλ της ταχύτητας που αναπτύσσεται.

Υποθέτοντας σταθερές θερμοδυναμικές ιδιότητες, ημι-μόνιμες συνθήκες, $\partial v_r / \partial t = 0$ και αγνοώντας τις τ_{rr} και $\tau_{\theta\theta}$ η εξίσωση διατήρησης της ορμής στην r -κατεύθυνση καθώς και η αρχή διατήρησης της ενέργειας δίνουν:

$$\frac{d\tau_{zr}}{dz} = -\frac{dP}{dr} \quad [3.7]$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \tau_{\theta\theta} \frac{v_r}{r} - \tau_{zr} \frac{\partial v_r}{\partial z} \quad [3.8]$$

Ο όρος $(\tau_{zr}(v_r/r))$ είναι σημαντικός μόνο για μικρές τιμές του r .

Επίσης χρησιμοποιείται ο εκθετικός νόμος :

$$\tau_{zr} = -m \left| \frac{dv_z}{dz} \right|^{n-1} \frac{dv_r}{dz} \quad [3.9]$$

Η πτώση της πίεσης στην ακτινική κατεύθυνση, δίνεται από τη σχέση :

$$\left| \frac{dP}{dr} \right| = \left[\frac{Q(t)}{4\pi r \int_0^{H/2} (z^{1+s} / m^s) dz} \right]^{1/s} \quad \text{όπου } s=1/n. \quad [3.10]$$

Η ταχύτητα λαμβάνεται με ολοκλήρωση της εξίσωσης [3.7] και χρησιμοποιώντας την [3.10]

$$v_r(r, z, t) = - \left| \frac{dP}{dr} \right|^s \int_{H/2}^z \left(\frac{z}{m} \right)^s dz \quad [3.11]$$

Ο δείκτης συνοχής m παίρνει διαφορετικές τιμές σε συνάρτηση με την θέση z , γιατί η θερμοκρασία διαφοροποιείται κατά το πάχος του δίσκου.

Επίσης στην εξίσωση της ενέργειας [3.8], στη θέση του μετώπου $r=r_{ik}$ πρέπει να ληφθεί υπόψη η θερμότητα που μεταφέρεται από το τήγμα στον αέρα που υπάρχει στο καλούπι:

$$\frac{2r_{ik} h (T_{ik} - T_{\alpha})}{r_{ik}^2 - r_{ik-1}^2} \quad [3.12]$$

και ο όρος αυτός να προστεθεί στο δεξί της σκέλος, όπου h ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον αέρα.

Στα τοιχώματα του καλουπιού έχουμε:

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=H/2} = h \left[T_0 - T \left(r, \frac{H}{2}, t \right) \right] \quad [3.13]$$

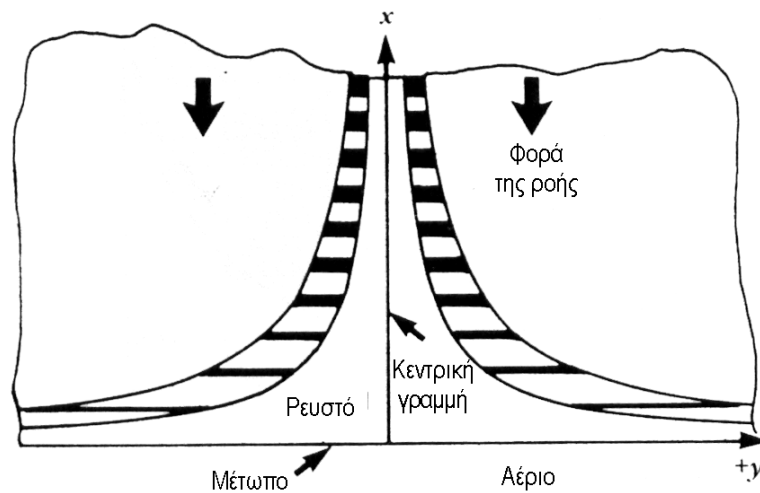
όπου T_0 είναι η θερμοκρασία στο κυρίως σώμα του καλουπιού και h ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ο οποίος είναι ίσος με $k_{\text{καλουπιού}} / d$, όπου d είναι η απόσταση από την επιφάνεια προς το εσωτερικό του καλουπιού όπου η θερμοκρασία είναι T_0 .

Από την παραπάνω ανάλυση με κατάλληλες παραδοχές οδηγούμαστε σε χρήσιμα συμπεράσματα για την έγχυση διαφόρων πλαστικών, όπως:

- ⇒ Σημαντική παράμετρος που προσδιορίζει τον υπολογισμό του χρόνου πλήρωσης, είναι ο λόγος της θερμότητας που παράγεται λόγω ιξώδους τριβής προς τη θερμότητα που χάνεται από μεταφορά στα ψυχρά τοιχώματα του καλουπιού. Όταν ο λόγος αυτός είναι κοντά στη μονάδα, οι υπολογισμοί γίνονται θεωρώντας ισοθερμοκρασιακές συνθήκες ροής.
- ⇒ Η κλίση της καμπύλης χρόνου πλήρωσης σε συνάρτηση της θερμοκρασίας του τήγματος εξαρτάται από την ενέργεια ενεργοποίησης της ροής, η οποία συνδέεται με τη θερμοκρασιακή ευαισθησία του δείκτη συνοχής m του τήγματος.
- ⇒ Η κλίση της καμπύλης χρόνου πλήρωσης σε συνάρτηση με την πίεσης έγχυσης, εξαρτάται από την τιμή του δείκτη ρεολογικής συμπεριφοράς n , και αυξάνει με τη μείωση του n .
- ⇒ Σχεδόν ισοθερμοκρασιακές συνθήκες υπερτερούν στη μέση της απόστασης από τα τοιχώματα, όπου το προφίλ της ταχύτητας είναι σταθερό και η μεταφορά θερμότητας είναι αμελητέα.
- ⇒ Το πάχος του στερεοποιημένου στρώματος μειώνεται με την αύξηση της πίεσης, τη θερμοκρασία του τήγματος και του καλουπιού καθώς και το πάχος του καλουπιού. Το σχήμα του στερεοποιημένου στρώματος χαρακτηρίζεται από ένα μέγιστο. Κοντά στην είσοδο, το θερμό εισερχόμενο τήγμα διατηρεί το πάχος του στρώματος στην ελάχιστη τιμή. Επίσης το ίδιο συμβαίνει στην περιοχή κοντά στο μέτωπο, όπου το τήγμα που φθάνει στα τοιχώματα είναι θερμό γιατί προέρχεται από την περιοχή του κέντρου.

3.5.2 Περιοχή μετώπου

Η περιοχή του μετώπου μελετήθηκε από τον Tadmor σε μια προσπάθεια να μοντελοποιήσει την παρατηρούμενη κατανομή του μοριακού προσανατολισμού σε μορφοποιημένα αντικείμενα. Σύμφωνα με το μοντέλο που προτάθηκε από τον Tadmor, ο προσανατολισμός στην περιοχή κοντά στα τοιχώματα και στην εγκάρσια διεύθυνση προέρχεται από τη ροή με μορφή πίδακα στην περιοχή του αναπτυσσόμενου μετώπου, ενώ το υπόλοιπο μέρος του προσανατολισμού προέρχεται από τη ροή διάτμησης στη φορά του μετώπου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.29, ένα στοιχείο του ρευστού που βρίσκεται στο κέντρο και ακριβώς πίσω από το αναπτυσσόμενο μέτωπο, στην περιοχή της ροής με μορφή πίδακα, θεωρείται ότι βρίσκεται υπό σταθερή ροή επιμήκυνσης.



Σχήμα 3.29: Σχηματική αναπαράσταση της ροής στο κέντρο του μετώπου τήγματος που ρέει μεταξύ παράλληλων πλακών. Το σύστημα συντεταγμένων μετακινείται στην x-κατεύθυνση με την ταχύτητα του μετώπου. Τα μαύρα ορθογώνια πλαίσια δηλώνουν την παραμόρφωση από επιμήκυνση των σωματιδίων του ρευστού.

Ειδικά, για ροή σε στενούς αγωγούς, το προφίλ της ταχύτητας σε ένα σύστημα συντεταγμένων το οποίο τοποθετείται στο αναπτυσσόμενο μέτωπο και κινείται μαζί του, με μέση ταχύτητα $\langle v \rangle$, η οποία είναι:

$$v_x = -\dot{\epsilon}x, v_y = \dot{\epsilon}y \quad \text{και} \quad v_z = 0. \quad [3.14]$$

Ο μοριακός προσανατολισμός είναι συνάρτηση του ρυθμού επιμήκυνσης, ο οποίος μπορεί να εκτιμηθεί θεωρώντας ότι η μέγιστη ταχύτητα $v_{x \max}$, κατά τη φορά του αναπτυσσόμενου μετώπου, πέφτει μετά από κάποια απόσταση στη μέση ταχύτητα του μετώπου $\langle v \rangle$. Θεωρώντας ότι η απόσταση αυτή είναι της τάξης του διάκενου, λαμβάνεται ο ακόλουθος ρυθμός επιμήκυνσης:

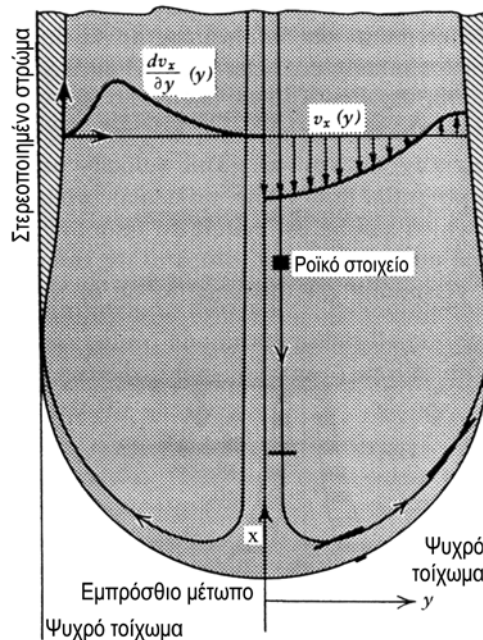
$$\dot{\epsilon} = \frac{dv_y}{dy} = -\frac{dv_x}{dx} = \frac{\langle v \rangle - v_{\max}}{H} \quad [3.15]$$

Στην περίπτωση που η $v_{\max}$ λαμβάνεται από την πλήρως αναπτυγμένη ροή ενός ρευστού που υπακούει στον εκθετικό νόμο και ρέει μεταξύ παράλληλων πλακών, τότε:

$$-\dot{\varepsilon} = \left(\frac{n}{n+1} \right) \frac{\langle v \rangle}{H} \quad [3.16]$$

Ο ρυθμός επιμήκυνσης σύμφωνα με αυτό το μοντέλο αυξάνει με την αύξηση του ρυθμού έγχυσης, με την μείωση του διάκενου, και με την αύξηση του n .

Είναι φανερό ότι η ροή τύπου πίδακα δεν είναι ακριβώς η σταθερή ροή επιμήκυνσης όπως περιγράφεται από την εξίσωση [3.16]. Επίσης, η μορφή του μετώπου δεν είναι επίπεδη αλλά κυρτώνει προς τα πίσω και εφάπτεται στα τοιχώματα στη θέση $y = \pm H/2$. Επομένως, ένα στοιχείο ροής το οποίο ήταν προσανατολισμένο από τη ροή πίδακα στην y -κατεύθυνση, εναποτίθεται στα ψυχρά τοιχώματα με προσανατολισμό στην x -κατεύθυνση (Σχήμα 3.30).



Σχήμα 3.30: Σχηματική αναπαράσταση του μετώπου ροής από έγχυση μεταξύ παράλληλων ψυχρών τοιχωμάτων. Τα μαύρα ορθογώνια πλαίσια δηλώνουν ότι η επιμήκυνση και τον προσανατολισμό για στοιχείο ροής το οποίο προσεγγίζει το μέτωπο από την περιοχή στο κέντρο της ροής. Η καμπύλη μορφή του μετώπου προσανατολίζει τα ροϊκά στοιχεία στην y -κατεύθυνση όπου συναντούν τα τοιχώματα και στη συνέχεια προσανατολίζονται στην x -κατεύθυνση. Το προφίλ της ταχύτητας κατά τη φορά του μετώπου είναι προσδιορισμένο από σύστημα συντεταγμένων που είναι τοποθετημένο στο μέτωπο.

Αποτέλεσμα της ροής τύπου πίδακα είναι ότι ένα προσανατολισμένο στρώμα πολυμερούς που προέρχεται από τον κεντρικό πυρήνα του αναπτυσσόμενου μετώπου και υφίσταται σταθερό ρυθμό επιμήκυνσης, όπως δίνεται από την εξίσωση [3.16], εναποτίθεται στα ψυχρά τοιχώματα του καλουπιού. Το εξωτερικό στρώμα με

την επαφή με τα ψυχρά τοιχώματα στερεοποιείται διατηρώντας τον μέγιστο προσανατολισμό λόγω επιμήκυνσης. Όσο απομακρυνόμαστε από τα τοιχώματα επικρατεί μοριακή χαλάρωση και ο προσανατολισμός μειώνεται. Η τελική κατανομή του προσανατολισμού στο εξωτερικό στρώμα είναι συνάρτηση του ρυθμού ψύξης και του φάσματος των χρόνων χαλάρωσης. Για ροή σε στενό διάκενο ο μηχανισμός ροής τύπου πίδακα και το μοντέλο προσανατολισμού που μόλις περιγράφηκε, οδηγούν σε μονοαξονικό προσανατολισμό του εξωτερικού στρώματος στη φορά που αναπτύσσεται το μέτωπο. Στην περίπτωση που η εγκάρσια διατομή της ροής έχει μεγάλο βάθος, η ροή τύπου πίδακα οδηγεί σε διαξονικό προσανατολισμό.

Όπως αναφέρθηκε σε απόσταση από την επιφάνεια, η πλήρως αναπτυγμένη διατμητική ροή πίσω από το μέτωπο είναι η κύρια αιτία του μοριακού προσανατολισμού η οποία συναντάται στο τελικό μορφοποιημένο αντικείμενο. Ο προσανατολισμός λόγω διάτμησης είναι συνάρτηση του ρυθμού διάτμησης ο οποίος διαφοροποιείται μέσα στο διάκενο. Σε πλήρως αναπτυγμένη ροή σε καλούπι με ψυχρά τοιχώματα, ο ρυθμός διάτμησης $\dot{\gamma}$ είναι περίπου μηδενικός στην περιοχή που είναι σε άμεση επαφή με τα τοιχώματα, παρουσιάζει μέγιστο κοντά στα τοιχώματα και παίρνει πολύ χαμηλές τιμές στο κέντρο (Σχήμα 3.30). Κατά συνέπεια η αρχική κατανομή του προσανατολισμού λόγω διάτμησης σε οποιαδήποτε θέση μέσα στην κοιλότητα μορφοποίησης, προσδιορίζεται από την τοπική κατανομή του ρυθμού διάτμησης τη στιγμή της έγχυσης. Κατά συνέπεια ο προσανατολισμός λόγω διάτμησης είναι μιας κατεύθυνσης στη φορά της ροής. Αυτός ο αρχικός προσανατολισμός λόγω διάτμησης χαλαρώνει σε διαφορετικά επίπεδα και εξαρτάται από το ρυθμό ψύξης και το φάσμα χαλάρωσης.

Η πλήρης εικόνα της κατανομής του προσανατολισμού μπορεί να δοθεί λαμβάνοντας υπόψη τον προσανατολισμό λόγω επιμήκυνσης και διάτμησης. Πρέπει να αναφερθεί ότι ποιος από τους δύο μηχανισμούς προσδιορίζει τον προσανατολισμό και την κατανομή του, εξαρτάται από τις ιδιότητες του πολυμερούς, τις συνθήκες έγχυσης και από τη γεωμετρία του καλουπιού.

3.5.3 Συνολική ροή

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό στοιχείο των καλουπιών έγχυσης είναι η πολύπλοκη γεωμετρία τους. Σε τέτοια καλούπια υπάρχει ανάγκη για την πρόβλεψη της συνολικής μορφής της ροής, η οποία στη συνέχεια δίνει πληροφορίες για τον τρόπο πλήρωσης των διαφορετικών κομματιών του καλουπιού, καθώς και για φαινόμενα ελλιπούς πλήρωσης, τη θέση των γραμμών συγκόλλησης και την κατανομή του προσανατολισμού. Η ακανόνιστη και πολύπλοκη γεωμετρία, η οποία δημιουργεί τις οριακές συνθήκες στο πρόβλημα ροής, οδηγεί σε μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων οι οποίες είναι κατάλληλες για το χειρισμό τέτοιων σύνθετων οριακών συνθηκών.

3.5.4 Ψύξη μορφοποιημένου αντικειμένου

Η ψύξη του τήγματος ξεκινά από την έναρξη του κύκλου της έγχυσης γιατί, με εξαίρεση την περίπτωση των θερμαινόμενων αγωγών έγχυσης, όλο το σύστημα του καλουπιού βρίσκεται στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Όπως έχουμε δει, κατά το στάδιο της πλήρωσης η θερμοκρασία διαφοροποιείται τόσο εγκάρσια όσο και κατά τη φορά της ροής, με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται ένα “στερεοποιημένο εξωτερικό στρώμα” από το τήγμα, το πάχος του οποίου μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου και του ρυθμού έγχυσης. Στο τέλος του σταδίου πλήρωσης της κοιλότητας, η ψύξη του τήγματος γίνεται το κυρίαρχο φαινόμενο. Για να αντισταθμιστεί η μείωση του ειδικού όγκου κατά την ψύξη, επιπλέον ποσότητα τήγματος συμπιέζεται να εισέλθει στην κοιλότητα. Επίσης στην περίπτωση που η πίεση έγχυσης απομακρυνθεί πριν την ψύξη της πύλης εισόδου, εμφανίζεται ροή προς την έξοδο λόγω της υψηλής πίεσης που επικρατεί στην κοιλότητα μορφοποίησης.

Τέλος, κατά την ψύξη εμφανίζονται δευτερεύουσες ροές, οι οποίες συμβάλλουν στον προσανατολισμό των μοριακών αλυσίδων. Οι ροές αυτές οφείλονται στη διαφοροποίηση της θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα τήγμα να ρέει από τις θερμές προς τις ψυχρές περιοχές ώστε να αντισταθμίζεται η συστολή του όγκου. Επίσης δευτερεύουσες ροές αναπτύσσονται στις περιοχές όπου εμφανίζεται απότομη μείωση στο πάχος της εγκάρσιας διατομής. Στην περίπτωση που τέτοιες ροές δεν είναι εφικτές, συνήθως λόγω έλλειψης υλικού, σχηματίζονται κενά μέσα στο μορφοποιημένο αντικείμενο.

Για να ορίσουμε τις εξισώσεις με βάση τα φαινόμενα μεταφοράς οι οποίες προσομοιώνουν την ψύξη των προς μορφοποίηση αντικειμένων, αγνοούμε τη ροή λόγω συμπίεσης (packing), ροή οπισθοχώρησης (back flow) και τις δευτερεύουσες ροές (secondary flows), οι οποίες λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της μορφοποίησης και συμβάλλουν στη μεταφορά θερμότητας.

Για κοιλότητα μορφοποίησης ορθογώνιου σχήματος και μικρού πάχους συγκριτικά με τις άλλες δύο διαστάσεις, όπως στο Σχήμα 3.20, η εξίσωση ενέργειας που περιγράφει την ψύξη του καλουπιού είναι :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] \quad [3.17]$$

Το θερμοκρασιακό πεδίο στο τέλος της πλήρωσης της κοιλότητας λαμβάνεται ως η αρχική συνθήκη για την παραπάνω εξίσωση. Οι οριακές συνθήκες είναι (όπου l το μήκος του καλουπιού):

$$\begin{aligned}
\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)(0, x, t) &= 0 \\
\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)\left(\frac{H}{2}, x, t\right) &= -\frac{h}{k} \left[T\left(\frac{H}{2}, x, t\right) - T_0 \right] \\
\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)(y, 0, t) &= -\frac{h}{k} [T(y, 0, t) - T_0] \\
\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)(y, l, t) &= -\frac{h}{k} [T(y, l, t) - T_0]
\end{aligned}
\tag{3.18}$$

Το πρόβλημα αυτό μπορεί να επιλυθεί αριθμητικά στην περίπτωση σταθερών θερμοφυσικών ιδιοτήτων.

Στην περίπτωση που κατά την ψύξη συμβαίνει και κρυστάλλωση η εξίσωση [3.17] πρέπει να χρησιμοποιηθεί δύο φορές, μία για το τήγμα και μια για το κρυσταλλικό στερεό, λαμβάνοντας υπόψη και τη θερμότητα που ελευθερώνεται κατά την πρώτης τάξης μετάπτωσης, με ένα θερμικό ισοζύγιο στη διεπιφάνεια. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση [3.17] και για τις δύο φάσεις, αν θεωρηθεί ότι οι παράμετροι C_p , ρ και k μπορούν να μεταβάλλονται σε όλη τη θερμοκρασιακή περιοχή.

Τέλος η αγωγή στην κατεύθυνση της ροής αγνοείται, γιατί η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας στη φορά της ροής είναι πολύ μικρότερη από αυτή στην εγκάρσια κατεύθυνση. Στην περίπτωση αυτή ο όρος $k\partial^2 T/\partial x^2$ μηδενίζεται και πρέπει να χρησιμοποιηθούν μόνο οι δύο οριακές συνθήκες της εξίσωσης [3.18].

3.6 ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΤΗΣ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ

Μορφοποίηση πολλαπλών-χρωμάτων (multi-color)

Μορφοποίηση πολλαπλών χρωμάτων συμβαίνει όταν δύο ή περισσότερα συστατικά εγχύονται μέσα από διαφορετικά συστήματα αγωγών έγχυσης σε διαφορετικά στάδια κατά τη διαδικασία μορφοποίησης. Κάθε συστατικό που θα εγχυθεί προέρχεται από διαφορετική μονάδα τήξης.

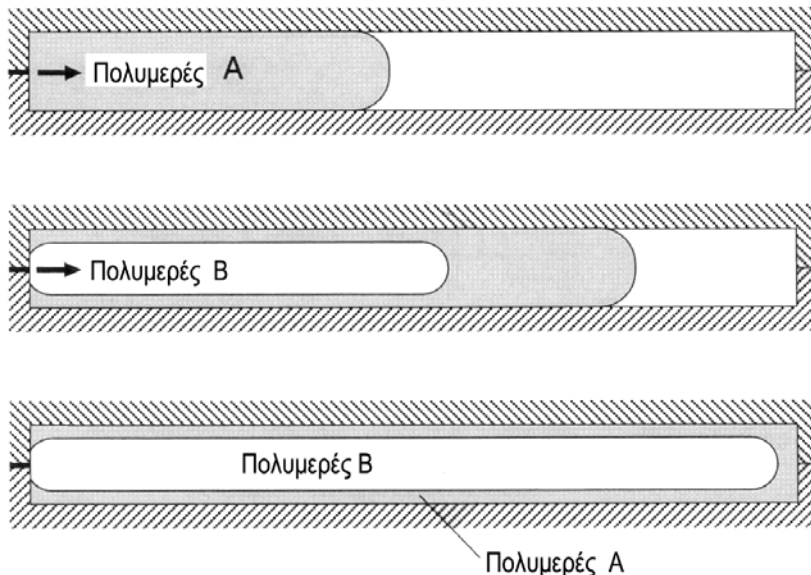
Μορφοποίηση πολλαπλών-συστατικών (multi-component)

Η διεργασία μορφοποίησης πολλαπλών συστατικών είναι ίδια με τη διεργασία πολλαπλών χρωμάτων. Στην περίπτωση αυτή μορφοποιούνται είτε δύο μη συμβατά υλικά ή το ένα συστατικό ψύχεται επαρκώς ούτως ώστε τα δύο συστατικά να μην προσκολλούνται το ένα με το άλλο. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται για να αντικαταστήσει πολύπλοκες διατάξεις συναρμολόγησης και να εξοικονομηθεί χειρωνακτική εργασία.

Συν-έγχυση (co-injection)

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες τεχνικές, σε αυτή τη διεργασία χρησιμοποιείται το ίδιο σύστημα αγωγών έγχυσης. Το συστατικό το οποίο βρίσκεται στην εξωτερική

επιφάνεια του αντικειμένου εγχύεται πρώτα και ακολουθείται από το υλικό του εσωτερικού πυρήνα, δημιουργώντας μια δομή “sandwich”. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που μας ενδιαφέρει κυρίως η ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας ενός αντικειμένου για την επιθυμητή συμπεριφορά κατά τη χρήση. Επίσης είναι επιθυμητό η διατομή του αντικειμένου να είναι συμπαγής για να έχει αυξημένη δυσκαμψία. Με αυτές τις απαιτήσεις θα χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικά υλικά, το ακριβό για την επιφάνεια και το φθινό για το εσωτερικό ώστε να μειωθεί το κόστος χωρίς να υποβαθμισθεί η συμπεριφορά του κατά τη χρήση.



Σχήμα 3.31: Σχηματική παράσταση της μορφοποίησης με συν-έγχυση.

Μία από τις σημαντικές εφαρμογές αυτής της τεχνικής είναι η μορφοποίηση αντικειμένων με έγχυση αφροπ्लाστικού στην εσωτερική διατομή.

Έγχυση με τη βοήθεια αερίου (Gas-assisted injection moulding)

Στη βασική της αρχή αυτή η τεχνική μορφοποίησης είναι ίδια με την έγχυση δύο συστατικών. Στην περίπτωση αυτή το δεύτερο ή το εσωτερικό συστατικό είναι αδρανές αέριο (συνήθως άζωτο) το οποίο εγχύεται με ακροφύσιο ή μέσω των αγωγών έγχυσης στο πολυμερικό τήγμα. Η εμφύσηση στο τήγμα που έχει εγχυθεί, το ωθεί προς τα τοιχώματα του καλουπιού.

Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής είναι:

- Βελτιωμένη μορφοποίηση εξωτερικής επιφάνειας του αντικειμένου
- Περιορισμός του συστήματος των αγωγών έγχυσης στην περίπτωση που το αέριο εγχύεται από το υπάρχον σύστημα.
- Χαμηλότερο κόστος εξοπλισμού γιατί χρησιμοποιούνται χαμηλότερες πιέσεις από την τυπική τεχνική της έγχυσης
- Αυξημένη ευελιξία στο σχεδιασμό αντικειμένων.
- Μείωση των αναπτυσσόμενων εσωτερικών τάσεων γιατί η πίεση του αντικειμένου κατά την ψύξη είναι μικρότερη.

Μορφοποίηση με έγχυση αντιδρώντος συστήματος (Reaction Injection Moulding, RIM)

Η έγχυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μορφοποίηση αντικειμένων από ένα γραμμάριο μέχρι κάποια κιλά. Με την αύξηση του βάρους του αντικειμένου εμφανίζονται δύο προβλήματα:

- i. η παραγωγή αρκετής ποσότητας ομογενούς τήγματος στη μονάδα έγχυσης και
- ii. η διατήρηση επαρκούς δύναμης στο κλειστικό σύστημα ώστε το καλούπι να μένει κλειστό στις φάσεις της πλήρωσης και συμπίεσης της διεργασίας έγχυσης. Το τελευταίο πρόβλημα είναι σημαντικό όταν η επιφάνεια προβολής του αντικειμένου είναι μεγάλη και απαιτεί πολύ μεγάλες πιέσεις.

Η μορφοποίηση με έγχυση αντιδρώντος συστήματος αναπτύχθηκε για να ξεπεραστούν και τα δύο παραπάνω προβλήματα. Κατά την τεχνική αυτή το πολυμερές σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της μορφοποίησης. Τα αντιδρώντα υγρά έρχονται σε επαφή μεταξύ τους λίγο πριν την έγχυσή τους στη καλούπι μορφοποίησης. Ο πολυμερισμός λαμβάνει χώρα στην κοιλότητα, ταυτόχρονα με τη μορφοποίησή τους. Οι πιέσεις έγχυσης που απαιτούνται για την πλήρωση του καλουπιού στη διεργασία RIM είναι γενικά μικρές.

Επίσης η ομογενοποίηση των χαμηλού ιξώδους αντιδρώντων υγρών είναι πολύ καλή. Μετά την πλήρωση και καθώς προχωρά ο πολυμερισμός, εκλύεται θερμότητα από την αντίδραση η οποία αυξάνει τον ειδικό όγκο του πολυμερικού συστήματος.

Από την άλλη πλευρά, ο πολυμερισμός συνοδεύεται από μείωση του ειδικού όγκου της τάξης του 10%.

Υψηλή σχετικά πίεση συμπίεσης είναι απαραίτητη με δεδομένο ότι το ιξώδες του αντιδρώντος συστήματος αυξάνει με την αύξηση του μοριακού βάρους ή του αριθμού των διασταυρώσεων πλέγματος,

Σε ορισμένες περιπτώσεις ένα από τα δύο υγρά περιέχει ενισχυτικά ή πληρωτικά μέσα και η τεχνική αναφέρεται ως μορφοποίηση με έγχυση ενισχυμένου αντιδρώντος συστήματος (Reinforced Reaction Injection Moulding, RRIM).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

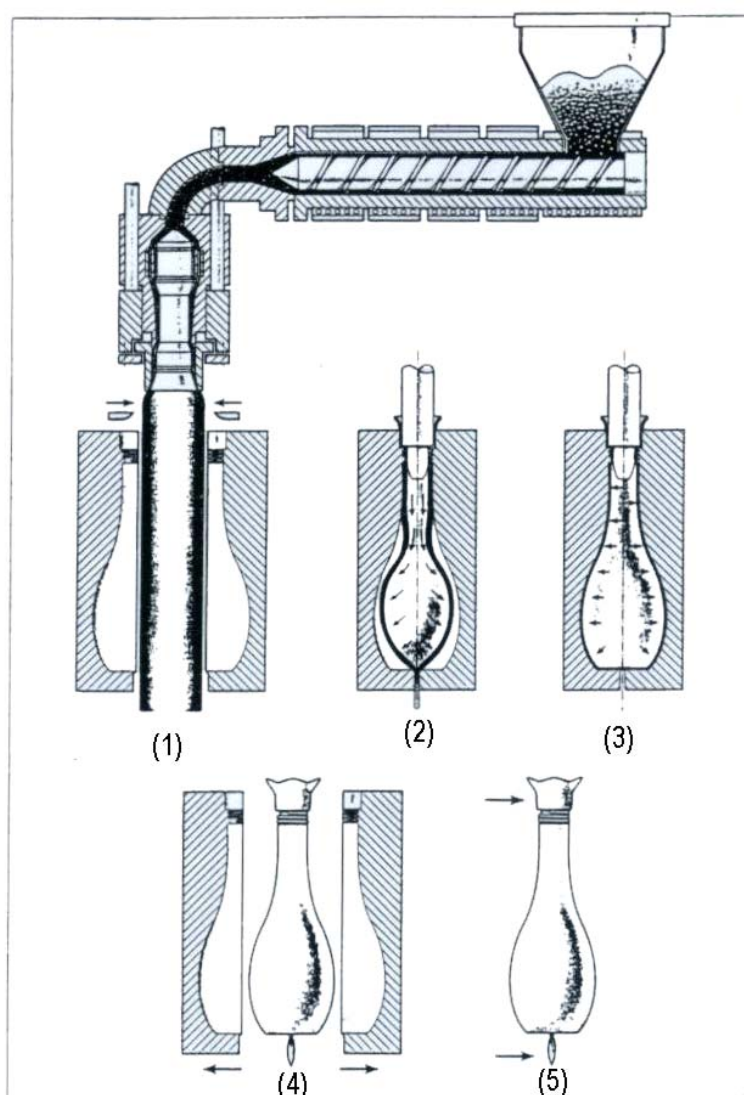
1. Beaumont J.P., Nagel R., Sherman R., “Successful Injection Molding: Process, Design, Simulation”, Hanser Publ., Munich (2002).
2. Tadmor Z, and Gogos C.G., “Principles of Polymer Processing”, SPE Monographs, Wiley-Interscience, New York (1979).
3. Strong A.B., “Plastics: Materials and Processing”, Prentice Hall, 2nd ed. (2000).
4. Vlachopoulos J., “Introduction to Plastics Processing”, McMaster Univ. Ontario Canada (2001).
5. Μητσούλης Ευάγγ., “Βασικές Αρχές Μορφοποίησης Πολυμερών”, ΕΜΠ (1999).
6. Παναγιώτου Κ., “Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών”, ΠΗΓΑΣΟΣ Θεσσαλονίκη (2001).
7. Ανδρεόπουλος Α.Γ., “Επεξεργασία Πολυμερών & Σχεδιασμός Προϊόντων”, ΕΜΠ (2004).
8. McCrum N.G., Buckley C.P., Bucknall C.B., “Principles of Polymer Engineering”, Oxford Univ. Press (1988).
9. Cahn R.W., Haasen P., Kramer E.J., “Materials Science and Technology: A comprehensive Treatment”, vol. 18, Wiley VCH (1997).
10. Osswald T.A., Menges G., “Materials Science of Polymers for Engineers”, Hanser Publ. (1995).
11. Osswald T.A., “Polymer Processing: Fundamentals”, Hanser Publ. (1998).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΦΥΣΗΜΑ

4.1 ΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΕΚΒΟΛΗ ΚΑΙ ΦΥΣΗΜΑ

Στη μόρφωση με εκβολή και φύσημα (extrusion blow molding), όπου εφαρμόζεται η τεχνική της εκβολής για την προμόρφωση, χρησιμοποιείται για την παραγωγή πλαστικών φιαλών και γενικότερα κοίλων αντικειμένων.

Στην τεχνική αυτή μπορούν να διακριθούν τα ακόλουθα στάδια (Σχήμα 4.1):



1) Η παραγωγή ενός κυλινδρικού σωλήνα (προμορφή) από τήγμα πολυμερούς (parison)

2) Ο εγκλωβισμός του σωλήνα μέσα στη μήτρα και διόγκωση του σωλήνα με αέρα ώστε να παραχθεί το αντικείμενο

3) Η ψύξη του αντικειμένου

4) Η απομάκρυνση του αντικειμένου από την μήτρα

5) Απομάκρυνση των αποκομμάτων του μορφοποιημένου αντικειμένου

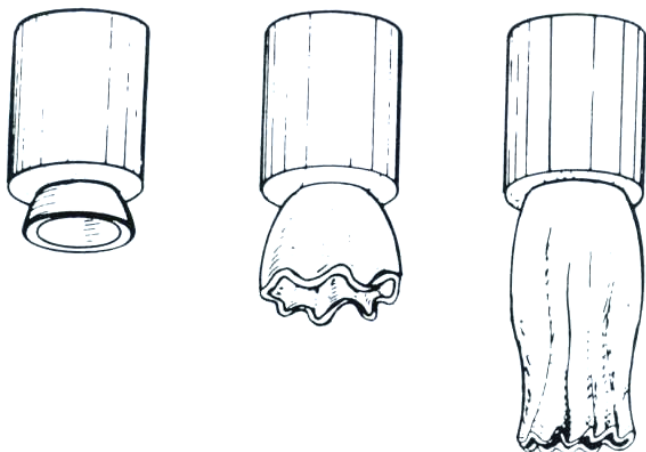
Σχήμα 4.1: Στάδια της μόρφωσης με φύσημα με εφαρμογή εκβολής.

Σε πολλές περιπτώσεις όλα τα παραπάνω στάδια μπορούν να αποτελούν σειρά μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας.

Η γεωμετρία του σωλήνα επηρεάζεται από δύο φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά το στάδιο της εκβολής του:

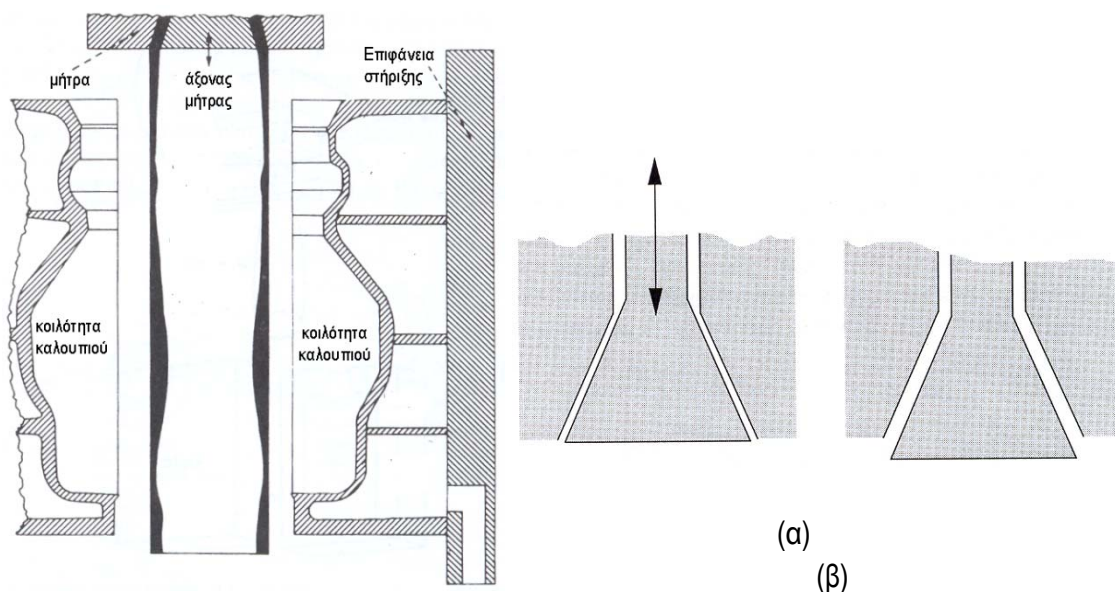
- τη διόγκωση του τήγματος μετά την έξοδο από τη μήτρα (die swelling) και
- τη λέπτυνση ή τράβηγμα του σωλήνα της προμορφής (parison sagging), λόγω του βάρους του.

Το βάρος του σωλήνα μπορεί να οδηγήσει σε αστοχίες όπως οι πτυχώσεις που φαίνονται στο Σχήμα 4.2



Σχήμα 4.2: Πτύχωση σωλήνα.

Ένα από τα προβλήματα που παρουσιάζονται στις τεχνικές μορφοποίησης με φύσημα είναι η ανομοιομορφία στο πάχος του τοιχώματος του τελικού μορφοποιημένου αντικειμένου. Για την επίτευξη ομοιόμορφου πάχους τοιχώματος θα πρέπει να προγραμματίζεται κατάλληλα το άνοιγμα της μήτρα εκβολής (Σχήμα 4.3α) ή ο ρυθμός εκβολής ώστε να παράγεται ένας σωλήνας με ανομοιόμορφο πάχος, ο οποίος στο έλος της μορφοποίησης θα δώσει το επιθυμητό ομοιόμορφο πάχος του τοιχώματος (Σχήμα 4.3β).



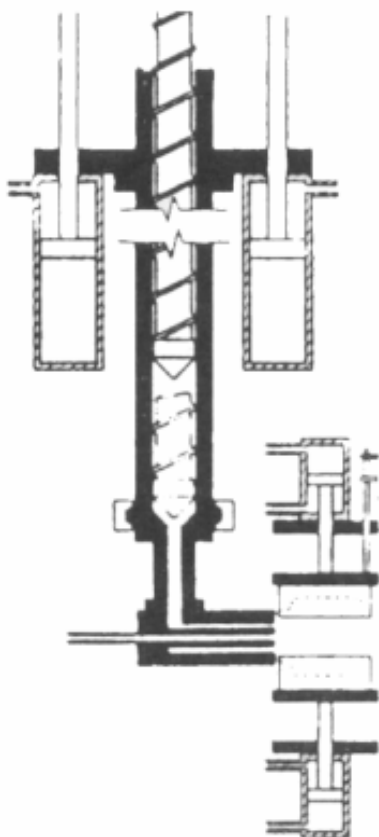
Σχήμα 4.3: (α) μετακίνηση του άξονα της μήτρας και (β) προγραμματιζόμενη εκβολή σωλήνα ώστε πάχος των τοιχωμάτων της προμορφής να ανταποκριθεί στο σχεδιασμό συγκεκριμένου αντικειμένου.

4.1.1 ΑΣΥΝΕΧΗΣ ΕΚΒΟΛΗ

Η εκβολή αυτή μπορεί να χρησιμοποιεί ένα συνεχώς ή ασυνεχώς περιστρεφόμενο κοχλία, καθώς επίσης και σύστημα εμβόλου.

Κοχλίας συνεχούς περιστροφής.

Στην περίπτωση αυτή το τήγμα τροφοδοτείται ασυνεχώς σε μια μήτρα, από ένα κοχλία που περιστρέφεται συνεχώς ενώ σε τακτά χρονικά διαστήματα κάνει ένα εμβολισμό και ωθεί το τήγμα. Η μήτρα κλείνει και εγκλωβίζει το σωλήνα του πολυμερούς ο οποίος με την πίεση του αέρα παίρνει τη μορφή του αντικειμένου που είναι επιθυμητή. Επειδή η παραγωγή του σωλήνα είναι ασυνεχής, το ίδιο τμήμα μπορεί να χρησιμοποιείται για τη μόρφωση του σωλήνα και τη μόρφωση του αντικειμένου (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4: Τυπική μορφή κεφαλής για παραγωγή σωλήνα με ασυνεχή εκβολή.

Εφ' όσον η περιστροφή του κοχλία είναι συνεχής τότε η παραγωγή και προώθηση του τήγματος είναι συνεχής. Κατά την φάση της διόγκωσης του σωλήνα και κατά την ψύξη του αντικειμένου, το τήγμα που προωθείται συσσωρεύεται στο πρόσθιο μέρος της μηχανής και είναι έτοιμο για τον επόμενο κύκλο.

Όταν η μήτρα ανοίγει και το έτοιμο αντικείμενο βγαίνει, τότε ο κοχλίας κάνει ένα εμβολισμό με την βοήθεια υδραυλικού συστήματος και έτσι παράγεται ένας ακόμη σωλήνας. Όταν ο κοχλίας ολοκληρώσει την διαδρομή του τότε κλείνει μια βαλβίδα και, εφ' όσον ο κοχλίας περιστρέφεται συνεχώς, το προωθούμενο πολυμερές τον ωθεί προς τα πίσω. Όταν στη συνέχεια, συσσωρευθεί ποσότητα τήγματος αρκετή για

τον επόμενο κύκλο, η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται. Το σύστημα που περιγράφεται στα παραπάνω, χρησιμοποιείται για την παραγωγή δοχείων μέχρι 10 λίτρων.

Κοχλίας ασυνεχούς περιστροφής

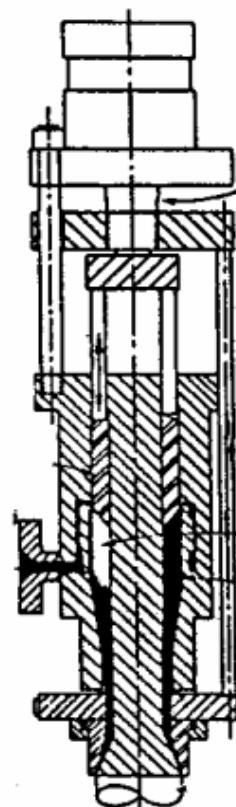
Στο σύστημα αυτό ο κοχλίας σταματά να περιστρέφεται όταν προωθήσει την απαραίτητη ποσότητα τήγματος πολυμερούς. Στο σημείο αυτό κάνει ένα απότομο εμβολισμό και δίνει στο τήγμα τη μορφή ενός σωλήνα από πολυμερές. Τα μειονεκτήματα του συστήματος αυτού αναφέρονται στην πρόσθετη επιβάρυνση του υδραυλικού συστήματος η οποία οφείλεται στις αδρανειακές δυνάμεις που προκαλούνται από τους κύκλους εκκίνησης του κοχλία.

Σύστημα εμβόλου

Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί ένα βοηθητικό σύστημα εμβόλου και κυλίνδρου για τη γρήγορη προώθηση του σωλήνα τήγματος. Όταν συγκεντρωθεί η κατάλληλη ποσότητα τήγματος, γίνεται ένας γρήγορος εμβολισμός από το βοηθητικό έμβολο. Το σύστημα αυτό εφαρμόζεται, συνήθως, για την παραγωγή μεγάλων δοχείων.

Κεφαλή συσσώρευσης

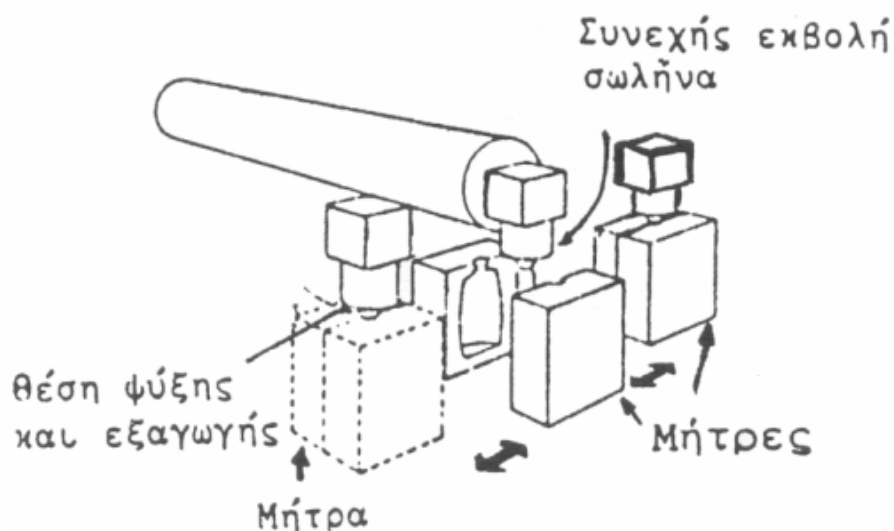
Η κεφαλή συσσώρευσης εξυπηρετεί διπλό σκοπό. Αφ' ενός χρησιμεύει ως χώρος συσσώρευσης του τήγματος και αφ' ετέρου ως τμήμα μόρφωσης του σωλήνα. Η κεφαλή τροφοδοτείται με τήγμα από ένα συνεχώς περιστρεφόμενο κοχλία και αυτή η απ' ευθείας πλήρωση έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των διατμητικών τάσεων που μεταβιβάζονται στο τήγμα. Σε ένα τυπικό σύστημα με κεφαλή συσσώρευσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.5, καθώς το τήγμα του πολυμερούς εισέρχεται στην κεφαλή, το εξωτερικό κέλυφος της μήτρας κάνει μία κίνηση προς τα επάνω και μία κίνηση προς τα κάτω δίνοντας έτσι στο τήγμα του πολυμερούς τη μορφή ενός σωλήνα. Από τον τρόπο αυτό λειτουργίας κατά τη μόρφωση προκύπτουν σχετικά μικρές πτώσεις πίεσης. Επίσης οι τάσεις επάνω στο τήγμα είναι περιορισμένες, με αποτέλεσμα την παραγωγή σωλήνα με λιγότερες τάσεις.



Σχήμα 4.5: Κεφαλή συσσώρευσης τήγματος.

4.1.2 ΣΥΝΕΧΗΣ ΕΚΒΟΛΗ

Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει ένα συνεχώς περιστρεφόμενο κοχλία μέσα στο σώμα μιας μηχανής για εκβολή. Ο ρυθμός παραγωγής του σωλήνα από τήγμα πολυμερούς συγχρονίζεται με τον υπόλοιπο κύκλο μόρφωσης με τη βοήθεια ενός συστήματος ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής. Στην περίπτωση αυτή, η διόγκωση και η ψύξη γίνονται σε ξεχωριστό τμήμα ώστε να μην εμποδίζεται η συνεχής εκβολή του πολυμερούς. Η κίνηση που κάνουν οι μήτρες συγχρονίζονται σε μια ευθεία ή κυκλική διάταξη (Σχήμα 4.6)



Σχήμα 4.6: Συνεχής εκβολή με ευθεία διάταξη των μητρών.

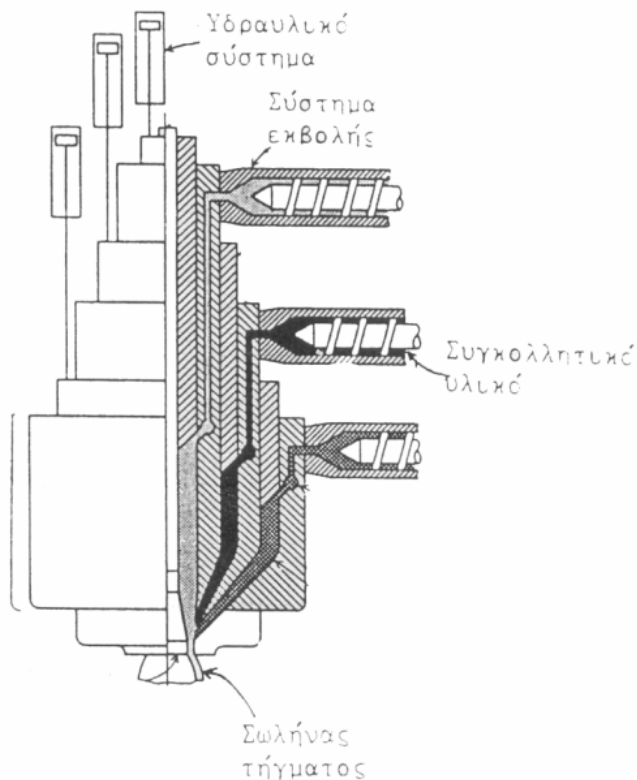
Η συνεχής εκβολή εξασφαλίζει μεγαλύτερη ομοιομορφία στο τήγμα από πλευράς κατανομής θερμοκρασιών. Οι χρόνοι στασιμότητας ελαττώνονται και έτσι είναι μειωμένος ο κίνδυνος θερμικής αποσύνθεσης του τήγματος, γεγονός που έχει ιδιαίτερη σημασία όταν μορφώνονται ευαίσθητα υλικά.

4.1.3 ΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΣΥΝΕΚΒΟΛΗ ΚΑΙ ΦΥΣΗΜΑ

Μια από τις εξελίξεις στη μόρφωση με φύσημα, αφορά τη δυνατότητα παραγωγής κοίλων αντικειμένων με πολλαπλά στρώματα, με την εφαρμογή συνεκβολής. Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται σχηματικά μια κεφαλή συσσώρευσης κατάλληλη για την παραγωγή σωλήνα από επάλληλα στρώματα πολυμερών. Η παραγωγή των στρωμάτων του πολυμερούς γίνεται με τη χρησιμοποίηση ξεχωριστών μηχανών εκβολής, ενώ το πάχος του κάθε στρώματος ελέγχεται με προγραμματισμό και ρύθμιση της πίεσης των εμβόλων που μορφώνουν το σωλήνα.

Η παραγωγή κοίλων αντικειμένων με χρήση συνεκβολής και φύσημα βρίσκει πλατειά εφαρμογή στην παραγωγή δοχείων για την αποθήκευση καυσίμων ή άλλων ελαφρών υδρογονανθράκων, που διαπερνούν το πολυαιθυλένιο και έτσι, είναι απαραίτητη η

προσθήκη ενός στρώματος από πολυμερές που να χαρακτηρίζεται από χαμηλή διαπερατότητα ως προς τα μέσα αυτά.



Σχήμα 4.7: Σύστημα μόρφωσης με φύσημα, με εφαρμογή συνεκβολής.

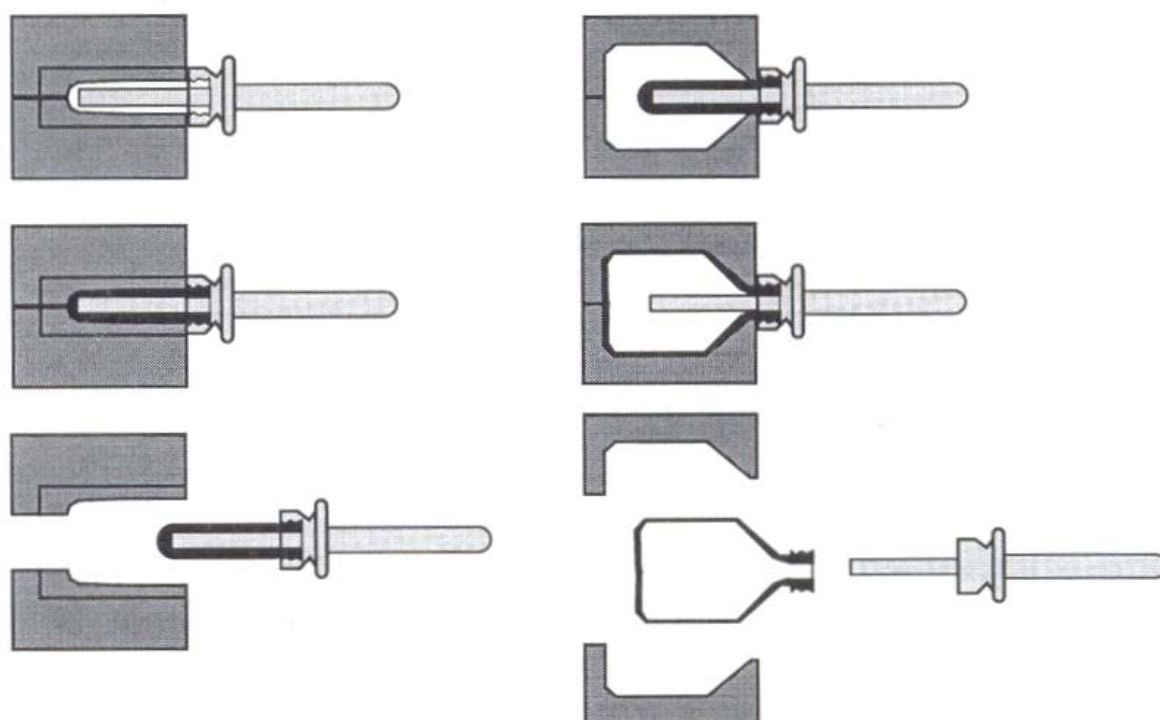
4.1.4 Μήτρες

Οι μήτρες, κατά την παραγωγή αντικειμένων με φύσημα, επιτελούν δύο βασικές λειτουργίες. Αφ' ενός μορφώνουν το αντικείμενο και αφ' ετέρου ψύχουν το τήγμα του πολυμερούς. Η μήτρα κλείνει και εγκλωβίζει το σωλήνα, όταν το μήκος του φτάσει στο κατάλληλο σημείο. Στη συνέχεια γίνεται η διόγκωση και η ψύξη του αντικειμένου, εκτονώνεται ο αέρας και ανοίγει η μήτρα για την εξαγωγή του αντικειμένου.

Το υλικό κατασκευής της μήτρας είναι συνήθως αλουμίνιο, χυτό ή μηχανουργικά επεξεργασμένο. Η ψύξη της μήτρας γίνεται με την κυκλοφορία ψυχόμενου μίγματος νερού-γλυκόλης, μέσα από δίκτυο που διαπερνά όλη τη μήτρα. Η αποτελεσματική ψύξη του αντικειμένου είναι βασική παράμετρος, που καθορίζει την παραγωγικότητα της μόρφωσης, δεδομένου ότι η ψύξη είναι το βραδύτερο στάδιο.

4.2 ΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ ΚΑΙ ΦΥΣΗΜΑ

Η τεχνική της μόρφωσης με έγχυση και φύσημα (injection blow molding), είναι μια πορεία δύο σταδίων που εφαρμόζεται για την παραγωγή πλαστικών δοχείων τα οποία δε χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία. Στο πρώτο στάδιο παράγεται με έγχυση μια προμορφή, με όλες τις λεπτομέρειες του τελικού προϊόντος. Η προμορφή αυτή μεταφέρεται στη μήτρα διόγκωσης, όπου γίνεται η τελική μόρφωση του αντικειμένου και η εξαγωγή του. Ο κύκλος αυτός φαίνεται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8: Μόρφωση φιαλών με έγχυση και φύσημα.

Τα πλεονεκτήματα που εμφανίζει η τεχνική της έγχυσης με φύσημα είναι τα εξής:

- 1) Η μέθοδος καταργεί τα αποκόμματα πολυμερούς, παράγει αντικείμενα με αυστηρά καθορισμένες διαστάσεις που δεν απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία.
- 2) Εξασφαλίζει αυστηρό έλεγχο του βάρους (στα όρια του $\pm 0.1g$)
- 3) Οι εξωτερικές και εσωτερικές διαστάσεις του λαιμού της φιάλης παρουσιάζουν πολύ μικρές ανοχές (± 0.004 in)
- 4) Εμφανίζεται βελτιωμένη διαύγεια και αντοχή λόγω του διαξονικού προσανατολισμού
- 5) Κατά την εξαγωγή τους από τη μήτρα, οι φιάλες παίρνουν συγκεκριμένο προσανατολισμό και διάταξη, ώστε να διευκολύνονται οι περαιτέρω εργασίες διακόσμησης και εκτύπωσης.
- 6) Απαιτείται μικρή εποπτεία από πλευράς προσωπικού.

Οι μηχανές που χρησιμοποιούνται για την παραπάνω τεχνική διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- i. Σε μηχανές μórφωσης με φύσημα που μπορούν να προσαρμοσθούν σε μηχανές έγχυσης και
- ii. Σε πλήρη συστήματα μηχανής μórφωσης με φύσημα που χρησιμοποιούν και μηχανή έγχυσης.

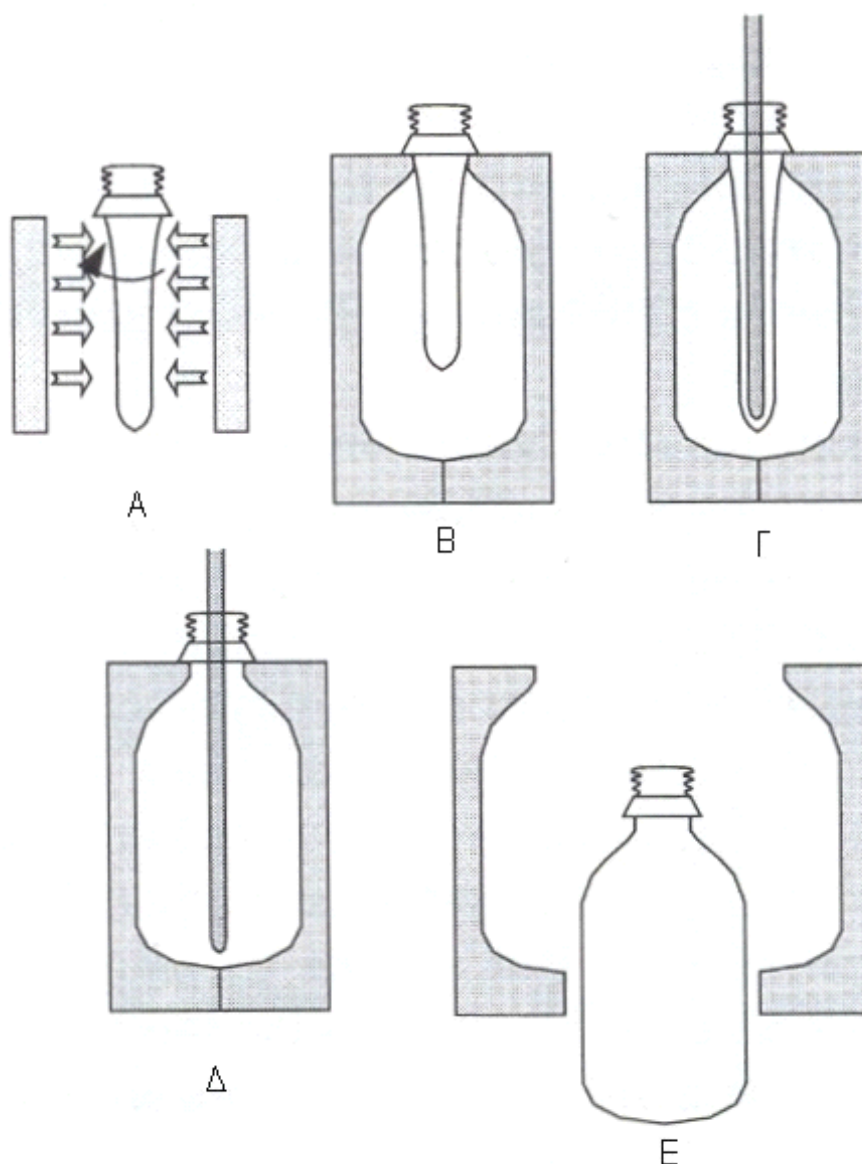
Βασικοί τομείς εφαρμογής της τεχνικής αυτής, για την παραγωγή φιαλών είναι η βιομηχανία καλλυντικών ή φαρμακευτικών ειδών. Εκτός από το PE και το PP, που χρησιμοποιούνται εκτεταμένα, με την τεχνική αυτή μορφοποιούνται και πολυμερή όπως το πολυστυρένιο (PS) ή τα συμπολυμερή στυρενίου-ακρυλονιτριλίου (SAN). Τα παραγόμενα μέσα συσκευασίας είναι συνήθως χαμηλής χωρητικότητας (κάτω του μισού λίτρου), πιστεύεται όμως ότι με την ανάπτυξη ισχυρότερων κλειστικών συστημάτων σύντομα θα είναι δυνατή η παραγωγή δοχείων με χωρητικότητα μέχρι ένα λίτρο. Ένας τομέας επίσης, προς τον οποίο προσανατολίζεται η έρευνα γύρω από την τεχνική αυτή καθώς και από τις αντίστοιχες μηχανές, αφορά τον προσανατολισμό του πολυμερούς ώστε να προκύψουν οι καλύτερες δυνατές ιδιότητες.

4.3 ΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ, ΕΚΤΑΣΗ ΚΑΙ ΦΥΣΗΜΑ

Με την τεχνική της μορφοποίησης με έγχυση, έκταση και φύσημα (injection stretch blow molding) γίνεται διαξονικός προσανατολισμός του αντικειμένου ταυτόχρονα με την μórφωση, κατά μεν την ακτινική διεύθυνση από τον αέρα διόγκωσης, κατά δε την αξονική με τη βοήθεια μηχανικών μέσων. Με τη μέθοδο αυτή βελτιώνεται σημαντικά η αντοχή του αντικειμένου ενώ ταυτόχρονα και πολλές άλλες ιδιότητες μεταβάλλονται ευνοϊκά. Έτσι αυξάνει η διαύγεια του υλικού και η αντοχή του σε κρούση, βελτιώνονται τα χαρακτηριστικά διαπερατότητας αερίων και υδρατμών καθώς και η συμπεριφορά του υλικού σε ερπυσμό.

Τα συνηθέστερα πολυμερή που χρησιμοποιούνται στη μórφωση με φύσημα και με προσανατολισμό είναι το πολυ(τερεφθαλικό αιθυλένιο) (PET) και το πολυπροπυλένιο (PP). Το PET έχει ιδιαίτερα δοκιμασθεί στην παραγωγή φιαλών για αναψυκτικά καθώς και στη συσκευασία τροφίμων, ενώ το PP εφαρμόζεται περισσότερο στην παραγωγή μέσων συσκευασίας καλλυντικών, φαρμάκων και απορρυπαντικών. Υλικά που επίσης μορφοποιούνται είναι το PVC και το PS.

Στο Σχήμα 4.9 φαίνεται μια πορεία διόγκωσης με ταυτόχρονο προσανατολισμό.



Σχήμα 4.9: Παραγωγή φιάλης με έγχυση, έκταση και φύσημα:

Α. Θέρμανση της προμορφής

Β. Τοποθέτηση της προμορφής στη μήτρα, κλείσιμο της μήτρας

Γ. Αξονικός προσανατολισμός (έκταση) με τη χρήση εσωτερικής ράβδου

Δ. Διόγκωση του πολυμερούς με την πίεση αέρα ώστε να μορφωθεί και να προσανατολισθεί ακτινικά

Ε. Άνοιγμα της μήτρας και παραλαβή της μορφοποιημένης φιάλης.

Η τεχνική της μόρφωσης με έγχυση, έκταση και φύσημα διακρίνεται σε δύο βασικές κατηγορίες: τη διαδικασία ενός σταδίου και τη διαδικασία δύο σταδίων. Η πρώτη πορεία γίνεται σε μια συνεχή γραμμή, ενώ η δεύτερη εφαρμόζει ξεχωριστά την παραγωγή αντικειμένων που θα διογκωθούν, ενώ η διόγκωση γίνεται σε μεταγενέστερο στάδιο με επαναθέρμανση του υλικού.

Τα πλεονεκτήματα της πρώτης μεθόδου είναι:

1) μικρή θερμική καταπόνηση του πολυμερούς

- 2) δυνατότητα προγραμματισμού της μορφής και κατανομής υλικού στο αντικείμενο που πρόκειται να διογκωθεί.

Η πορεία δύο σταδίων εφαρμόζει εκβολή ή έγχυση για την παραγωγή του αντικειμένου που πρόκειται να διογκωθεί. Στη συνέχεια, το αντικείμενο αυτό ψύχεται και κατόπιν επαναθερμαίνεται σε κλίβανο μέχρι τη θερμοκρασία προσανατολισμού. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- 1) Ελαχιστοποίηση των αποκομμάτων του πολυμερούς
- 2) Αυξημένη παραγωγικότητα (μέχρι 10000 φιάλες ανά ώρα ενώ στην πρώτη μέθοδο οι ρυθμοί φθάνουν τις 1800 φιάλες ανά ώρα)
- 3) Δυνατότητα να αποθηκεύονται τα αντικείμενα που πρόκειται να διογκωθούν και να μην επηρεάζει η παραγωγικότητα του ενός σταδίου την πορεία του άλλου.

Η μέθοδος των δύο σταδίων έχει αποκτήσει δημοτικότητα κυρίως λόγω της μεγάλης παραγωγικότητας που μπορεί να εξασφαλίσει.

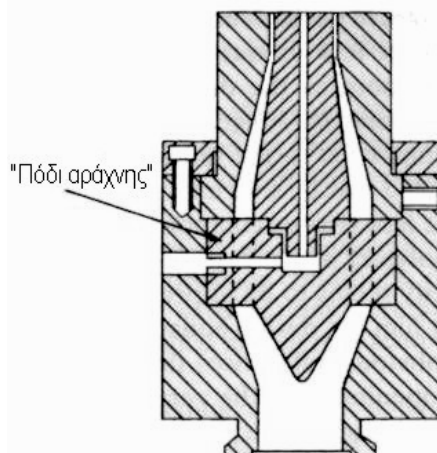
Γενικά, τόσο η συνεχής πορεία όσο και η πορεία δύο σταδίων έχουν κοινό σημείο τον πολύ αυστηρό θερμοκρασιακό έλεγχο, όπως και το λεπτομερή διαστατικό έλεγχο, που μπορούν να εφαρμόσουν στο προμορφωμένο αντικείμενο που πρόκειται να διογκωθεί.

4.4 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΦΙΛΜ ΜΕ ΕΚΒΟΛΗ ΚΑΙ ΦΥΣΗΜΑ (blown film)

Κατά την εκβολή φιλμ σε μήτρα με κυκλική σχισμή παράγεται σωλήνας ορισμένης διαμέτρου ο οποίος διογκώνεται με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα που απελευθερώνεται στο εσωτερικό του σωλήνα και δημιουργεί έτσι ένα ασκό.

Οι μήτρες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία του σωλήνα είναι οι εξής:

- A.** Μήτρα με τροφοδοσία από τον πυθμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10.

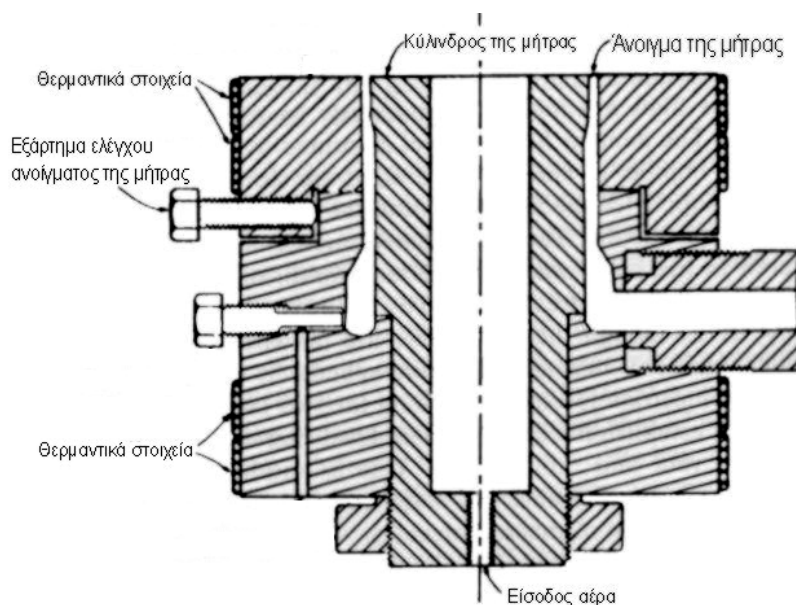


Σχήμα 4.10: Μήτρα με κεντρική τροφοδοσία από τον πυθμένα.

Ο τύπος αυτός καλείται μήτρα “τύπου αράχνης”, από το γεγονός ότι δακτύλιος στήριξης με ακτινικά στοιχεία (“πόδια” αράχνης) συνδέει τον κεντρικό άξονα με το σώμα της μήτρας. Η αξονική τροφοδοσία της μήτρας τύπου αράχνης ευνοεί την ομοιόμορφη κατανομή του τήγματος στην έξοδο της μήτρας, ενώ η διακλάδωση της ροής πίσω από το “πόδι” κάθε αράχνης προκαλεί την εμφάνιση γραμμών συγκόλλησης (weld lines).

Το τήγμα του πολυμερούς εισάγεται από τη βάση της μήτρας όπου συναντά έναν κώνο, απλώνεται γύρω από αυτόν και οδηγείται προς την έξοδο της μήτρας στη μορφή σωλήνα. Αέρας εισάγεται από το πίσω μέρος της μήτρας και εισέρχεται στο διαμορφωμένο σωλήνα για να δώσει τις τελικές διαστάσεις ενώ το πολυμερές είναι ακόμα στη ρευστή κατάσταση (Σχήμα 4.13).

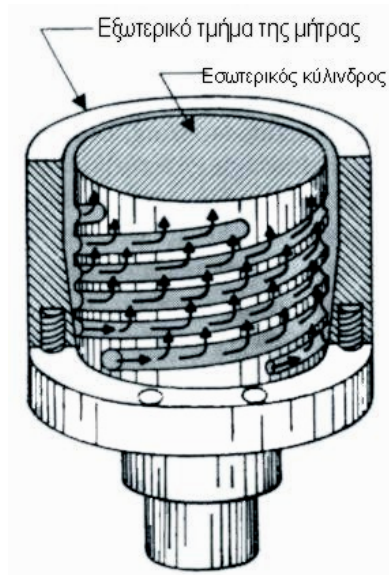
B. Μήτρα με πλευρική τροφοδοσία (Σχήμα 4.11).



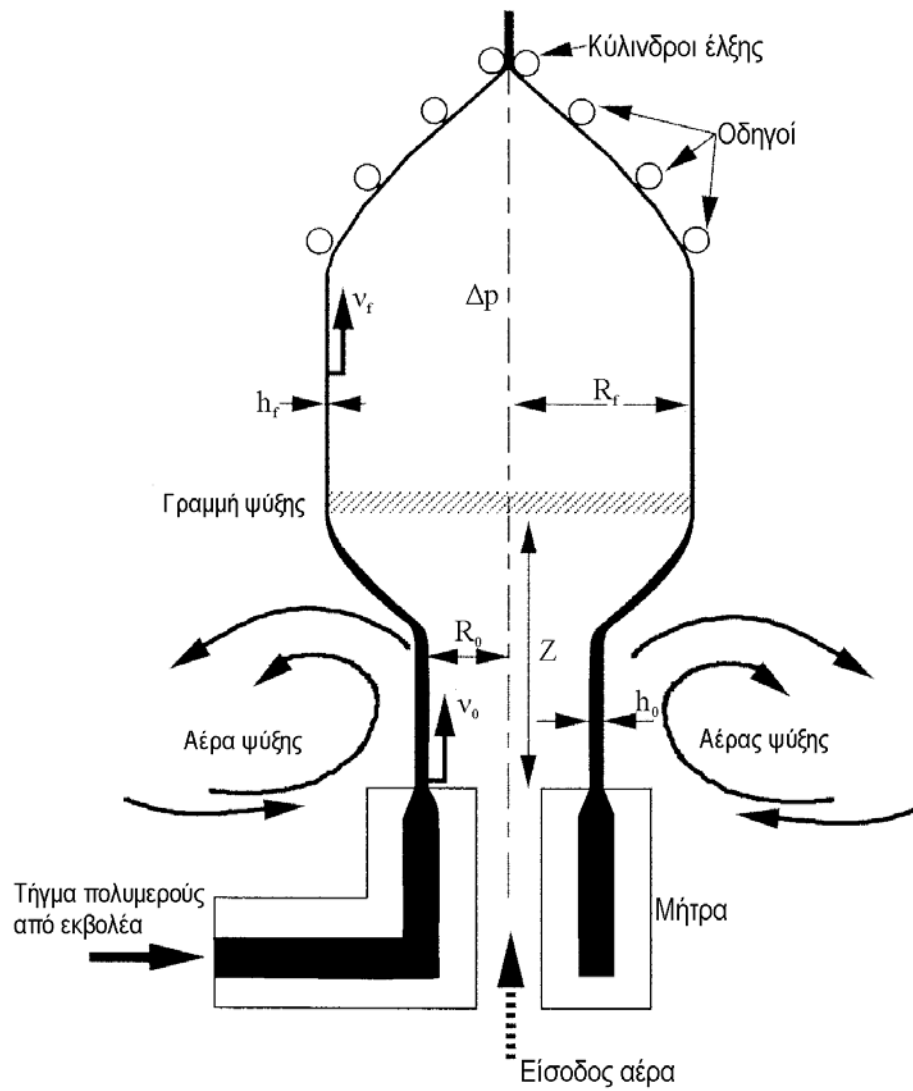
Σχήμα 4.11: Μήτρα με πλευρική τροφοδοσία.

Γ. Οι μήτρες τύπου σπείρας (Σχήμα 4.12) είναι από τις πιο διαδεδομένες στη λειτουργία των σύγχρονων γραμμών παραγωγής φιλμ με φύσημα. Το τήγμα τροφοδοτείται αξονικά στη μήτρα και στη συνέχεια μέσα από ακτινικά κανάλια του άξονα τύπου σπείρας, με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η ανομοιομορφία του τήγματος στην έξοδο της μήτρας.

Η ροή του αέρα σπρώχνει το σωλήνα προς τα έξω. Ο σωλήνας διαστέλλεται, ψύχεται μέχρι η ακτινική αντοχή του πλαστικού να εξισωθεί με την πίεση του αέρα. Η παραμόρφωση σταματά στη γραμμή ψύξης (freeze line), όπου συμβαίνει αλλαγή από την κατάσταση του τήγματος σε στερεό φιλμ. Εφαρμόζεται επίσης εξωτερική ψύξη με τη βοήθεια κυκλικού δακτυλίου ψύξης που εκσφενδονίζει κρύο αέρα πάνω στον κινούμενο σωλήνα. Ο εκτεταμένος σωλήνας προχωρά κατά ύψος και προωθείται μέσω κατάλληλου πλαισίου στο σύστημα των κυλίνδρων έλξης και στη συνέχεια στη διάταξη περιτύλιξης για τη συλλογή του φιλμ σε ρολλά.



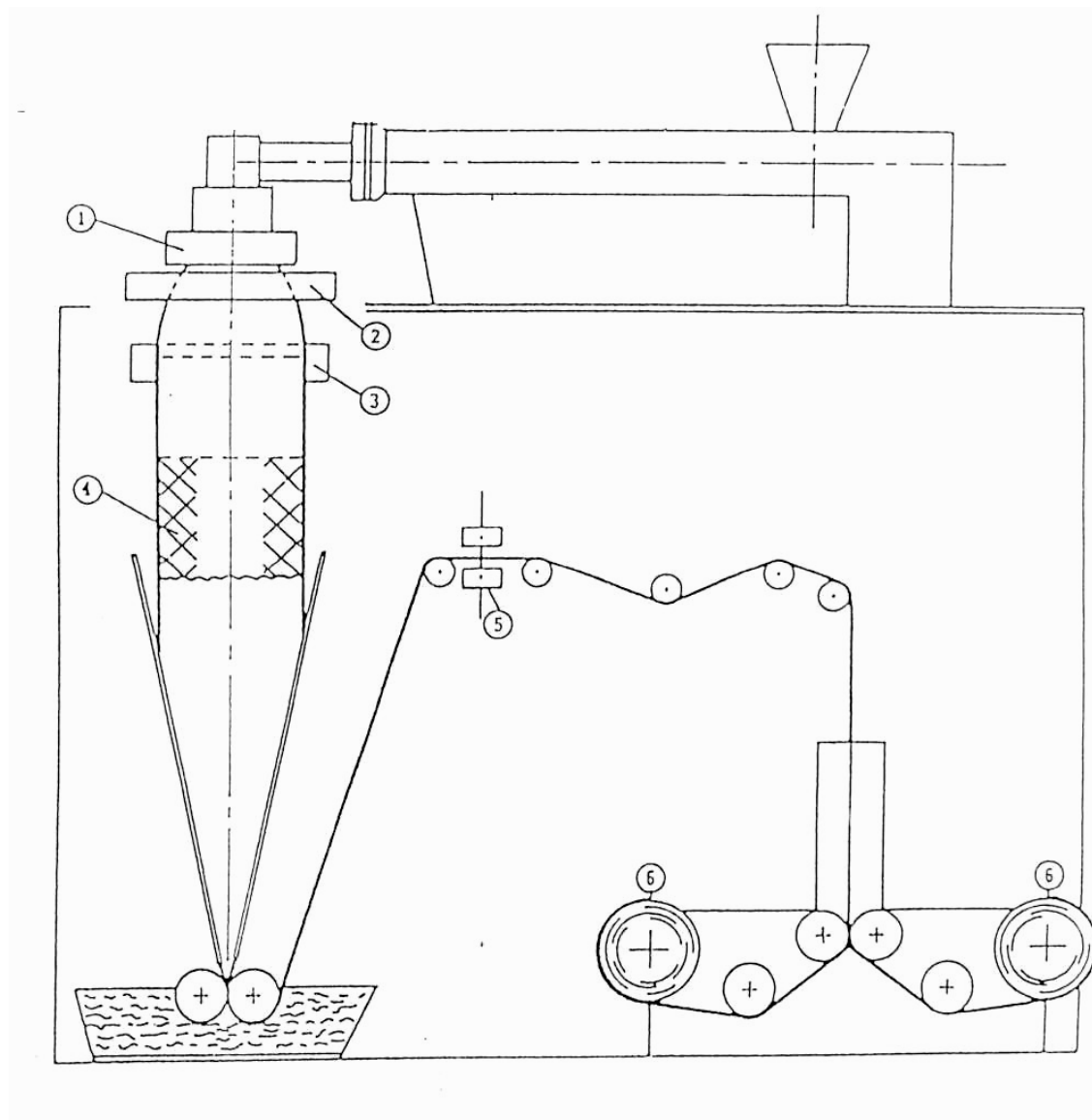
Σχήμα 4.12: Μήτρα τύπου σπείρας.



Σχήμα 4.13: Παραγωγή φιλμ με φύσημα και ψύξη με αέρα.

Ψύξη του φιλμ μπορεί επίσης να γίνει με νερό, είτε με απ' ευθείας επαφή με τα τοιχώματα του σωλήνα είτε με επαφή του τελικού φιλμ σε λουτρό νερού (Σχήμα 4.14).

Η επίτευξη καλής ψύξης συμβάλλει σημαντικά στην ομοιομορφία των τελικών ιδιοτήτων.



Σχήμα 4.14: Παραγωγή φιλμ με φύσημα και ψύξη με λουτρό νερού.

(1) μήτρα, (2) δακτύλιος ψύξης, (3) σταθεροποίηση με τροφοδοσία νερού, (4) διαμόρφωση σταθερής διαμέτρου, (5) επιφανειακή κατεργασία με κορόνα, (6) συλλογή

Προσανατολισμός

Όπως προαναφέρθηκε, αμέσως μετά από την έξοδο του από τη μήτρα το πολυμερές ψύχεται με ρεύμα αέρα στη θερμοκρασία προσανατολισμού. Υπό την επίδραση του αέρα που είναι εγκλωβισμένος, ο σωλήνας παραμορφώνεται πλευρικά μέχρι τη μέγιστη διάμετρο. Η ώθηση του αέρα στο εσωτερικό του σωλήνα προσανατολίζει τα μόρια στην ακτινική διεύθυνση (transverse direction, TD) ενώ το τράβηγμα από το σύστημα κυλίνδρων έλξης προσανατολίζει τα μόρια κατά τη φορά της μηχανής (machine direction, MD).

Βασικές παράμετροι με τις οποίες ελέγχεται η διεργασία και είναι εφικτή η πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων του παραγόμενου φιλμ είναι οι ακόλουθες:

i. **Λόγος εμφύσησης** (blow-up ratio) $B_R = R_f / R_0$: ο λόγος της τελικής ακτίνας του σωλήνα προς την ακτίνα του δακτυλίου της μήτρας εκβολής (τυπικές τιμές μεταξύ 1 και 4).

ii. **Λόγος τανυσμού** (draw ratio) $D_R = v_f / v_0$: ο λόγος της ταχύτητας του σωλήνα στη γραμμή ψύξης προς τη μέση ταχύτητα εκβολής από τη μήτρα (τυπικές τιμές μεταξύ 10 και 40).

iii. **μείωση του πάχους** (thickness reduction) $T_r = h_0/h_f$: ο λόγος του ανοίγματος της δακτυλικής μήτρας εκβολής προς το πάχος του σωλήνα στη γραμμή ψύξης (τυπικές τιμές μεταξύ 20 και 200).

Ο προσανατολισμός κατά τη φορά της μηχανής ελέγχεται από τη διαφοροποίηση της ταχύτητας εκβολής του φιλμ και της ταχύτητας των κυλίνδρων έλξης. Σε περίπτωση που είναι επιθυμητός μονοαξονικός προσανατολισμός η ταχύτητα έλξης πρέπει να είναι ίση με την ταχύτητα εκβολής.

Με δεδομένο ότι η ογκομετρική παροχή στη μήτρα και στο διογκωμένο κύλινδρο είναι η ίδια, μπορούμε να γράψουμε το απλό ισοζύγιο ενέργειας, θεωρώντας σταθερή την πυκνότητα του πολυμερούς:

$$\frac{h_0}{h_f} = B_R D_R \quad (4.1)$$

Οι Pearson και Petrie ανέπτυξαν και επίλυσαν το μοντέλο της παραγωγής φιλμ εκβολή και φύσημα και έκαναν γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων σε αδιάστατα γραφήματα. Επιπροσθέτως των όρων του λόγου τανυσμού D_R , του λόγου εμφύσησης B_R και του λόγου του μείωσης του πάχους h_0/h_f , εισήγαγαν τα ακόλουθα αδιάστατα μεγέθη:

$$\text{Πίεση: } P = \frac{\pi R_0^3 \Delta p}{\mu Q} \quad (4.2)$$

$$\text{Δύναμη τανυσμού: } F = \frac{R_0 f_z}{\mu Q} \quad (4.3)$$

$$\text{Ύψος γραμμή ψύξης: } X = \frac{Z}{R_0} \quad (4.4)$$

Όπου μ : το νευτωνικό ιξώδες, R_0 : η ακτίνα του εκβαλλόμενου σωλήνα,

R_f : η τελική ακτίνα του σωλήνα,

v_0 η ταχύτητα του τήγματος στην έξοδο της μήτρας,

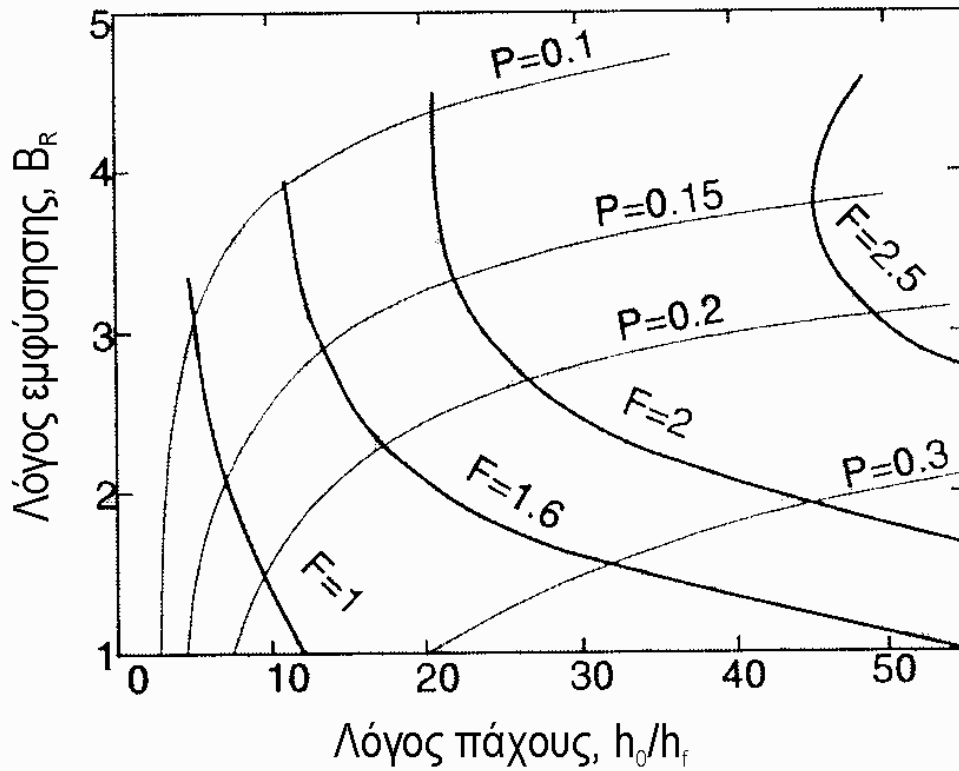
v_f : η ταχύτητα έλξης του φιλμ,

Q : η ογκομετρική παροχή του τήγματος,

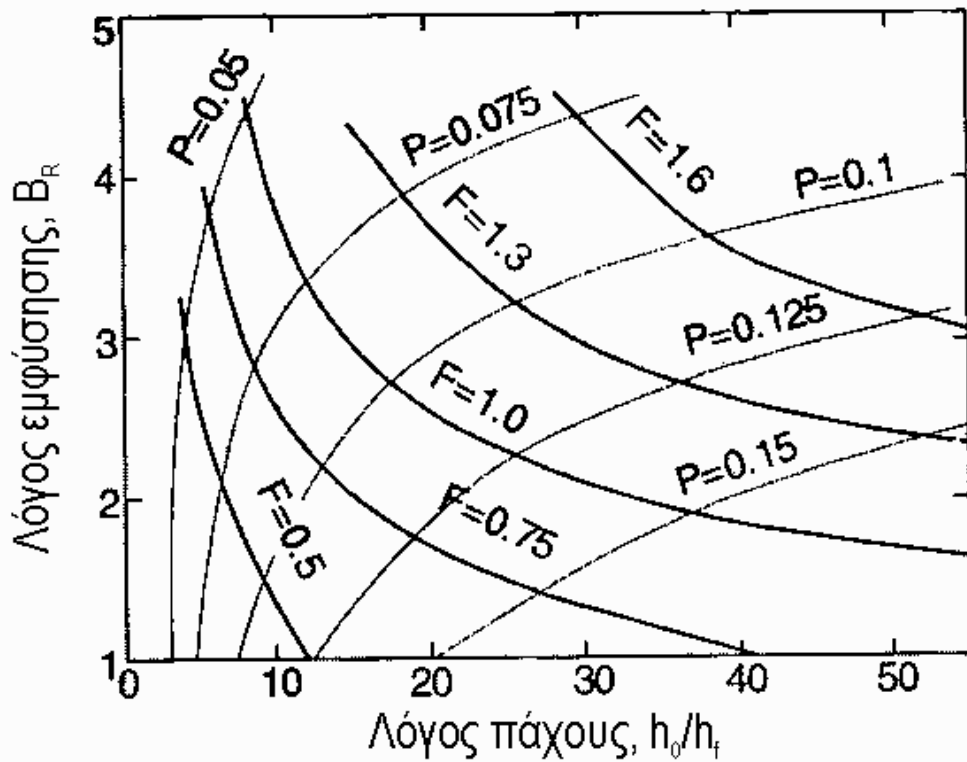
Δp η διαφορά πίεσης κατά μήκος του φιλμ,

f_z : η δύναμη τανυσμού που ασκείται στο φιλμ.

Στα Σχήματα 4.15 & 4.16, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για ισοθερμοκρασιακή και νευτωνική εκβολή φιλμ με φύσημα, χρησιμοποιώντας τις παραπάνω αδιάστατες παραμέτρους.



Σχήμα 4.15: Συνθήκες παραγωγής φιλμ με φύσημα για $X=10$.



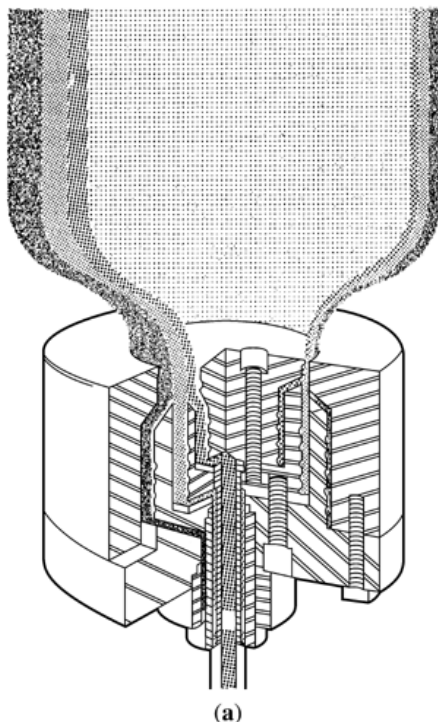
Σχήμα 4.16: Συνθήκες παραγωγής φιλμ με φύσημα για $X=20$.

Τα γραφήματα αυτά είναι χρήσιμα στον υπολογισμό της επίδρασης των συνθηκών μορφοποίησης στις τελικές διαστάσεις του παραγόμενου φιλμ.

4.4.1 Συνεκβολή

Η συνεκβολή είναι μια τροποποιημένη περίπτωση εκβολής η οποία δίνει τη δυνατότητα ταυτόχρονης μορφοποίησης δύο ή και περισσότερων ρευμάτων από τήγματα διαφορετικών πολυμερών, ώστε να γίνεται δυνατή η παραγωγή συνθέτων δομών φιλμ.

Η εφαρμογή της συνεκβολής απαιτεί εγκαταστάσεις που περιλαμβάνουν συστήματα εκβολής, συστήματα συνδυασμού της ροής των υλικών, κατάλληλη μήτρα μόρφωσης και σύστημα συλλογής του προϊόντος. Τα ρεύματα των διαφορετικών πολυμερών τροφοδοτούν ένα σύστημα συνδυασμού και στη συνέχεια οδηγούνται στη μήτρα μόρφωσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο συνδυασμός των υλικών γίνεται πριν την έξοδο από τη μήτρα. Στην εξωτερική περίμετρο του ανοίγματος της κύρια μήτρας προσαρμόζεται μία δεύτερη παροχή ρητίνης (από άλλο εκβολέα) που περιβάλλει την πρώτη, με αποτέλεσμα τελικά να μορφοποιείται ένα σωλήνας μέσα στον άλλο (Σχήμα 4.17).



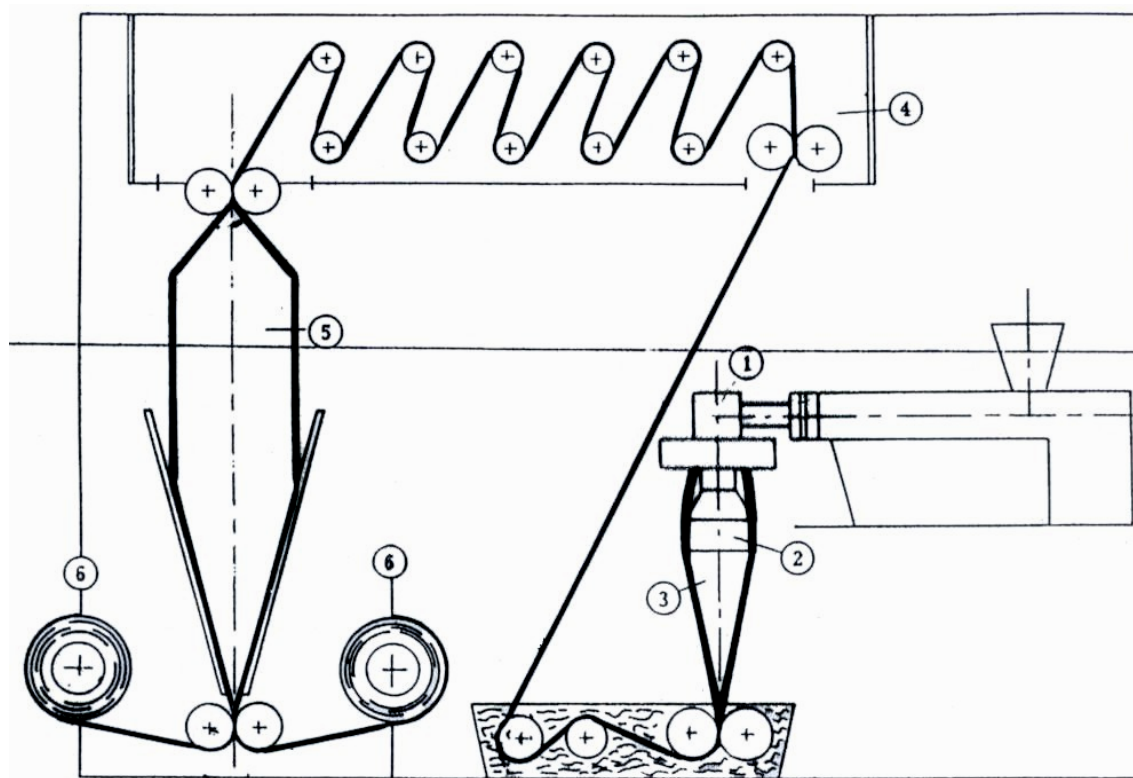
Σχήμα 4.17: Μήτρα για συνεκβολή φουσητού φιλμ.

Η συνεκβολή στην τεχνολογία του φιλμ χρησιμοποιείται για τη δημιουργία υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες φραγμού (barrier properties) με την εισαγωγή ενός στρώματος από πολυμερές με τέτοιες ιδιότητες [όπως το συμπολυμερές αιθυλενίου και βινυλικής αλκόολης (EVOH), το συμπολυμερές βινυλιδενοχλωριδίου-βινυλοχλωριδίου, (PVDC)].

4.4.2 Παραγωγή φιλμ με διαξονικό προσανατολισμό

Στο φιλμ αυτό τα μόρια είναι προσανατολισμένα κατά προτίμηση και προς τις δύο κάθετες κατευθύνσεις, γεγονός που βελτιώνει σημαντικά την αντοχή τους. Ο διπλός προσανατολισμός επιτυγχάνεται με έκταση διαδοχικά και προς τις δύο κατευθύνσεις και μπορεί να γίνει με κατάλληλες προσαρμογές στην παραγωγή φιλμ με εμφύσηση (Σχήμα 4.18)

Στην περίπτωση της εκβολής με φύσημα, δημιουργείται ο πρώτος σωλήνας ο οποίος με φύσημα τανύζεται σε ένα βαθμό, ψύχεται θερμαίνεται και υφίσταται για δεύτερη φορά τανυσμό με φύσημα (Double bubble technology).



Σχήμα 4.18: Παραγωγή διαξονικά προσανατολισμένου φιλμ με διπλό ασκό

(1) μήτρα, (2) δακτύλιος ψύξης, (3) ψύξη με νερό, (4) φούρνος θερμού ατμού, (5) διαξονικός προσανατολισμός, (6) συλλογή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΜΟΡΦΩΣΗ

Η περιστροφική μόρφωση (rotational molding) είναι τεχνική που εφαρμόζεται για την παραγωγή κοίλων αντικειμένων από θερμοπλαστικά υλικά ή και, σε μικρότερη έκταση, από θερμοσκληρυνόμενα.

Η αρχή της μεθόδου είναι απλή: μία ποσότητα στερεού σε σκόνη ή ρευστού πολυμερούς τοποθετείται μέσα στη μήτρα μόρφωσης. Η μήτρα θερμαίνεται, αρχίζει να περιστρέφεται σε δυο άξονες κάθετους μεταξύ τους και στη συνέχεια ψύχεται. Οι ταχύτητες περιστροφής είναι σχετικά μικρές ώστε να αποφεύγεται η ανάπτυξη ισχυρών φυγοκεντρικών δυνάμεων, οι οποίες θα οδηγούσαν σε σημαντικές ανομοιομορφίες στο πάχος των τοιχωμάτων του μορφοποιημένου αντικειμένου. Ο λόγος περιστροφής περί τον κύριο άξονα και το δευτερεύοντα άξονα είναι τυπικά ίση με 4:1. Κατά τη φάση της θέρμανσης της μήτρας και εφ' όσον χρησιμοποιείται πολυμερές με μορφή σκόνης, δημιουργείται αρχικά ένα πορώδες επίστρωμα στην επιφάνεια της μήτρας. Αυτό το επίστρωμα τήκεται στη συνέχεια και κατανέμεται ομοιόμορφα στην εσωτερική επιφάνεια της μήτρας. Στην περίπτωση που το πολυμερές το οποίο μορφοποιείται είναι ρευστό, η ομοιόμορφη κατανομή επιτυγχάνεται χωρίς να είναι απαραίτητη η ανύψωση της θερμοκρασίας. Η θέρμανση όμως εφαρμόζεται για τον πολυμερισμό ή την εμφάνιση πήγματος από πλευράς πολυμερούς. Η μήτρα ψύχεται στη συνέχεια, με τη διοχέτευση ρεύματος αέρα ή σταγονιδίων νερού και τέλος οδηγείται σε χώρο όπου ανοίγεται για την παραλαβή του αντικειμένου και τη φόρτωση με πολυμερές ώστε να ακολουθήσει ο επόμενος κύκλος (βλ. και Σχήμα 5.1).

Επειδή η τεχνική δεν προϋποθέτει την ανάπτυξη υψηλών πιέσεων (όπως η έγχυση) ή την ανάπτυξη υψηλών ρυθμών διάτμησης (όπως στην εκβολή), τόσο οι μήτρες όσο και ο υπόλοιπος εξοπλισμός είναι μάλλον φθηνός και παρουσιάζει μεγάλους χρόνους ζωής.

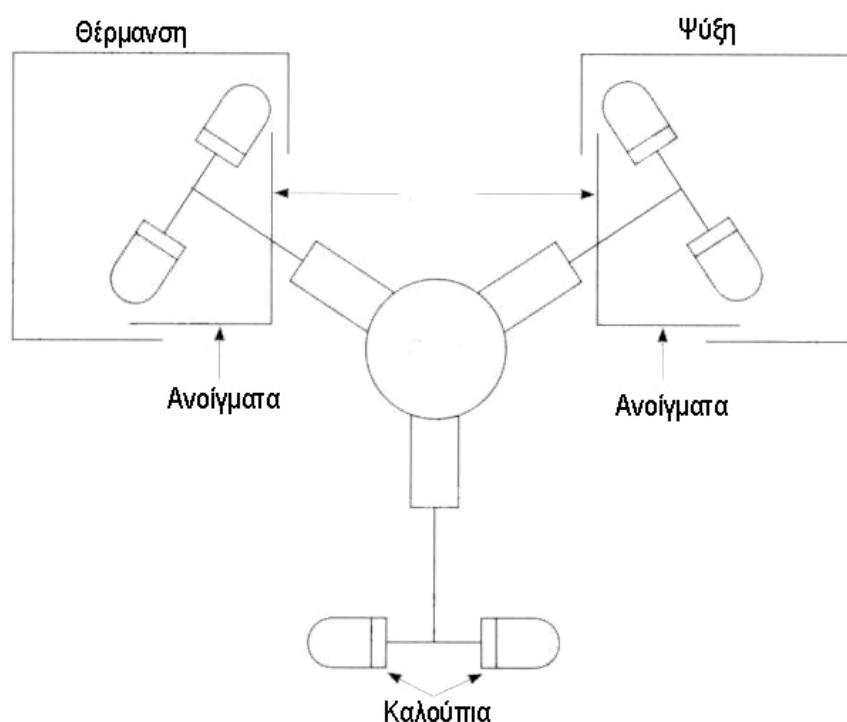
Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

1. Χαμηλό κόστος εγκαταστάσεων και βοηθητικών μέσων
2. Δυνατότητα παραγωγής ογκωδών αντικειμένων
3. Δυνατότητα παραγωγής εξειδικευμένων αντικειμένων με υψηλούς ρυθμούς παραγωγής

4. Δυνατότητα ταυτόχρονης παραγωγής διαφορετικών αντικειμένων
5. Ευχέρεια στην αλλαγή του είδους και του χρώματος του πολυμερούς που μορφοποιείται
6. Μειωμένες εσωτερικές τάσεις μετά τη μορφοποίηση, σε σχέση με άλλες τεχνικές
7. Ελαχιστοποιημένη απώλεια λόγω αποκομμάτων
8. Δυνατότητα παραγωγής αντικειμένων με διπλό τοίχωμα

5.1 ΕΙΔΗ ΜΗΧΑΝΩΝ

Οι μηχανές που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα εφαρμόζουν περιστροφή στο οριζόντιο επίπεδο. Είναι εφοδιασμένες με τρεις βραχίονες, οι οποίοι τοποθετούν τις μήτρες στη θέση τους. Σε ορισμένες περιπτώσεις ο αριθμός των βραχιόνων μπορεί να είναι και πέντε.



Σχήμα 5.1: Εγκατάσταση περιστροφικής μόρφωσης.

Η θέρμανση της μήτρας μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους αλλά ο συνηθέστερος είναι με διοχέτευση ρεύματος θερμού αέρα, δεδομένου ότι η μέθοδος αυτή είναι καθαρή, φθηνή και ασφαλής. Έτσι, η θέρμανση με λάδι ή άλλα μέσα έχει μάλλον καταργηθεί.

Η ψύξη είναι στάδιο της παραγωγής στο οποίο δεν έχει δοθεί η απαραίτητη προσοχή. Έχει όμως αποδειχθεί, ότι το στάδιο αυτό είναι υπεύθυνο για ορισμένες

ιδιότητες του τελικού αντικειμένου, όπως η διαστατική του σταθερότητα και οι φυσικές ιδιότητες. Πράγματι, στα μεν κρυσταλλικά πολυμερή η γρήγορη ψύξη εμποδίζει την ανάπτυξη κρυστάλλων μεγάλου μεγέθους και έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή αντικειμένων με υψηλότερη αντοχή στην κρούση. Στην περίπτωση, βέβαια, των άμορφων πολυμερών, ο ρυθμός ψύξης δεν έχει σημαντική επίδραση, δεδομένου ότι δεν υπάρχει καθόλου το ενδεχόμενο ανάπτυξης κρυστάλλων.

Έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για την αυτοματοποίηση στο άνοιγμα της μήτρας, την παραλαβή του αντικειμένου και τη φόρτωση της μήτρας. Η δυνατότητα αυτή είναι μάλλον ακατόρθωτη στη γενική περίπτωση περιστροφικής μόρφωσης, όπου οι ποσότητες πολυμερούς, τα είδη και οι μορφές αντικειμένων και γενικότερα οι κύκλοι μόρφωσης ποικίλουν. Η αυτοματοποίηση είναι τεχνολογικά δυνατή μόνο σε περιπτώσεις παραγωγής του ίδιου αντικειμένου με πολύ υψηλούς ρυθμούς παραγωγής. Από οικονομική άποψη πάντως, η μόνη αυτοματοποίηση που δικαιολογείται είναι στη ζύγιση του πολυμερούς.

5.2 ΥΛΙΚΑ

5.2.1 ΠΛΑΣΤΙΖΟΛΕΣ

Δεδομένου ότι μία σημαντική κατεύθυνση της περιστροφικής μόρφωσης είναι η παραγωγή παιχνιδιών, οι πλαστιζόλες βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή ως πρώτες ύλες για την τεχνική αυτή.

Η σημαντικότερη παράμετρος, που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, είναι η ρεολογική συμπεριφορά της πλαστιζόλης, τόσο σε θερμοκρασία δωματίου όσο και σε ανυψωμένες θερμοκρασίες. Οι πλαστιζόλες είναι κατάλληλες για περιστροφική μόρφωση όταν παρουσιάζουν χαμηλά ιξώδη σε χαμηλούς ρυθμούς διάτμησης. Άριστη περιοχή τιμών ιξώδους είναι τα 1000-4000 cP, οπότε δίνεται η δυνατότητα της ομοιόμορφης κατανομής του υλικού στο εσωτερικό της μήτρας πριν το σχηματισμό πηγματος. Πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι ο σωστός θερμοκρασιακός έλεγχος και ο έλεγχος του κύκλου για το σχηματισμό πηγματος, αποτελούν σημαντικές παραμέτρους για την παραγωγή αντικειμένου με ισόπαχα τοιχώματα.

Οι πλαστιζόλες πάντως, δίνουν μεγάλη ευελιξία στο χειριστή, δεδομένου ότι, μεταβάλλοντας το αρχικό πολυμερές, τον πλαστικοποιητή ή τα υπόλοιπα πρόσθετα, είναι δυνατό να ρυθμιστεί σε μεγάλο εύρος το ιξώδες, η καμπύλη πηγματος καθώς και οι ιδιότητες του τελικού προϊόντος.

5.2.2 ΚΟΝΙΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ

Τα αποτελέσματα μελετών πάνω στην καταλληλότητα διαφόρων πολυμερών για μορφοποίηση με την τεχνική της περιστροφικής μόρφωσης, έδειξαν σαν υποψήφια υλικά τα πολυανθρακικά, το διασταυρωμένο πολυαιθυλένιο, το νάυλον, τις πολυακετάλες κλπ. Βασικό κριτήριο για την επιλογή ενός πολυμερούς, είναι η θερμική του σταθερότητα στις συνθήκες μορφοποίησης.

Το μέγεθος των κόκκων που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως της τάξης των 35 mesh. Η λεπτή κοκκομετρία εξασφαλίζει την καλή κατανομή του υλικού, ιδιαίτερα όταν το σχήμα του αντικειμένου που παράγεται είναι πολύπλοκο. Το κατάλληλο όμως μέγεθος κόκκου, είναι και συνάρτηση των ρεολογικών ιδιοτήτων του πολυμερούς καθώς και της μορφής του αντικειμένου που μορφοποιείται. Έτσι, απαιτούνται μικρότερα μεγέθη κόκκου στις περιπτώσεις πολυμερών με υψηλά ιξώδη ή αντικειμένων με λεπτά τοιχώματα και πολύπλοκα σχήματα.

5.3 ΜΗΤΡΕΣ

Με βάση την κατασκευή τους οι μήτρες διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: Τις κατασκευασμένες από χυτό αλουμίνιο, από μηχανουργικά επεξεργασμένο μέταλλο και από επινικελωμένο μέταλλο (ηλεκτροχημικά ή με εξάχνωση). Για τη μορφοποίηση υλικών που παρουσιάζουν εξώθερμο κατά τη σκλήρυνση, εφαρμόζονται ακόμη και μήτρες από ελαστικό ή ενισχυμένο πολυεστέρα.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η παραγωγή μερικών δοκιμαστικών τεμαχίων από θερμοπλαστικό υλικό, μπορεί να γίνει σε μήτρες από ενισχυμένο πολυεστέρα. Η θερμική καταπόνηση μειώνει σημαντικά το χρόνο ζωής της μήτρας, που σε κάθε περίπτωση όμως επιτρέπει την παραγωγή των δοκιμαστικών αντικειμένων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ 4,5

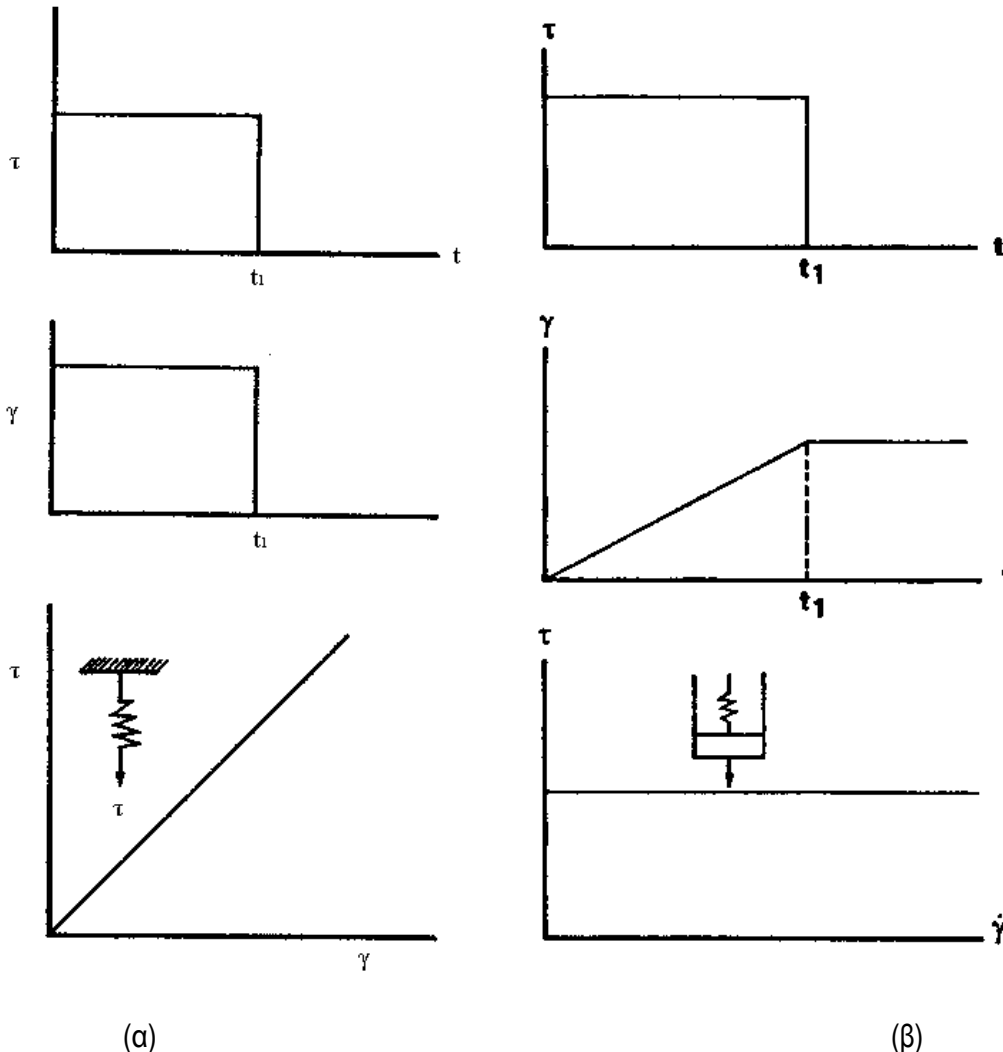
1. Ανδρεόπουλος Α.Γ., “Επεξεργασία Πολυμερών & Σχεδιασμός Προϊόντων”, ΕΜΠ (2004).
2. Brent Strong A., “Plastics: Materials and Processing”, Prentice Hall 3rd ed. (2006).
3. Sweeting O.J. “The Science and Technology of Polymer Films”, Interscience Publishers, p. 410-423.
4. Osswald T.A. “Polymer Processing Fundamentals”, Hanser 1998, p. 143-148.
5. Tadmor Z., and Gogos C.G., “Principles of Polymer Processing”, SPE Monographs, Wiley-Interscience, New York (1979).
6. Μητσούλης Ευάγγ., “Βασικές Αρχές Μορφοποίησης Πολυμερών”, ΕΜΠ (1999).

6. ΙΞΩΔΟΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

6.1 ΙΞΩΔΟΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Τα πολυμερή είναι ιξωδοελαστικά υλικά, εμφανίζουν τα συνδυασμένα μηχανικά χαρακτηριστικά τόσο των ελαστικών στερεών όσο και των ιξωδών υγρών.

Τα ελαστικά στερεά έχουν καθορισμένο σχήμα και επέρχεται ακαριαία παραμόρφωση με την επίδραση εξωτερικής τάσης. Κατά τον τερματισμό της εξωτερικής τάσης το δοκίμιο λαμβάνει τις αρχικές του διαστάσεις. Το μηχανικό στοιχείο που περιγράφει την ιδανική ελαστική συμπεριφορά είναι το ελατήριο (Σχήμα 6.1α).



Σχήμα 6.1: Το μηχανικό στοιχείο της ελαστικής συμπεριφοράς (α) και της συμπεριφοράς ιξώδους υγρού (β).

Τα ιδανικά ελαστικά υλικά υπακούουν στο νόμο του Hooke, η παραμόρφωση (γ) είναι ανάλογη της τάσης (τ) που εφαρμόζεται και είναι ανεξάρτητη του ρυθμού παραμόρφωσης του δοκιμίου:

$$\tau = E\gamma \quad [6.1]$$

όπου E μέτρο ελαστικότητας.

Τα ιξώδη υγρά δεν έχουν καθορισμένο σχήμα και η παραμόρφωσή τους με την επιβολή εξωτερικής φόρτισης δεν είναι ακαριαία αλλά εξαρτάται από το χρόνο. Επίσης η παραμόρφωση αυτή δεν είναι αντιστρεπτή, δηλαδή δεν ανακτάται όταν τερματίζεται η τάση. Το πιο απλό μοντέλο ρευστού είναι αυτό που υπακούει στο νόμο του Newton:

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad [6.2]$$

όπου η είναι το ιξώδες και

$d\gamma/dt$ είναι το ρυθμός παραμόρφωσης.

Το μηχανικό στοιχείο που περιγράφει τη συμπεριφορά ενός νευτωνικού ρευστού είναι το υδραυλικό έμβολο (αποσβέστης κραδασμών) (Σχήμα 6.1β).

Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά των πολυμερών μπορεί να προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας απλά φυσικά μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στο συνδυασμό μηχανικών στοιχείων που παρουσιάζουν την ιδανικά ιξώδη (νευτωνική) και την ιδανικά ελαστική συμπεριφορά. Το μηχανικό στοιχείο για το μοντέλο του νευτωνικού ρευστού είναι ένα υδραυλικό έμβολο (αποσβέστης κραδασμών), ενώ για την ελαστική συμπεριφορά χρησιμοποιείται ένα ελατήριο.

6.1.1 Μοντέλο Maxwell

Το μοντέλο Maxwell αποτελείται από ένα ελατήριο και ένα υδραυλικό έμβολο συνδεδεμένα σε σειρά. Η επιβολή μιας σταθερής τάσης στο μοντέλο αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα μια ολική παραμόρφωση (γ) που θα ισούται με το άθροισμα των παραμορφώσεων του ελατηρίου (γ_s) και του υδραυλικού εμβόλου (γ_d):

$$\gamma = \gamma_s + \gamma_d \quad [6.3]$$

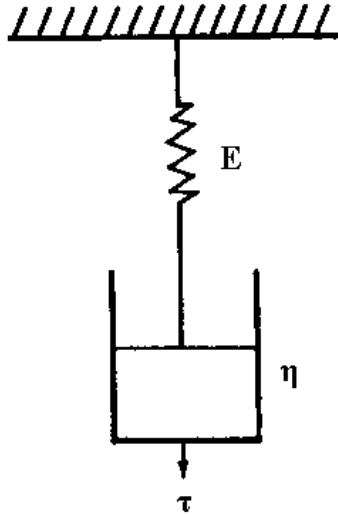
$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_s + \dot{\gamma}_d \quad [6.4]$$

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{E} \dot{\tau} + \frac{1}{\eta} \tau \quad [6.5]$$

$$\eta \dot{\gamma} = \frac{\eta}{E} \dot{\tau} + \tau \quad [6.6]$$

Ο λόγος η/E έχει διαστάσεις χρόνου και συνήθως συμβολίζεται με λ . Το λ καλείται *χρόνος χαλάρωσης ή απόκρισης*, και αποτελεί σημαντική παράμετρο της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς, εκφράζοντας το λόγο του ιξώδους τμήματος της απόκρισης ως προς το ελαστικό τμήμα της.

$$\eta \dot{\gamma} = \lambda \dot{\tau} + \tau \quad [6.7]$$



Σχήμα 6.2: Το ιξωδοελαστικό μοντέλο Maxwell.

Ερπυσμός

Κατά τον ερπυσμό, επιβάλλεται στο μοντέλο μια σταθερή τάση (τ_0) τη χρονική στιγμή 0, και καταγράφεται η παραμόρφωση σε συνάρτηση με το χρόνο $\gamma(t)$. Όταν ένα υλικό εμφανίζει σημαντικό ερπυσμό, είναι ακατάλληλο για εφαρμογές όπου απαιτείται διαστατική σταθερότητα.

Για τη μελέτη του ερπυσμού ορίζεται ο όρος *ενδοτικότητα* (compliance) του υλικού ως ο λόγος:

$$J(t) = \gamma(t)/\tau \quad [6.8]$$

Η ενδοτικότητα είναι δηλαδή το αντίστροφο του μέτρου ελαστικότητας.

Στο μοντέλο Maxwell για σταθερή τάση, η παραμόρφωση του ελατηρίου είναι:

$$\dot{\gamma}_s = \frac{1}{E} \frac{d\tau}{dt} = 0 \quad [6.9]$$

Η εξίσωση [6.6] γίνεται:

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_s + \dot{\gamma}_d = \frac{\tau_0}{\eta} \quad [6.10]$$

η οποία δείχνει ένα σταθερό ρυθμό μεταβολής του ερπυσμού με το χρόνο. Η εξίσωση [6.10] με ολοκλήρωση δίνει:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{\tau_0}{\eta} \Rightarrow \int_{\gamma_0}^{\gamma(t)} d\gamma = \frac{\tau_0}{\eta} \int_0^t dt \Rightarrow \gamma(t) = \frac{\tau_0}{\eta} t + C \quad [6.11]$$

όπου C η σταθερά ολοκλήρωσης. Η τιμή της σταθεράς υπολογίζεται από την οριακή συνθήκη, ότι στην αρχή της φόρτισης ($t=0$) το ελατήριο παραμορφώνεται ακαριαία και ο ερπυσμός του μοντέλου είναι ίσος με την παραμόρφωση του ελατηρίου:

$$\gamma(0) = \tau_0 / E \quad [6.12]$$

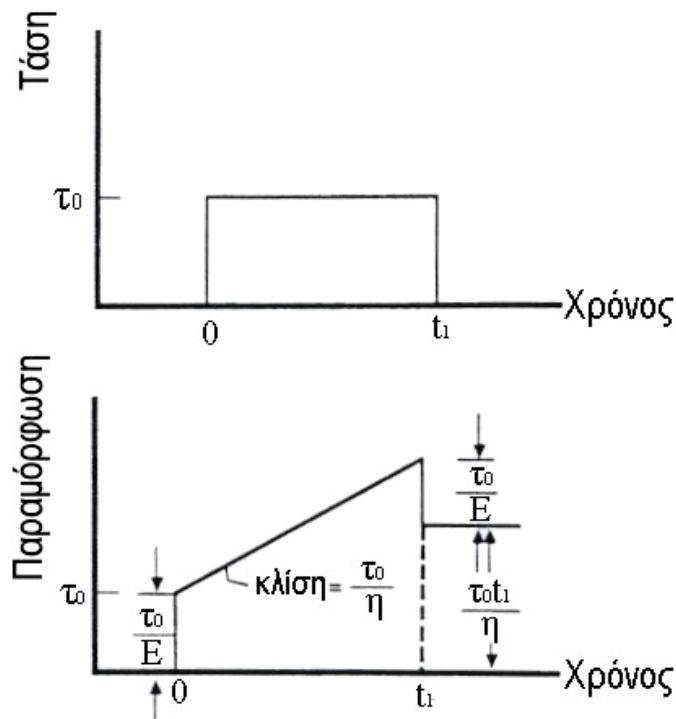
Η εξίσωση [6.11] γίνεται:

$$\gamma(t) = \frac{\tau_0}{E} + \frac{\tau_0}{\eta} t \quad [6.13]$$

Συχνά, είναι χρήσιμο να εκφραστούν τα αποτελέσματα με την εξαρτώμενη από το χρόνο ενδοτικότητα του μοντέλου $J(t)$:

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\tau_0} = E^{-1} + \frac{t}{\eta} \quad [6.14]$$

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3, η ακαριαία εφαρμογή τάσης τ_0 ακολουθείται αρχικά από μια ακαριαία παραμόρφωση λόγω της ανταπόκρισης του ελατηρίου ίση με τ_0/E (ελαστική απόκριση).



Σχήμα 6.3: Η περιγραφή του ερπυσμού με το μοντέλο Maxwell.

Με τη διατήρηση της σταθερής τάσης, το υδραυλικό έμβολο παραμορφώνεται γραμμικά με το χρόνο (ιζώδης συμπεριφορά). Όταν αφαιρεθεί ακαριαία η τάση, το ελατήριο επανέρχεται στην αρχική του θέση με ακαριαία ανάκτηση της ελαστικής παραμόρφωσης τ_0/E . Η παραμόρφωση λόγω της ιζώδους ροής του υδραυλικού εμβόλου παραμένει σαν μόνιμη παραμόρφωση.

Χαλάρωση τάσης

Στο πείραμα της χαλάρωσης τάσης (stress relaxation) εφαρμόζεται τη χρονική στιγμή $t=0$ μια σταθερή παραμόρφωση γ_0 και στη συνέχεια καταγράφεται η τάση $\tau(t)$ που απαιτείται για να διατηρηθεί η επιβληθείσα παραμόρφωση, ενώ η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή. Στα ιξωδοελαστικά υλικά, παρατηρείται μια βαθμιαία μείωση της τάσης αυτής με το χρόνο λόγω διαδικασιών μοριακής χαλάρωσης που πραγματοποιούνται μέσα στο πολυμερές.

Επομένως ισχύει $\dot{\gamma} = 0$.

Η εξίσωση Maxwell γίνεται:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\gamma_s}{dt} + \frac{d\gamma_d}{dt} = 0 \quad [6.15]$$

$$\frac{1}{E} \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta} = 0 \quad [6.16]$$

$$\int_{\tau_0}^{\tau(t)} \frac{d\tau}{\tau} = -\frac{E}{\eta} \int_0^t dt \quad [6.17]$$

$$\ln \frac{\tau(t)}{\tau_0} = -\frac{Et}{\eta} \quad \text{ή} \quad [6.18]$$

$$\tau(t) = \tau_0 \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right) \quad [6.19]$$

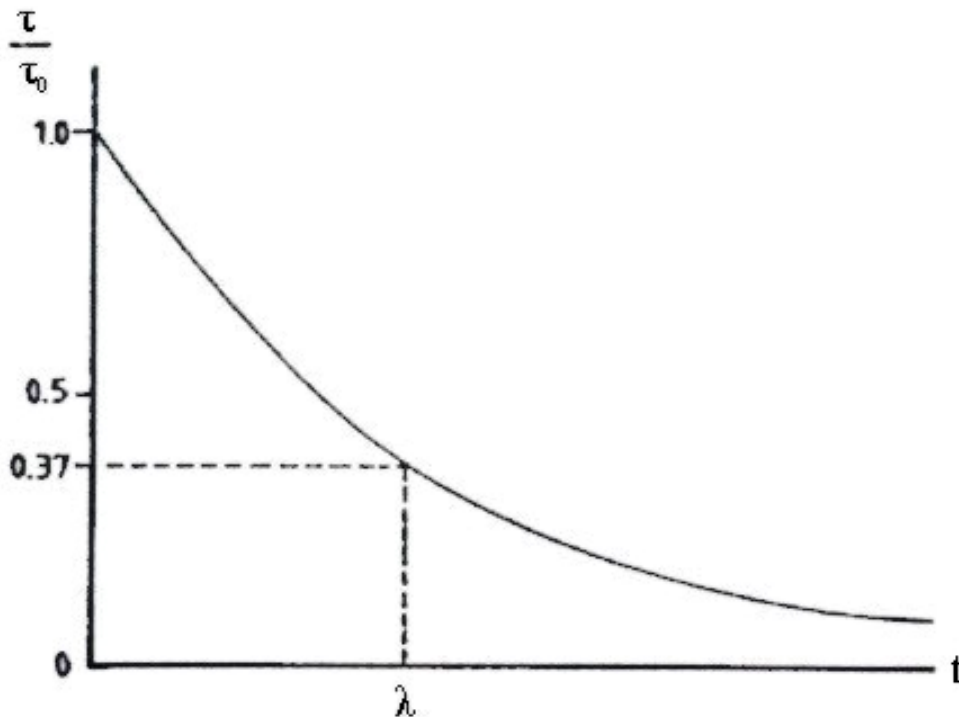
όπου $\lambda = \eta/E$, ο χρόνος χαλάρωσης.

Για $t = \lambda$, $\tau = \tau_0/e$. Επομένως το λ αντιπροσωπεύει το χρόνο που απαιτείται για να μειωθεί η τάση κατά $1/e = 0.37$. Η φυσική σημασία της ποσότητας αυτής γίνεται καλύτερα αντιληπτή λαμβάνοντας υπόψη το μοντέλο Maxwell. Αν επιβληθεί μια ξαφνική εφελκυστική παραμόρφωση στο σύστημα, το ελατήριο θα αντιδράσει αμέσως, όμως η τάση θα χαλαρώσει βαθμιαία (εκθετικά) καθώς το υδραυλικό έμβολο θα αρχίσει και θα συνεχίσει να κινείται. Αν περάσει αρκετός χρόνος η τάση θα αποκτήσει τελικά μηδενική τιμή.

Στην περίπτωση αυτή το μέτρο ελαστικότητας λέγεται *μέτρο χαλάρωσης* και δίνεται από τη σχέση:

$$E_r(t) = \frac{\tau_0}{\gamma} \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right) \quad [6.20]$$

Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζεται η καμπύλη χαλάρωσης για το ρευστό Maxwell. Αρχικά όλη η παραμόρφωση οφείλεται στο ελατήριο. Με την πάροδο του χρόνου το υδραυλικό έμβολο παραμορφώνεται ενώ το ελατήριο ανακτά την παραμόρφωσή του. Στο τέλος, όλη η παραμόρφωση μεταφέρεται από το ελατήριο στο υδραυλικό έμβολο με συνέπεια $\tau \rightarrow 0$. Για χρόνους πολύ μικρότερους από το χρόνο χαλάρωσης, το στοιχείο Maxwell συμπεριφέρεται κυρίως ως ελατήριο ενώ για χρόνους πολύ μεγαλύτερους από το χρόνο χαλάρωσης το στοιχείο συμπεριφέρεται ως υδραυλικό έμβολο. Για χρόνους στην περιοχή του χρόνου χαλάρωσης, η ανταπόκριση περιλαμβάνει το συνδυασμένο αποτέλεσμα του ελατηρίου και του υδραυλικού εμβόλου.



Σχήμα 6.4: Η χαλάρωση τάσης σύμφωνα με το μοντέλο Maxwell.

6.1.2 Μοντέλο Voight

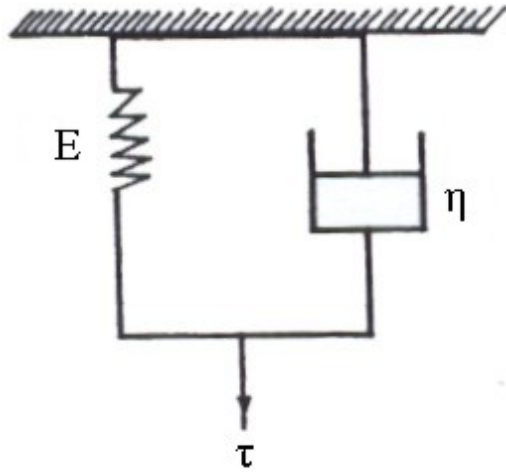
Το μοντέλο αυτό αποτελείται από ένα ελατήριο και ένα υδραυλικό έμβολο που συνδέονται παράλληλα. Στην περίπτωση αυτή η ολική τάση είναι το άθροισμα των επιμέρους τάσεων:

$$\tau = \tau_s + \tau_d = E\gamma + \eta\dot{\gamma} \quad [6.21]$$

Λόγω γεωμετρίας, η συνολική παραμόρφωση είναι ίση με την παραμόρφωση του ελατηρίου και με την παραμόρφωση του εμβόλου:

$$\gamma = \gamma_s = \gamma_d$$

[6.22]



Σχήμα 6.5: Το ιξωδοελαστικό μοντέλο Voight.

Ερπυσμός

Στην περίπτωση του ερπυσμού, μια σταθερή τάση τ_0 εφαρμόζεται στο μοντέλο Voight τη χρονική στιγμή $t=0$ και αίρεται απότομα ($\tau=0$) τη χρονική στιγμή t_1 . Η εξίσωση [6.21] είναι μια απλή διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης. Η απαιτούμενη οριακή συνθήκη είναι για άπειρα μεγάλο χρόνο η παραμόρφωση του μοντέλου θα ισούται με την παραμόρφωση του ελατηρίου τ_0/E . Με ολοκλήρωση η εξίσωση [6.21] δίνει:

$$\gamma(t) = \frac{\tau_0}{E} \left[1 - \exp\left(-\frac{E}{\eta} t\right) \right] \quad [6.23]$$

λαμβάνοντας υπόψη τον ορισμό του χρόνου χαλάρωσης $\lambda = \eta/E$, η εξίσωση [6.23] γίνεται:

$$\gamma(t) = \frac{\tau_0}{E} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right) \right] \quad [6.24]$$

Στη σχέση αυτή ο όρος τ_0/E είναι ο μέγιστος ερπυσμός που θα αποκτούσε ακαριαία το ελατήριο αν δεν υπήρχε το υδραυλικό έμβολο.

Στην περίπτωση που αρθεί η τάση ($\tau=0$), το υλικό επανέρχεται στις αρχικές του διαστάσεις και η εξίσωση [6.21] δίνει:

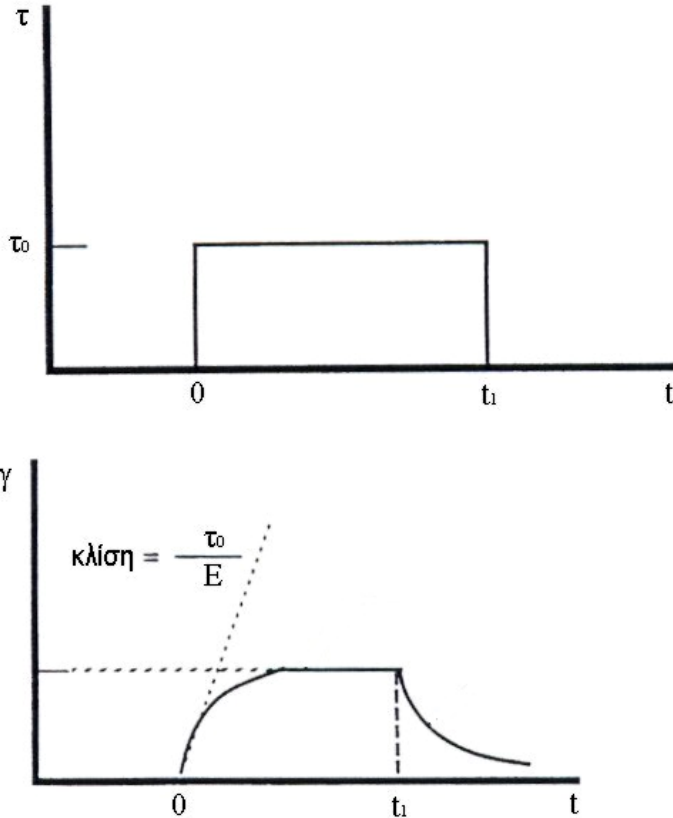
$$E\gamma + \eta\dot{\gamma} = 0 \Rightarrow \dot{\gamma} + \frac{E}{\eta}\gamma = 0 \quad [6.25]$$

λαμβάνοντας υπόψη τον ορισμό του χρόνου χαλάρωσης $\lambda = \eta/E$, η εξίσωση [6.25] γίνεται:

$$\dot{\gamma} + \frac{1}{\lambda} \gamma = 0 \quad [6.26]$$

$$\gamma(t) = \gamma(t_1) e^{-\frac{(t-t_1)}{\lambda}} \quad \text{για } t > t_1 \quad [6.27]$$

όπου $\gamma(t_1)$ είναι η παραμόρφωση την στιγμή που αφαιρείται η τάση.



Σχήμα 6.6: Ο ερπυσμός και η ανάκτηση σύμφωνα με το μοντέλο Voigt.

6.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟΝ ΕΡΠΥΣΜΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΧΑΛΑΡΩΣΗ ΤΑΣΗΣ

Κάτω της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης T_g , δεν υπάρχει θερμική κίνηση των τμημάτων της κύριας μακροαλυσίδας του πολυμερούς. Στην περιοχή αυτή ο ερπυσμός είναι ελάχιστος, ακόμη και για παρατεταμένες χρονικά δοκιμές. Στην περιοχή υαλώδους μετάπτωσης ο ρυθμός ερπυσμού γίνεται μέγιστος. Σε θερμοκρασίες πολύ υψηλότερες από την T_g το μέτρο ελαστικότητας γίνεται σημαντικά μικρότερο, ο ρυθμός ερπυσμού ελαττώνεται ενώ ο ερπυσμός αυξάνει.

Σε θερμοκρασίες χαμηλότερες της T_g το μοριακό βάρος του πολυμερούς δεν έχει σημαντική επίδραση στον ερπυσμό ενώ πάνω από την T_g υπάρχει σημαντική εξάρτηση. Η εξάρτηση από το μοριακό βάρος συνδέεται με το ιξώδες του πολυμερούς. Όσο αυξάνει το ιξώδες τόσο μικρότερος γίνεται ο ρυθμός ερπυσμού. Η παρουσία σταυροδεσμών μεταξύ των πολυμερικών αλυσίδων εμποδίζουν την μοριακή ολίσθηση και περιορίζουν το φαινόμενο του ερπυσμού. Επίσης η ύπαρξη κρυσταλλινών στα ημικρυσταλλικά πολυμερή, οι οποίοι δρουν ως σταυροδεσμοί, μειώνουν τον ερπυσμό. Η χαλάρωση τάσης επηρεάζεται πολύ από τη θερμοκρασία και είναι εξαιρετικά αργή σε θερμοκρασίες μικρότερες της T_g . Σημαντική αύξηση του ρυθμού χαλάρωσης συμβαίνει στην περιοχή της υαλώδους μετάπτωσης. Η ύπαρξη σταυροδεσμών στο πολυμερές εμποδίζει την τάση να χαλαρώσει στο μηδέν. Στα κρυσταλλικά πολυμερή, η κρυσταλλικότητα διευρύνει το φάσμα των χρόνων χαλάρωσης και καθυστερεί τη χαλάρωση τάσης μέχρι μία μηδενική τιμή.

Για να χαρακτηρισθεί πλήρως η ιξωδοελαστική συμπεριφορά ενός πολυμερούς πρέπει να πραγματοποιηθούν πειράματα ισόθερμης χαλάρωσης σε μια περιοχή θερμοκρασιών. Στο Σχήμα 6.7 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του λογαρίθμου του μέτρου χαλάρωσης E_r σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Μπορούν να σημειωθούν οι ακόλουθες διακριτές περιοχές στην καμπύλη που φαίνεται στο σχήμα αυτό:

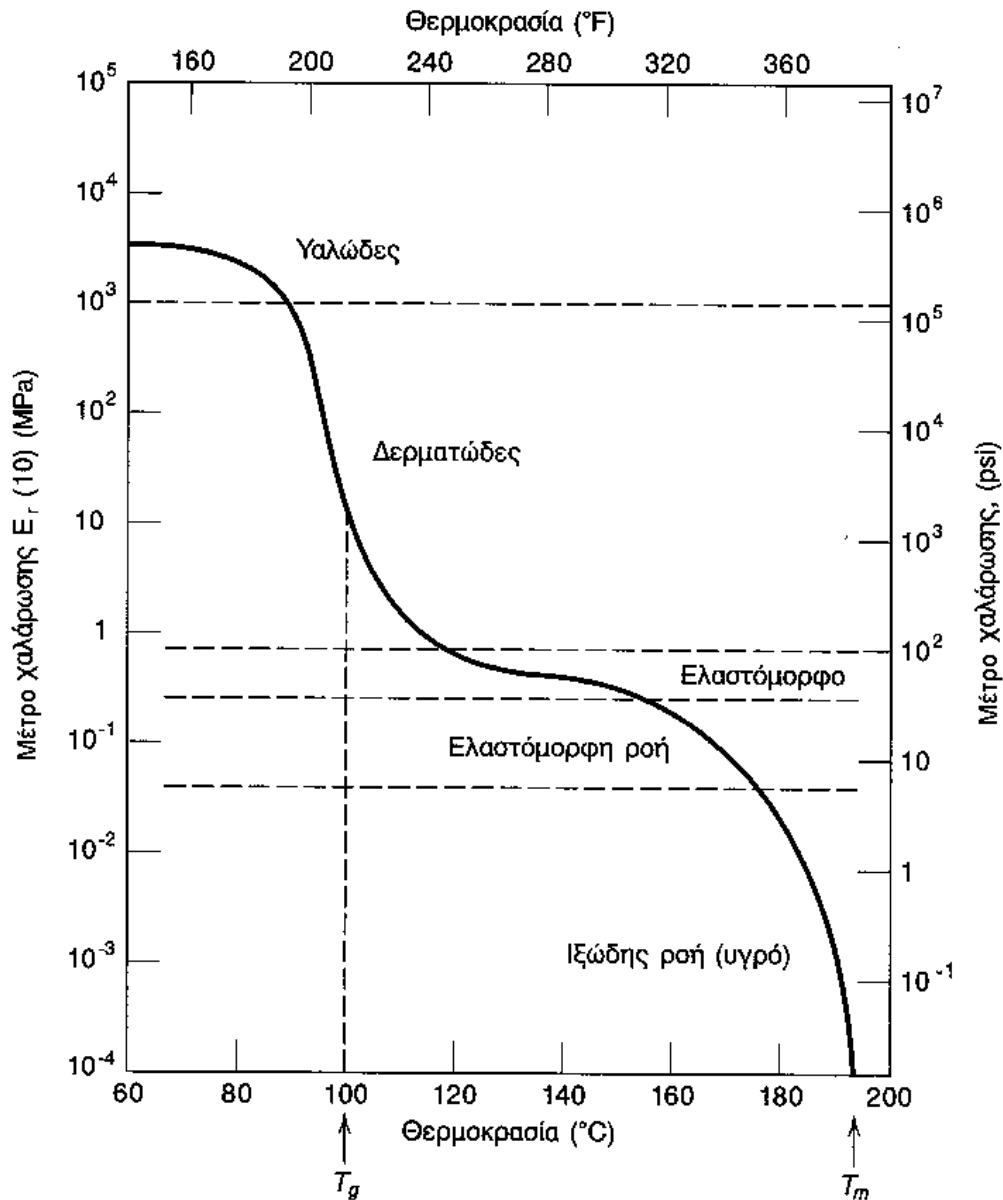
Υαλώδης περιοχή: στις χαμηλότερες θερμοκρασίες στην υαλώδη περιοχή, το υλικό είναι δύσκαμπτο και ψαθυρό, το μέτρο ελαστικότητας παίρνει υψηλές τιμές και είναι ανεξάρτητο της θερμοκρασίας.

Δερματώδης ή περιοχή μετάπτωσης: καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, στην περιοχή της T_g , το E_r μειώνεται απότομα, η παραμόρφωση του πολυμερούς εξαρτάται από το χρόνο και δεν είναι πλήρως ανακτήσιμη με τον τερματισμό της εφαρμοζόμενης τάσης.

Ελαστόμορφη περιοχή: στην περιοχή θερμοκρασιών του ελαστόμορφου “πλατώ”, παρατηρείται μικρή μόνο μεταβολή του E_r συναρτήσει της θερμοκρασίας.

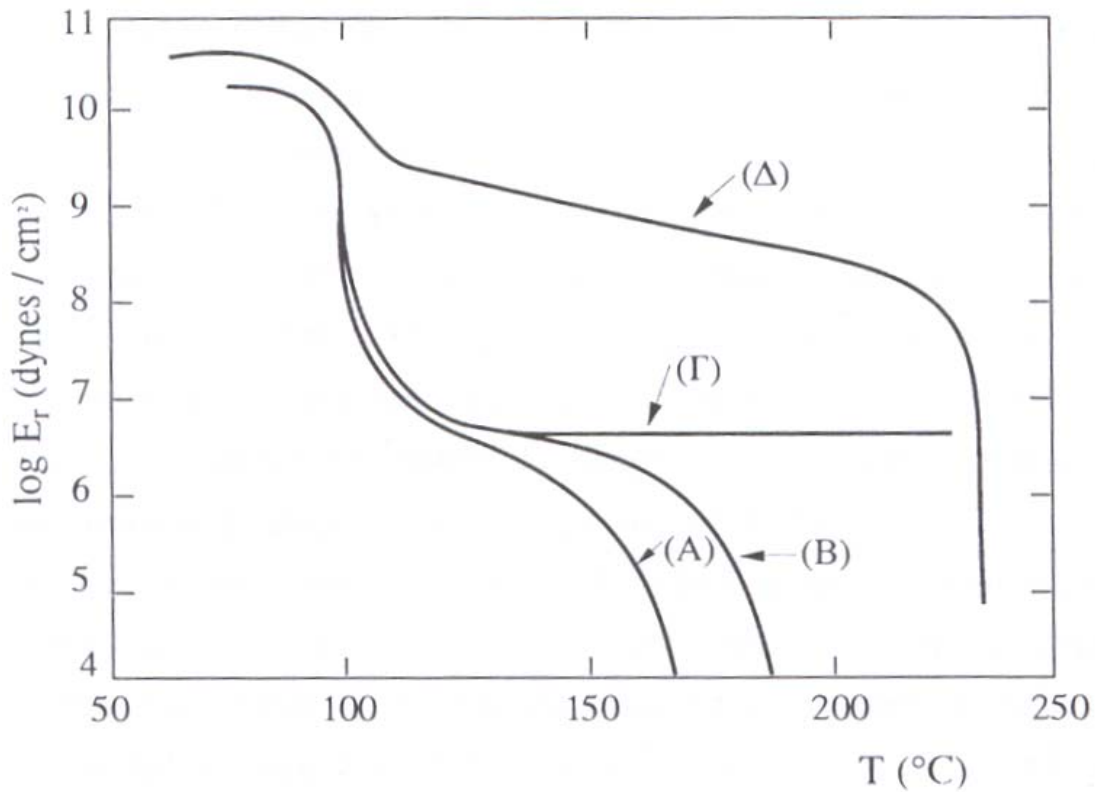
Περιοχή ελαστόμορφης ροής: Το πολυμερές συμπεριφέρεται σαν ιξωδοελαστικό ρευστό.

Περιοχή ιξώδους ρευστού: Το E_r μειώνεται δραματικά όσο αυξάνεται η θερμοκρασία.



Σχήμα 6.7: Μεταβολή του E_r με τη θερμοκρασία, για άμορφο πολυστυρένιο.

Στο Σχήμα 6.8 φαίνεται η γραφική παράσταση του μέτρου χαλάρωσης $E_r(t)$ συναρτήσει της θερμοκρασίας για υλικά από πολυστυρένιο που έχουν διάφορες μοριακές διαμορφώσεις. Για πολυμερές με δομή αραιού πλέγματος (Γ) η ελαστόμορφη περιοχή εμφανίζει ένα “πλατώ” που εκτείνεται ως τη θερμοκρασία διάσπασης του πολυμερούς. Ελαστόμορφα ή ελαστομερικά υλικά παρουσιάζουν αυτό το είδος της συμπεριφοράς. Για το κρυσταλλικό πολυστυρένιο (Δ), η μείωση του E_r είναι πολύ λιγότερο έντονη εφ’ όσον μόνο ένα μικρό κλάσμα όγκου αυτού του υλικού είναι άμορφο και υφίσταται υαλώδη μετάπτωση.



Σχήμα 6.8: Μεταβολή του E_r συναρτήσει της θερμοκρασίας για πολυστυρένιο: άμορφο χαμηλότερου (A) και υψηλότερου (B) μοριακού βάρους, με δομή αραιού πλέγματος (Γ) και κρυσταλλικό.

6.3 ΔΥΝΑΜΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μια σημαντική δοκιμασία των ιξωδοελαστικών υλικών είναι η δυναμική μηχανική δοκιμή. Σύμφωνα με αυτή τη μέτρηση το δοκίμιο υποβάλλεται σε μια περιοδικά μεταβαλλόμενη με το χρόνο τάση ή παραμόρφωση.

Για γραμμική ιξωδοελαστική συμπεριφορά, αν επιβληθεί μια παραμόρφωση:

$$\gamma = \gamma_0 \sin \omega t \quad [6.28]$$

Η τάση του υλικού θα είναι:

$$\tau = \tau_0 \sin(\omega t + \delta) \quad [6.29]$$

Όπου γ_0 : η μέγιστη παραμόρφωση, ω : γωνιακή ταχύτητα,
 τ_0 : η μέγιστη τάση, δ : η διαφορά φάσης

Η εξίσωση 6.29 αναλύεται σε:

$$\tau = (\tau_0 \cos \delta) \sin \omega t + (\tau_0 \sin \delta) \cos \omega t \quad [6.30]$$

Η τάση αποτελείται από δύο συνιστώσες, η μία σε φάση με την παραμόρφωση ($\tau_0 \cos \delta$) και η άλλη με διαφορά φάσης 90° με την παραμόρφωση ($\tau_0 \sin \delta$). Επομένως η τάση γράφεται:

$$\tau = \gamma_0 G' \sin \omega t + \gamma_0 G'' \cos \omega t \quad [6.31]$$

όπου

$$G' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad \text{και} \quad G'' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin \delta \quad [6.32]$$

Για να περιγραφεί η συμπεριφορά του υλικού εισάγεται ένα μιγαδικό μέτρο G^* , το οποίο ορίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\gamma = \gamma_0 \exp(i\omega t) \quad \text{και} \quad [6.33]$$

$$\tau = \tau_0 \exp[i(\omega t + \delta)] \quad [6.34]$$

$$G^* = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \exp(i\delta) = \frac{\tau_0}{\gamma_0} (\cos \delta + i \sin \delta) = G' + iG'' \quad [6.35]$$

Το G' , το οποίο είναι σε φάση με την παραμόρφωση, καλείται μέτρο αποθήκευσης ενέργειας (storage modulus) και καθορίζει την ενέργεια που αποθηκεύεται στο δοκίμιο ως ελαστική ενέργεια λόγω της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης. Το φανταστικό μέρος G'' , είναι 90° εκτός φάσης από την επιβαλλόμενη παραμόρφωση, καλείται μέτρο απώλειας ενέργειας (loss modulus) και δηλώνει την απώλεια της μηχανικής ενέργειας σε θερμική. Για την περιγραφή της δυναμομηχανικής συμπεριφοράς ενός υλικού χρησιμοποιείται επίσης η εφαπτωμένη της γωνίας δ , η οποία αναφέρεται ως εφαπτωμένη απωλειών (loss tangent):

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad [6.36]$$

Η ολική ενέργεια που απορροφάται κατά τη διάρκεια ενός κύκλου είναι:

$$W = \int_0^{2\pi} \tau d\gamma = \pi G'' \gamma_0^2 \quad [6.37]$$

Σε ένα στερεό που παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά (ισχύει ο νόμος του Hooke), για μια ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενη παραμόρφωση η τάση είναι σε φάση με την παραμόρφωση:

$$\gamma = \gamma_0 \sin \omega t, \quad \tau = G\gamma = G\gamma_0 \sin(\omega t) \quad [6.38]$$

Στην περίπτωση αυτή, η ενέργεια που αποθηκεύεται κατά το πρώτο και τρίτο τεταρτημόριο του κύκλου, αποδίδεται εξ' ολοκλήρου κατά το δεύτερο και τέταρτο τεταρτημόριο.

Σε ένα νευτωνικό ρευστό, η τάση από μια ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενη παραμόρφωση θα είναι 90° εκτός φάσης από την παραμόρφωση:

$$\gamma = \gamma_0 \sin \omega t \quad \tau = \mu \dot{\gamma} = \mu \omega \gamma_0 \cos(\omega t) \quad [6.39]$$

Στην περίπτωση αυτή η τάση και ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι όμως σε φάση. Ανά κύκλο θα χάνεται όλη η ενέργεια, η οποία θα μετατρέπεται σε θερμότητα και θα οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού:

$$W = \pi \mu \omega \gamma_0^2 \quad [6.40]$$

Με τις δυναμικές μηχανικές μετρήσεις μπορούν να μελετηθούν η δομή, η μορφολογία και οι μεταπτώσεις των πολυμερών. Από τη γραφική παράσταση της μεταβολής των G'' και $\tan \delta$ με τη θερμοκρασία μπορεί να προσδιορισθεί η κύρια θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης καθώς και δευτερεύουσες μεταπτώσεις του εξεταζόμενου πολυμερούς.

Ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο δόνησης του δοκιμίου:

- i. Στην πρώτη κατηγορία το δείγμα πραγματοποιεί ελεύθερη δόνηση. Τέτοια μέθοδος είναι το εκκρεμές στρέψης. Το δοκίμιο στηρίζεται στο ένα άκρο ενώ στο άλλο συστρέφεται ελεύθερα με τη βοήθεια αδρανούς συστήματος (ράβδος ή δίσκος). Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται το μέτρο σε διάτμηση (G).
- ii. Στην εξαναγκασμένη δόνηση, το δοκίμιο υφίσταται δονήσεις που παράγονται στο ένα άκρο του δοκιμίου. Στην περίπτωση αυτή μπορούν να αναπτυχθούν τρεις μορφές διάδοσης των κυμάτων μέσα από τη μάζα του δείγματος. Στη διαμήκη δόνηση, η μετάδοση της δόνησης μέσα από τη μάζα γίνεται παράλληλα με τον άξονα του δοκιμίου. Στη δόνηση συστροφής η δόνηση πραγματοποιείται γύρω από τον άξονα ενώ όταν η δόνηση τελείται κάθετα στον άξονα πραγματοποιείται δόνηση κάμψης.

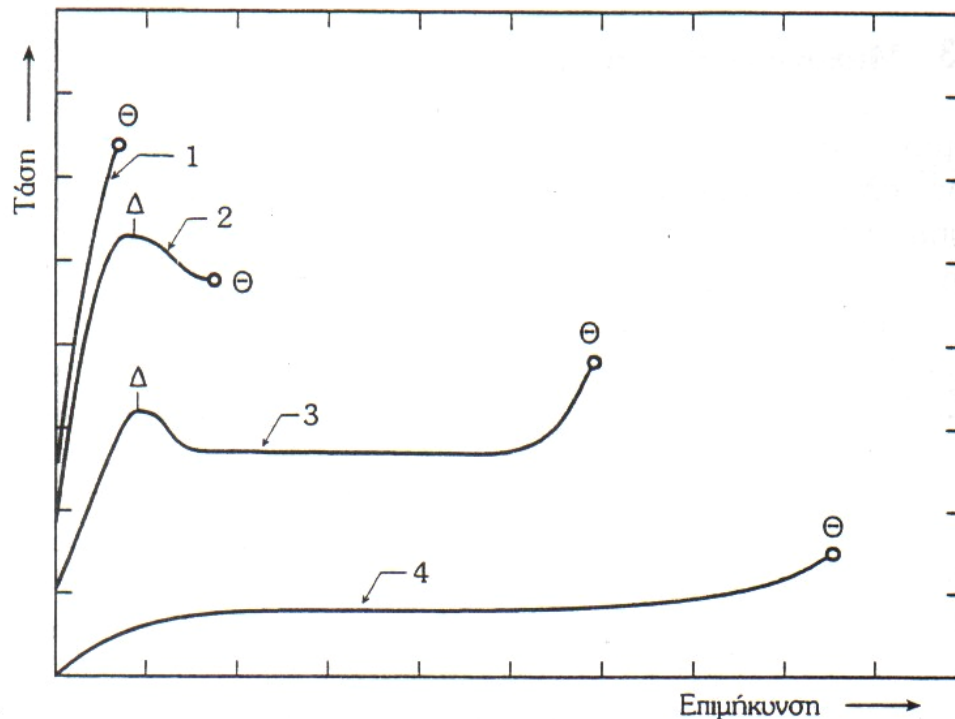
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 6^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1. Καμπούρης Ε.Μ., Παπασπυρίδης Κ.Δ. “Τεχνολογία Πολυμερών (Δομή-Ιδιότητες Πολυμερών)”, ΕΜΠ 1998.
2. Παναγιώτου Κ. “Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών”, Πήγασος 2^η έκδ., Θεσσαλονίκη (2000).
3. Callister W.C. Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών, John Wiley & Sons 2000, Μετάφρ. Κ. Γαλιώτης, Στ.Χ. Μπογιατζής, Ε. Μελέτης, Εκδόσεις Τζιόλα, 5^η έκδοση 2004.
4. McCrum N.G., Buckley C.P. and Bucknall C.B., “Principles of Polymer Engineering”, 2nd ed. Oxford Univ. Publ. 1997
5. Rodriguez F., Cohen Cl., Ober Chr.K., Archer L.A. “Principles of Polymer Systems”, Taylor & Francis 5th ed. (2003).
6. Young R.J., Lovell P.A. “Introduction to Polymers”, Chapman & Hall, 2nd ed. (1991).
7. Ebewele R.O. Polymer Science and Technology, CRC Press 2000 NY.

7. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

7.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

Η δοκιμή εφελκυσμού γίνεται παραμορφώνοντας με έναν σταθερό ρυθμό το δοκίμιο και καταγράφοντας ταυτόχρονα την απαιτούμενη τάση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε διαγράμματα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων. Στο διάγραμμα 7.1 παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης παραμόρφωσης για διάφορα πολυμερή υλικά.



Σχήμα 7.1: Χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για τα πολυμερή υλικά: 1. ψαθυρά υλικά 2,3. όλκιμα υλικά 4. ελαστομερή

Ανάλογα με τη μορφή της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης αυτής, τα υλικά διαχωρίζονται σε ψαθυρά, όλκιμα και ελαστομερή.

Τα **ψαθυρά υλικά** εμφανίζουν διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης ($\tau - \gamma$) όπως η καμπύλη 1. Αρχικά με αύξηση της παραμόρφωσης, αυξάνει και η τάση ενώ η σχέση της τάσης με τη παραμόρφωση είναι γραμμική και δίνεται από τον νόμο του Hooke:

$$\tau = E \cdot \gamma \quad [7.1]$$

όπου E : το μέτρο ελαστικότητας.

Το μέτρο ελαστικότητας είναι δηλαδή η κλίση του αρχικού μέρους της καμπύλης $\tau - \gamma$.

Η τάση θραύσεως είναι η τάση στο σημείο Θ όπου θραύεται το υλικό κατά τον εφελκυσμό, ενώ η αντίστοιχη επιμήκυνση ονομάζεται επιμήκυνση στο όριο θραύσεως.

Τα **όλκιμα υλικά** ακολουθούν τις καμπύλες 2 και 3. Στις περιπτώσεις αυτές η τάση φτάνει σε μια μέγιστη τιμή που ονομάζεται τάση διαρροής (σημείο Δ) ενώ η αντίστοιχη επιμήκυνση ονομάζεται επιμήκυνση στο σημείο διαρροής. Εάν η εφαρμογή τάσης σταματήσει πριν το σημείο διαρροής, το υλικό επανέρχεται στην αρχική κατάσταση. Μετά το σημείο διαρροής το υλικό με την διακοπή της εφαρμογής δύναμης δεν επανέρχεται αλλά αποκτά μόνιμη παραμόρφωση. Μετά το σημείο διαρροής, και όσο αυξάνεται η επιμήκυνση, η τάση αρχικά ελαττώνεται. Σε αυτό το σημείο το υλικό είτε θραύεται (καμπύλη 2) είτε λόγω του τανυσμού υφίσταται προσανατολισμό των μακρομορίων (προσανατολισμός σκληρύνσεως). Κατά τον προσανατολισμό σκληρύνσεως, τα μακρομόρια εκτείνονται στην διεύθυνση του εφελκυσμού, προκαλώντας μια αντίσταση στην παραμόρφωση και έτσι η τάση παρουσιάζει αύξηση. Στο σημείο αυτό έχουμε και σχηματισμό λαιμού στο δοκίμιο. Αν ο προσανατολισμός σκληρύνσεως γίνει πριν τη θραύση τότε ο λαιμός σταθεροποιείται. Δηλαδή έχουμε αρχικό σχηματισμό λαιμού σταθερής διατομής ο οποίος προχωρά κατά μήκος του δοκιμίου μέχρι το δοκίμιο να οδηγηθεί στη θραύση.

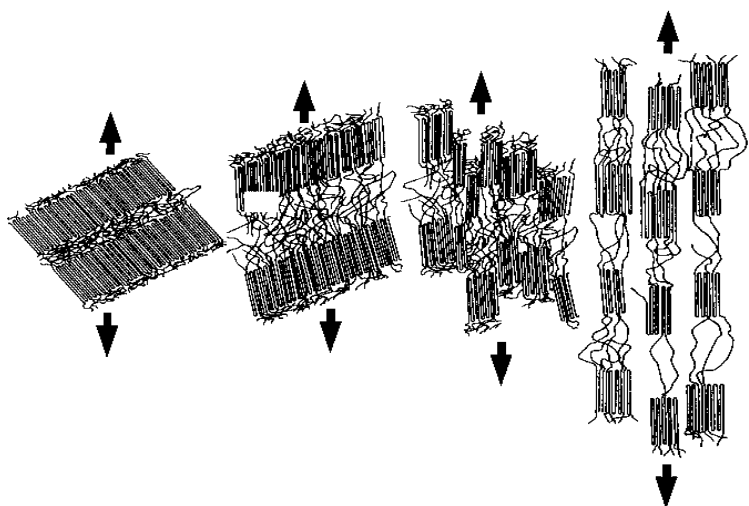
Τα **ελαστομερή υλικά** ακολουθούν την καμπύλη 4 του Σχήματος 7.1 δηλαδή παραμορφώνονται πάρα πολύ πριν τη θραύση τους, ενώ λίγο πριν την θραύση λόγω προσανατολισμού αυξάνεται η τάση.

Ένα ακόμα μέγεθος που δίνει στοιχεία για τη μηχανική συμπεριφορά του εξεταζόμενου υλικού είναι η ενέργεια θραύσης ή ανθεκτικότητα που ουσιαστικά είναι η ενέργεια που απορροφάται για τη θραύση του υλικού. Η ενέργεια αυτή ισούται με το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης.

Με τον όρο αντοχή σε εφελκυσμό τελικά μπορούμε να συμβολίζουμε είτε την τάση διαρροής, είτε την τάση θραύσης όλκιμου υλικού, είτε την τάση θραύσης ψαθυρού υλικού γι' αυτό πρέπει να διευκρινίζεται σε ποια τάση αναφερόμαστε.

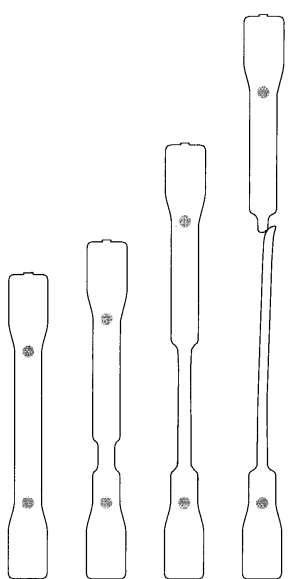
Μια ιδιότητα σημαντική για την μηχανική συμπεριφορά των όλκιμων πολυμερών (καμπύλη 3, Σχήμα 7.1) είναι ο προσανατολισμός που υφίστανται αυτά κατά την εφαρμογή παραμορφώσεων λόγω εφελκυστικών δυνάμεων. Ο προσανατολισμός αυτός εκδηλώνεται μετά τον σχηματισμό λαιμού (necking), δηλαδή τη μείωση της διατομής του δοκιμίου που ακολουθεί μετά το σημείο διαρροής (σημείο Δ , καμπύλη 3, Σχήμα 7.1). Μετά το σχηματισμό λαιμού το δοκίμιο υφίσταται *ψυχρό τανυσμό*, μια διαδικασία στην οποία οι σφαιρουλίτες των κρυσταλλικών περιοχών αρχικά “ξεδιπλώνονται” και στη συνέχεια σπάνε, σχηματίζοντας περιοχές υψηλού προσανατολισμού. Στις περιοχές αυτές οφείλεται η αύξηση της τάσης που παρατηρείται λίγο πριν τη θραύση του δοκιμίου. Μια αναπαράσταση της διαδικασίας κατά την οποία “ξεδιπλώνονται” οι κρυσταλλικές περιοχές στη διάρκεια του εφελκυσμού φαίνεται στην Σχήμα 7.2. Βλέπουμε ότι αρχικά επεκτείνονται οι άμορφες περιοχές μεταξύ των κρυσταλλικών

επιπέδων, στη συνέχεια γίνεται διολίσθηση εσωτερικά των κρυσταλλικών επιπέδων και τέλος όσο συνεχίζεται ο εφελκυσμός, δημιουργείται ένα πλέγμα κρυσταλλικών περιοχών και άμορφων περιοχών.



Σχήμα 7.2: Συμπεριφορά των κρυσταλλικών περιοχών στη διάρκεια του εφελκυσμού

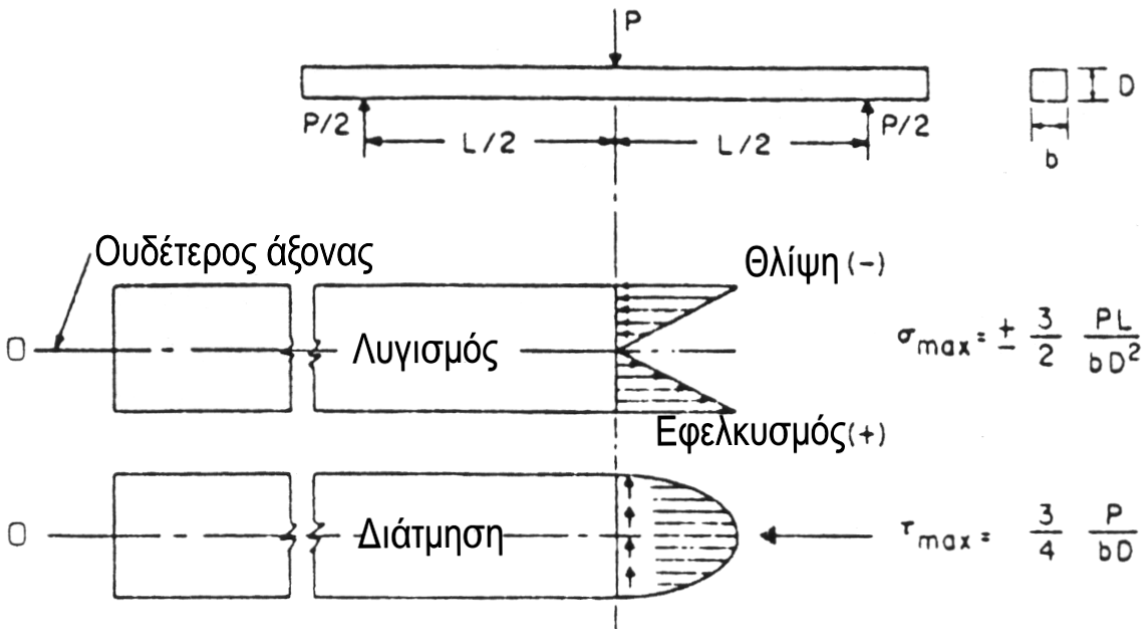
Η συμπεριφορά ενός ημικρυσταλλικού πολυμερούς κατά τον εφελκυσμό δίνεται στην Σχήμα 7.3, όπου παρουσιάζεται ο σχηματισμός λαιμού, η διάδοση του κατά μήκος του δοκιμίου και η θραύση.



Σχήμα 7.3: Σχηματισμός και διάδοση λαιμού στη διάρκεια του εφελκυσμού.

7.2 ΔΟΚΙΜΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ

Κατά τη δοκιμή αυτή το φορτίο εφαρμόζεται στο κέντρο παραλληλεπίπεδης δοκού στηριγμένης σε δύο σημεία (Σχήμα 7.4). Το κέντρο συμμετρίας του δοκιμίου πρέπει να βρίσκεται στην ίδια ευθεία με τον άξονα φόρτισης προκειμένου να επιτευχθεί ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων.



Σχήμα 7.4: Γεωμετρία και πεδίο τάσεων κατά τη φόρτιση παραλληλεπίπεδης δοκού σε τρία σημεία.

Όταν το δοκίμιο φορτίζεται, διαμορφώνεται σύμφωνα με τη θεωρία των Bernoulli-Euler το πεδίο τάσεων που απεικονίζεται στο Σχήμα 7.4. Στην κάτω επιφάνεια της δοκού αναπτύσσεται η μέγιστη εφελκυστική τάση, η οποία μετατρέπεται γραμμικά σε μέγιστη θλιπτική στην πάνω επιφάνεια. Στην περίπτωση που τα μέτρα ελαστικότητας σε εφελκυσμό και θλίψη είναι ίσα, τότε στο μέσο του πάχους η τάση είναι μηδενική και η διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει τον ουδέτερο άξονα. Οι μέγιστες τάσεις (εφελκυστικές/θλιπτικές) σ , που εμφανίζονται στις εξωτερικές επιφάνειες της δοκού, δίνονται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{3}{2} \frac{PL}{bD^2} \quad [7.2]$$

όπου P: το μέγιστο ασκούμενο φορτίο

L: η απόσταση μεταξύ των σημείων στήριξης του δοκιμίου (span)

b: το πλάτος του δοκιμίου

D: το πάχος του δοκιμίου

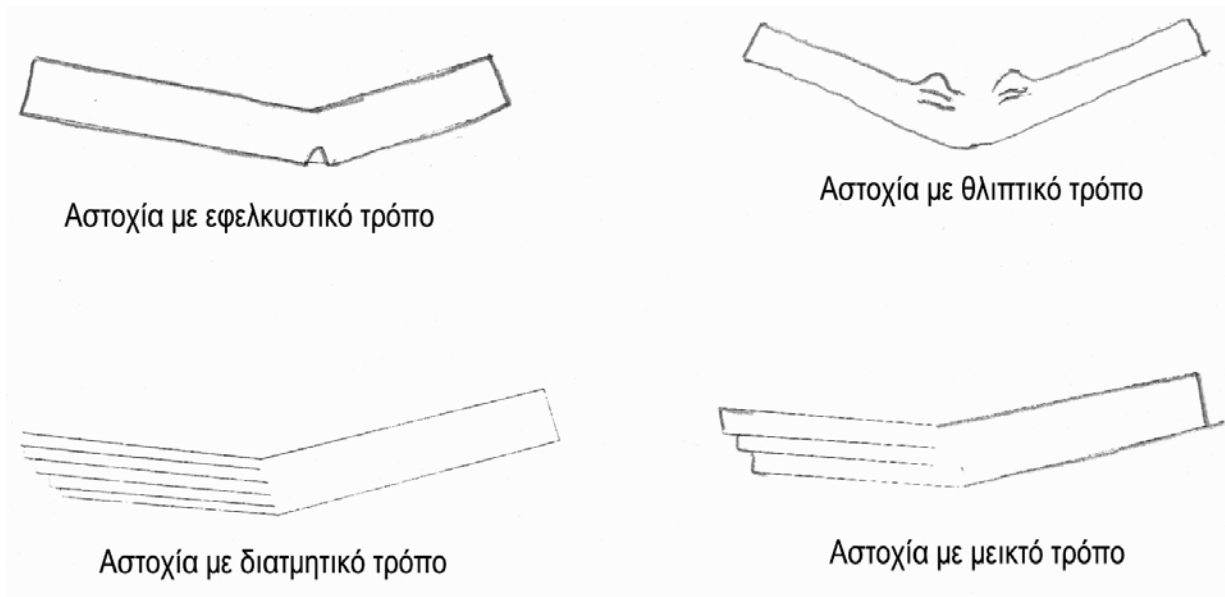
Επιπλέον αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις, η κατανομή των οποίων κατά το πάχος του δοκιμίου είναι παραβολική. Οι τάσεις αυτές είναι μηδενικές στην πάνω και στην κάτω

επιφάνεια, ενώ στον ουδέτερο άξονα αποκτούν τη μέγιστη τιμή (τ) η οποία δίνεται από τη σχέση :

$$\tau = \frac{3}{4} \frac{P}{bD} \quad [7.3]$$

Το σχετικό μέγεθος των εφελκυστικών/θλιπτικών και διατμητικών τάσεων, και επομένως η πιθανότητα το δοκίμιο να αστοχήσει με τον έναν ή τον άλλο τρόπο, εξαρτάται από το λόγο της απόστασης των σημείων στήριξης (L) προς το πάχος (D) του δοκιμίου. Συνήθως τα μακριά δοκίμια (υψηλός λόγος L/D) αστοχούν εφελκυστικά ή θλιπτικά και τα κοντά δοκίμια (χαμηλός λόγος L/D) αστοχούν διατμητικά. Ακόμα και στην περίπτωση που ακολουθηθεί πιστά η προτεινόμενη από τα ASTM γεωμετρία, δεν είναι σίγουρο ότι το δοκίμιο θα αστοχήσει με καθαρή διάτμηση ή κάμψη.

Οι πιθανοί τρόποι αστοχίας του δοκιμίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.5.



Σχήμα 7.5: Πιθανοί τρόποι αστοχίας δοκιμίου κατά τη φόρτιση σε κάμψη τριών σημείων.

Όταν το δοκίμιο αστοχεί με εφελκυστικό τρόπο παρατηρούμε τη θραύση στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου. Όταν το δοκίμιο αστοχεί με θλίψη παρατηρείται ότι παραμορφώνεται γύρω από το κεντρικό σημείο της φόρτισής του. Όταν το δοκίμιο αστοχεί με διάτμηση παρατηρούνται διαδοχικές αποκολλήσεις μεταξύ των στρωμάτων. Τέλος είναι δυνατό το δοκίμιο να αστοχεί με μικτό τρόπο, για παράδειγμα να συνυπάρχουν διατμητική και εφελκυστική αστοχία.

Κατά τη δοκιμή σε κάμψη τριών σημείων, η αντοχή κάμψης (σ) για παραλληλεπίπεδη δοκό υπολογίζεται από την εξίσωση [7.2]:

Το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη υπολογίζεται από το γραμμικό τμήμα της καμπύλης φορτίου - βέλους κάμψης με βάση τον τύπο:

$$E = \frac{L^3 m}{4bD^3} \quad [7.4]$$

όπου L: η απόσταση μεταξύ των σημείων στήριξης της δοκού

m: η κλίση του αρχικού γραμμικού τμήματος της καμπύλης φορτίου-βέλους κάμψης

Μια επιπλέον σημαντική ιδιότητα των υλικών είναι η αντίστασή τους σε θραύση, μέτρο της οποίας αποτελεί η ανθεκτικότητα θραύσης ή δυσθραυστότητα (W), η οποία ορίζεται ως η ενέργεια που απαιτείται για τη θραύση του υλικού. Υπολογίζεται από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη τάσης (σ) - ανηγμένης μετατόπισης (ε) που καταγράφεται κατά τη δοκιμή της κάμψης, και μαθηματικά διατυπώνεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$W = \int_0^{\epsilon_{\max}} \sigma d\epsilon \quad [7.5]$$

7.3 ΔΟΚΙΜΗ ΣΕ ΚΡΟΥΣΗ

Η δοκιμή σε κρούση χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η ευθραυστότητα ενός υλικού κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Ειδικότερα, εκφράζει την ικανότητα ενός υλικού να απορροφά χωρίς να θραύεται την ενέργεια από ένα κτύπημα υψηλής ταχύτητας. Ο έλεγχος της συμπεριφοράς υλικών σε κρούση δύσκολα μπορεί να τυποποιηθεί. Για το λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί ένας αριθμός προτύπων και μεθόδων που μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες:

i. κρούση χαμηλής ταχύτητας με μεγάλη μάζα

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν δοκιμές που χρησιμοποιούν κάποιο κινούμενο εκκρεμές ή πίπτον βάρος.

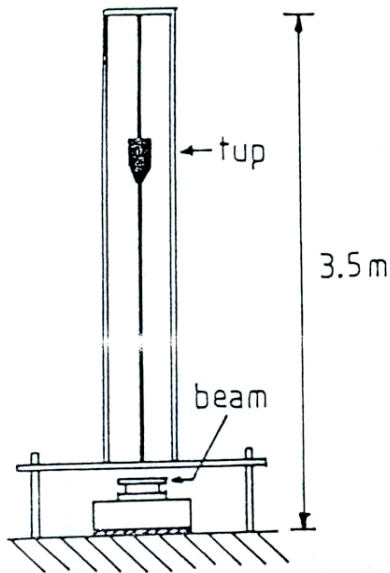
ii. κρούση υψηλής ταχύτητας με μικρή μάζα

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν δοκιμές που χρησιμοποιούν πιστόλι αερίων (π.χ. άζωτο) ή κάποιου άλλου είδους βαλλιστικούς εκτοξευτήρες.

Κατά τη δοκιμή κρούσης πίπτοντος βάρους (drop weight impact test) ένα βάρος αφήνεται να πέσει από προκαθορισμένο ύψος πάνω σε δοκίμιο που βρίσκεται τοποθετημένο σε οριζόντια αρπάγη (Σχήμα 7.6).

Η κρούση δεν προξενεί απαραίτητα καταστροφή του δείγματος, αλλά το πίπτον βάρος αναπηδά και έτσι υπολογίζεται η ενέργεια που απορροφάται και η ενέργεια που ανακλάται. Αρχικά η προσπίπτουσα κινητική-κρουστική ενέργεια προχωράει προς το εσωτερικό του δοκιμίου με τη μορφή θλιπτικού κύματος, ενώ στη συνέχεια η

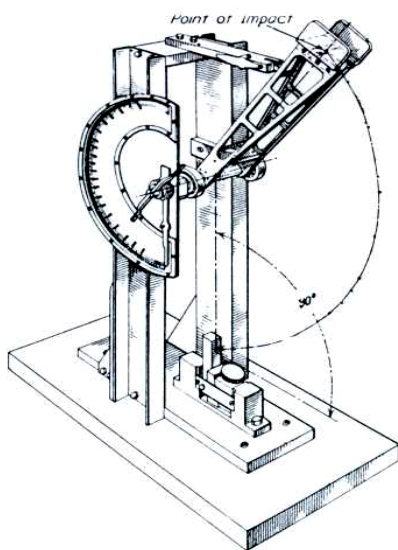
ανακλώμενη ενέργεια κινείται προς την πάνω επιφάνεια του δοκιμίου με τη μορφή εφελκυστικού παλμού.



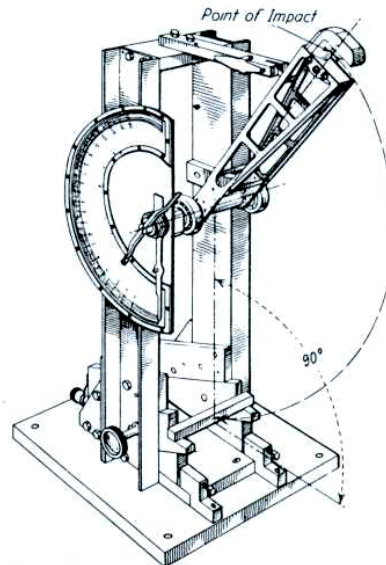
Σχήμα 7.6: Πύργος πίπτοντος βάρους.

Με τη δοκιμή σε κρούση με τη χρήση σφύρας εκκρεμούςς υπολογίζεται η αντοχή του υλικού από την ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη θραύση του από την πτώση της σφύρας πάνω στο δοκίμιο.

Δύο βασικές διατάξεις δοκιμών που χρησιμοποιούνται κατά την παραπάνω μέθοδο είναι η Izod και Charpy. Στη δοκιμή κατά Izod, το δοκίμιο τοποθετείται κάθετα στερεώνοντας το ένα άκρο σε ειδική θέση της συσκευής κρούσης ενώ το άλλο είναι ελεύθερο για επαφή με τη σφύρα (Σχήμα 7.7α).



(α)



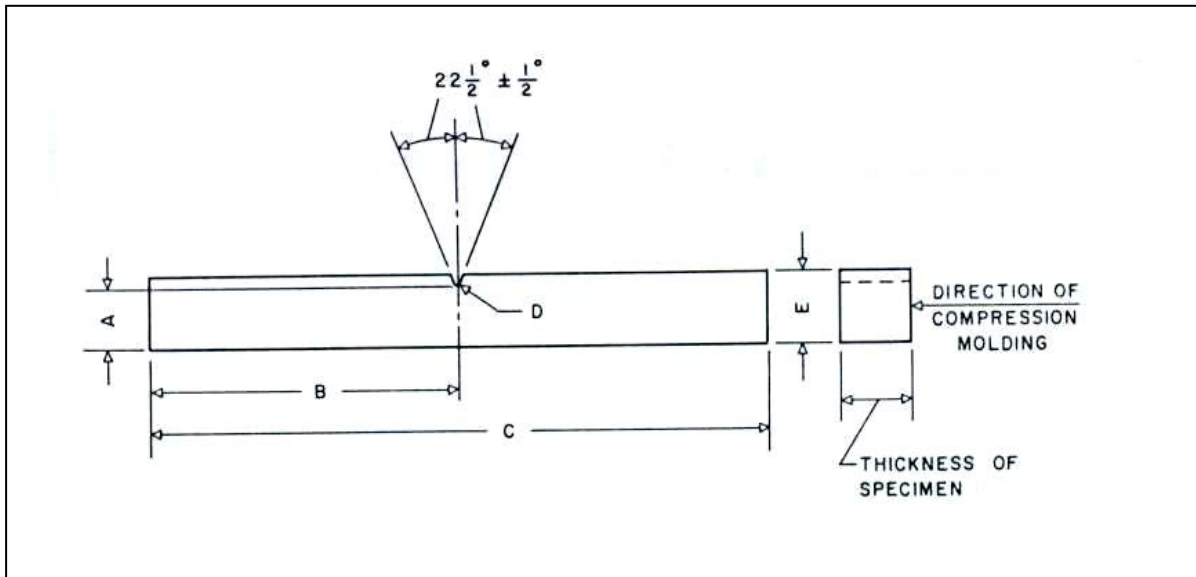
(β)

Σχήμα 7.7: Δοκιμή σε κρούση με σφύρα εκκρεμούςς κατά τη μέθοδο Izod (α) και Charpy (β).

Κατά τη δοκιμή Charpy το δοκίμιο τοποθετείται με τα δύο άκρα του στηριγμένα σε οριζόντιο επίπεδο (Σχήμα 7.7β) ενώ η επαφή με τη σφύρα γίνεται στη μέση της απόστασης των σημείων στήριξης.

Τα δοκίμια μπορεί να φέρουν εγκοπή συνήθως 90° V με ακτίνα 0.25mm (Σχήμα 7.8) η οποία αποσκοπεί στη συγκέντρωση τάσεων στο βάθος της, η οποία αφενός εξασφαλίζει την ψαθυρή θραύση του δοκιμίου με μία μόνο κρούση, και αφετέρου προκαθορίζει την περιοχή θραύσης, γιατί η ρωγμή ξεκινά από το βάθος της εγκοπής και διαδίδεται κάθετα προς τον επιμήκη άξονα του δοκιμίου. Οι εγκοπές βρίσκονται πάντα στην επιφάνεια του δοκιμίου που υφίσταται εφελκυσμό, δηλαδή στην επιφάνεια που δέχεται την κρούση για τη δοκιμή Izod και στην αντίθετη επιφάνεια για τη δοκιμή Charpy.

Το ύψος της σφύρας, το οποίο καθορίζει την ταχύτητα της κρούσης, είναι προκαθορισμένο (h_0). Η σφύρα κινείται κατά μήκος του άξονά της, χτυπά και θραύει το δοκίμιο και φτάνει σε χαμηλότερη ανύψωση (h_f). Γνωρίζοντας την αρχική και τελική ανύψωση της σφύρας μπορεί να υπολογισθεί η διαφορά της δυναμικής ενέργειας η οποία αντιστοιχεί στην ενέργεια κρούσης που απορροφήθηκε κατά τη διάρκεια της αστοχίας του υλικού, υποθέτοντας διατήρηση της ενέργειας και αμελητέα απώλεια υπό τη μορφή θερμότητας ή ήχου.



Σχήμα 7.8: Γεωμετρία δοκιμίου για δοκιμή σε κρούση με εγκοπή.

Η αντοχή στην κρούση αναφέρεται ως ο λόγος της ενέργειας θραύσης του δοκιμίου, E , ως προς το εμβαδόν A της διατομής του δοκιμίου στο ύψος της εγκοπής και έχει μονάδες J/m^2 . Θεωρώντας ότι η μετρούμενη ενέργεια θραύσης είναι η ενέργεια διάδοσης της ρωγμής μπορούμε να σχετίσουμε τη βασική παράμετρο δυσθραυστότητας του υλικού G_c με την ενέργεια ως εξής:

$$G_c = \frac{E}{A} = \frac{E}{B(W-a)} = \frac{E}{BW(1-A/W)} = \frac{E}{A_0(1-a/W)} \quad [7.6]$$

όπου a , B , W είναι το βάθος της εγκοπής, το πάχος και το πλάτος του δοκιμίου αντίστοιχα.

Το G_c είναι μια χαρακτηριστική ιδιότητα του υλικού και ονομάζεται δύναμη επέκτασης ρωγμών, ή κρίσιμος ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης. Πρόκειται για την ενέργεια που απαιτείται για την επέκταση της ρωγμής μοναδιαίου πλάτους κατά ένα μοναδιαίο μήκος.

Για πρότυπα δοκίμια αναφέρεται εναλλακτικά και ως ο λόγος της ενέργειας θραύσης ως προς το πλάτος της εγκοπής σε μονάδες J/m.

Υπάρχει δυνατότητα, με κατάλληλα εξοπλισμένα συστήματα, να γίνεται καταγραφή της μεταβολής το φορτίου κατά τη διάρκεια της κρούσης και με ολοκλήρωση της καμπύλης φορτίου-χρόνου να προσδιορίζεται σε κάθε χρονική στιγμή η ενέργεια που απορροφά το δοκίμιο.

Η αντίσταση στην κρούση δεν είναι μια χαρακτηριστική ιδιότητα του υλικού. Τόσο η συνολική απόκριση του συστήματος σε μακροσκοπικό επίπεδο όσο και η τοπική απόκριση με βάση τα μικροσκοπικά χαρακτηριστικά του συστήματος συνεισφέρουν στη συνολική συμπεριφορά σε κρούση. Το γεγονός αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή του τύπου της δοκιμής. Επίσης η έννοια της αντοχής σε κρούση δεν είναι μονοσήμαντη. Για παράδειγμα σε μια κατασκευή μπορεί η αντοχή σε κρούση να αναφέρεται στην ικανότητα να απορροφά ενέργεια χωρίς να υφίσταται καμία βλάβη, ενώ σε άλλη να αναφέρεται στις καλές ιδιότητες μετά από κρούση χαμηλής ενέργειας.

Παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή στην κρούση

Η συμπεριφορά στην κρούση ενός πλαστικού αντικειμένου κατά τη χρήση του, είναι το συνδυασμένο αποτέλεσμα της επίδρασης του ασκούμενου συστήματος τάσεων και της γεωμετρίας του αντικειμένου.

Η δυσθραυστότητα των υλικών είναι διαφορετική ανάλογα με την ακτίνα καμπυλότητας του άκρου της εγκοπής. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί αν θεωρηθεί ότι υπάρχουν δύο συμβολές στη δυσθραυστότητα:

- Η ενέργεια δημιουργίας ρωγμών και
- Η ενέργεια διάδοσής τους

Όταν η εγκοπή είναι πολύ οξεία, μπορεί να θεωρηθεί ότι η ενέργεια που απαιτείται για την έναρξη της ρωγμής είναι πολύ μικρή και η κύρια συμβολή στη δυσθραυστότητα είναι η ενέργεια διάδοσης. Για παράδειγμα, το HDPE και το ABS έχουν σχετικά υψηλές ενέργειες διάδοσης των ρωγμών ενώ το PVC και το νάυλον χαμηλές. Η σημαντική βελτίωση της δυσθραυστότητας του PVC και του νάυλον όταν εισάγεται μια αμβλεία εγκοπή υποδεικνύουν ότι οι ενέργειές τους έναρξης των ρωγμών είναι σχετικά υψηλές. Αντίθετα η μικρή βελτίωση της δυσθραυστότητας του ABS με την ακτίνα καμπυλότητας της εγκοπής δείχνει ότι η ενέργεια έναρξης της ρωγμής είναι σχετικά χαμηλή.

Η αντοχή στην κρούση αυξάνει επίσης καθώς μειώνεται το βάθος της εγκοπής. Η εξάρτηση αυτή μπορεί να περιγραφεί για ορισμένα υλικά από τον παράγοντα συγκεντρώσης τάσης K_t . Σε μια γεωμετρική ασυνέχεια, ο λόγος της μέγιστης τάσης στο οξύ άκρο προς τη μέση τάση μακριά από την ασυνέχεια ονομάζεται παράγοντας συγκεντρώσης τάσης K_t . Η τιμή του στο άκρο του κύριου άξονα μιας ελλειπτικής οπής σε ένα επίπεδο φύλλο πλαστικού, το οποίο υπόκειται σε ελαστικό τανυσμό κατά τη διεύθυνση του δευτερεύοντα άξονα της έλλειψης δίνεται από την εξίσωση του Inglis:

$$K_t = 1 + 2\sqrt{\frac{a}{r}} \quad [7.7]$$

όπου a είναι το βάθος της εγκοπής και r η ακτίνα καμπυλότητας στο άκρο της.

Για ορισμένα υλικά, όπως τα πολυακρυλικά ή το ενισχυμένο με υαλοϊνες νάυλον, υπάρχει καλή συσχέτιση μεταξύ της αντοχής σε κρούση και του αντίστροφου του K_t .

Κατά τη διάρκεια της χρήσης τους τα θερμοπλαστικά αντικείμενα εκτίθενται σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και επομένως θα πρέπει να είναι γνωστή η επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή των πλαστικών στην κρούση.

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή των θερμοπλαστικών αντικειμένων σε κρούση είναι ανωμαλίες που εισάγονται κατά τη μορφοποίησή τους (φυσαλίδες, ξένα σώματα κ.λπ.), και δρουν ως συγκεντρωτικά τάσης. Το περιβάλλον μπορεί επίσης να επηρεάσει σημαντικά την αντοχή σε κρούση. Παρατεταμένη έκθεση στο ηλιακό φως οδηγεί στην αποικοδόμηση και στη συνέχεια σε ψαθυρότητα.

Βελτίωση της αντοχής σε κρούση πολυμερικών υλικών

Η σχετικά χαμηλή αντοχή στην κρούση ευρέως χρησιμοποιούμενων πολυμερών οδήγησαν στην ανάπτυξη θερμοπλαστικών τροποποιημένων με ελαστικό τα οποία εμφανίζουν υψηλή αντοχή στην κρούση.

Ο λόγος της αυξημένης δυσθραυστότητας των τροποποιημένων αυτών υλικών οφείλεται στην παρουσία ελαστικών μικροσωματίδιων τα οποία επαυξάνουν τους μηχανισμούς παραμόρφωσης στη φάση του κύριου πολυμερούς είτε με εκτεταμένη διαρροή λόγω διάτμησης ή με σχηματισμό πορωδών ρωγμών ή με συνδυασμό και των δύο μηχανισμών. Οι τρεις βασικές προϋποθέσεις για την αύξηση της δυσθραυστότητας του πολυμερικού μίγματος είναι οι εξής:

- i. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του ελαστικού πολυμερούς πρέπει να είναι σημαντικά κατώτερη της θερμοκρασίας δοκιμής ή χρήσης του μίγματος.
- ii. Το ελαστικό δεν πρέπει να είναι αναμίξιμο με το πολυμερές.

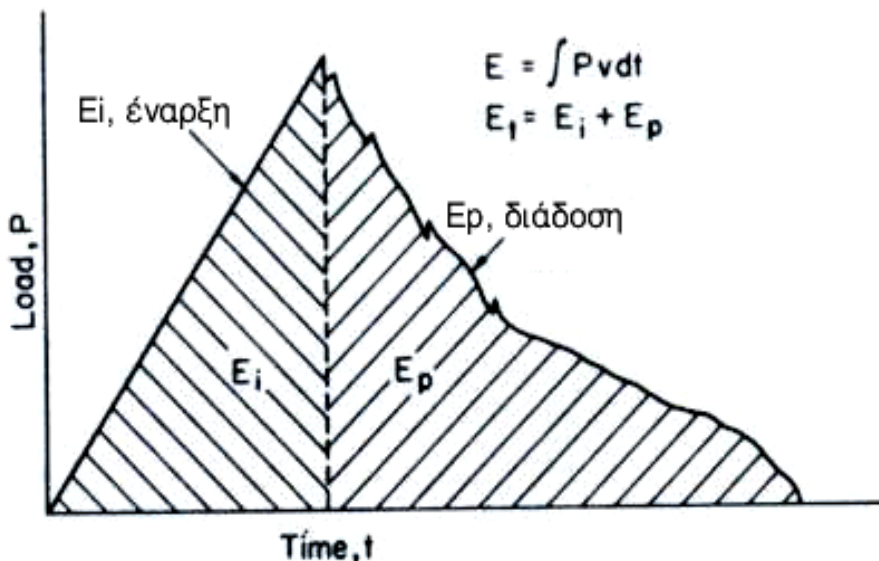
iii. Τα δύο πολυμερή πρέπει να έχουν επαρκή ομοιότητα ώστε να υπάρχει καλή πρόσφυση μεταξύ των δύο φάσεων.

Δοκιμή σε κρούση συνθέτων υλικών

Στα σύνθετα υλικά η συμπεριφορά σε κρούση είναι ιδιαίτερα σύνθετη και εξαρτάται κυρίως από τους εξής παράγοντες:

- Τις ιδιότητες της μήτρας. Οι θερμοπλαστικές παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά από τις θερμοσκληρυνόμενες.
- Τις ιδιότητες του μέσου ενίσχυσης. Οι ίνες πολυαιθυλενίου και οι αραμιδικές έχουν καλύτερη συμπεριφορά από τις ίνες άνθρακα, ενώ ενδιάμεση θέση κατέχουν οι ίνες γυαλιού.
- Από τη διεπιφάνεια μέσου ενίσχυσης/μήτρας. Η ποιότητα της διεπιφάνειας έχει σημαντική επίδραση τόσο στην αντίσταση του υλικού σε κρούση όσο και στην ικανότητα μεταφοράς φορτίου μετά την κρούση.
- Τη μορφή του μέσου ενίσχυσης (πολύστρωμα, ίνες, κόκκοι κλπ) και τον τρόπο διάταξής του (προσανατολισμός) στο σύνθετο υλικό.
- Τις διαστάσεις του δοκιμίου (πάχος, πλάτος) και τις συνθήκες της κρούσης (ταχύτητα και βάρος σφύρας).

Μια τυπική καμπύλη φορτίου-χρόνου φαίνεται στο Σχήμα 7.9.



Σχήμα 7.9: Τυπική καμπύλη φορτίου-χρόνου κατά τη διάρκεια δοκιμής σε κρούση.

Η καμπύλη αυτή μπορεί να διαχωριστεί σε δύο περιοχές, μια περιοχή έναρξης και μια περιοχή διάδοσης της αστοχίας. Όσο αυξάνουν οι τιμές του φορτίου κατά το στάδιο

έναρξης της αστοχίας, συσσωρεύεται στο δοκίμιο ελαστική ενέργεια και δε λαμβάνει χώρα καμιά εμφανής αστοχία, αλλά μπορούν να εμφανισθούν μηχανισμοί αστοχίας μικροσκοπικά, όπως για παράδειγμα αποκόλληση της διεπιφάνειας ίνας-μήτρας. Όταν το φορτίο φτάσει σε μια κρίσιμη τιμή στο τέλος της περιόδου έναρξης, το δοκίμιο του συνθέτου υλικού μπορεί να αστοχήσει είτε με εφελκυστικό είτε με διατμητικό τρόπο ανάλογα με τις αντίστοιχες αντοχές του. Στο σημείο αυτό η αστοχία διαδίδεται είτε με καταστροφικό ψαθυρό τρόπο, είτε προοδευτικά συνεχίζοντας να απορροφά ενέργεια. Η συνολική ενέργεια κρούσης είναι το άθροισμα τα ενέργειας έναρξης και της ενέργειας διάδοσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 7^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1. Ward I.M. “Mechanical properties of solid polymers” 2nd ed.
2. Καμπούρη Μ.Μ., Παπασπυρίδη Κ.Δ. “Τεχνολογία Πολυμερών (Δομή και Ιδιότητες)”, Αθήνα 1998.
3. Παναγιώτου Κ. “Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών”, 2^η έκδοση, Θεσσαλονίκη 2002, Εκδόσεις Πήγασος.
4. Osswald T.A., Menges G. “Materials Science of Polymers for Engineers”, Hanser Publishers, 1995.