



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ IV: ΣΥΝΘΕΣΗΣ & ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ

Μάθημα:

**“ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ
ΥΛΙΚΩΝ - ΡΕΟΛΟΓΙΑ”**

5. ΕΓΧΥΣΗ

Πετρούλα Ταραντίλη

Καθηγήτρια ΕΜΠ, taran@chemeng.ntua.gr

Ακαδημαϊκό έτος 2025-2026

Μορφοποίηση πολυμερών με έγχυση (injection)

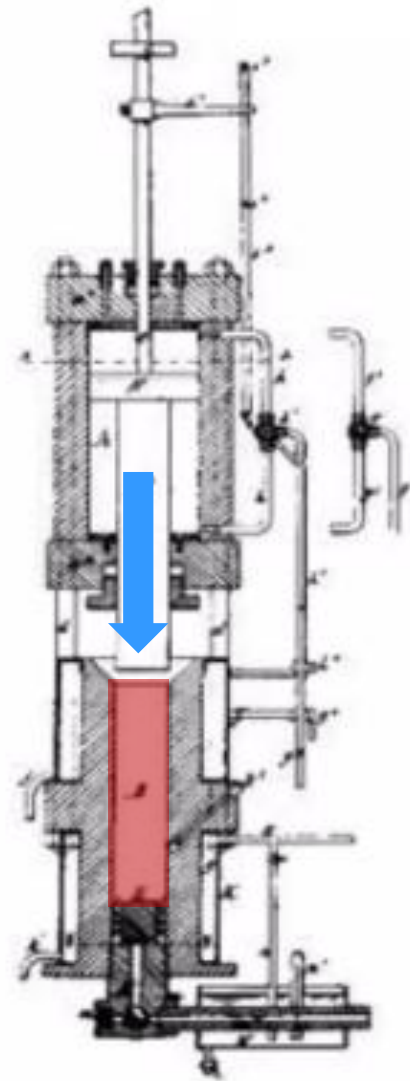


Εφαρμογές: Εξαρτήματα για αυτοκινητοβιομηχανία, αεροναυπηγική, Η/Υ, ηλεκτρικό & ηλεκτρονικό εξοπλισμό, ιατρικό και οδοντιατρικό εξοπλισμό, παιχνίδια, συσκευασίες, είδη οικιακής χρήσης, εξαρτήματα εργαστηριακού εξοπλισμού ...

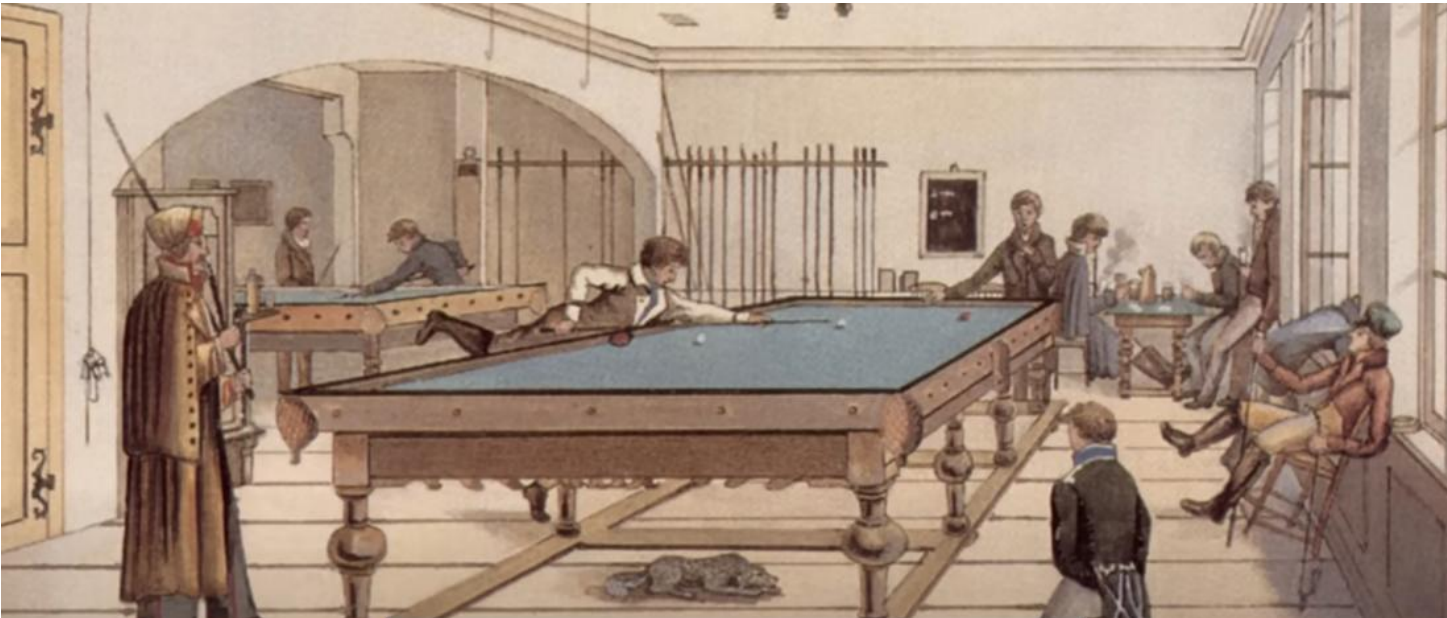
Το ξεκίνημα



John Wesley Hyatt

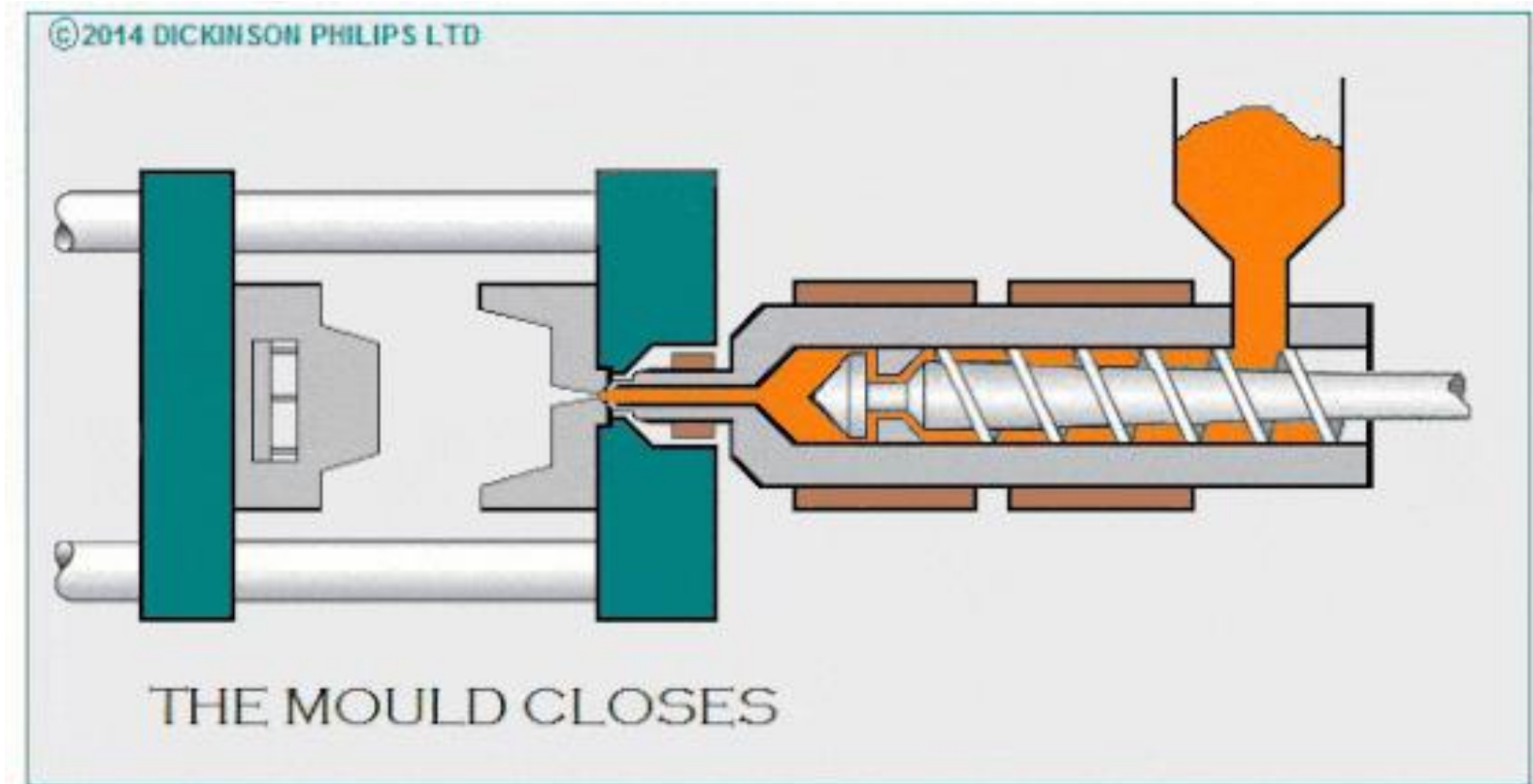


Patented 1878

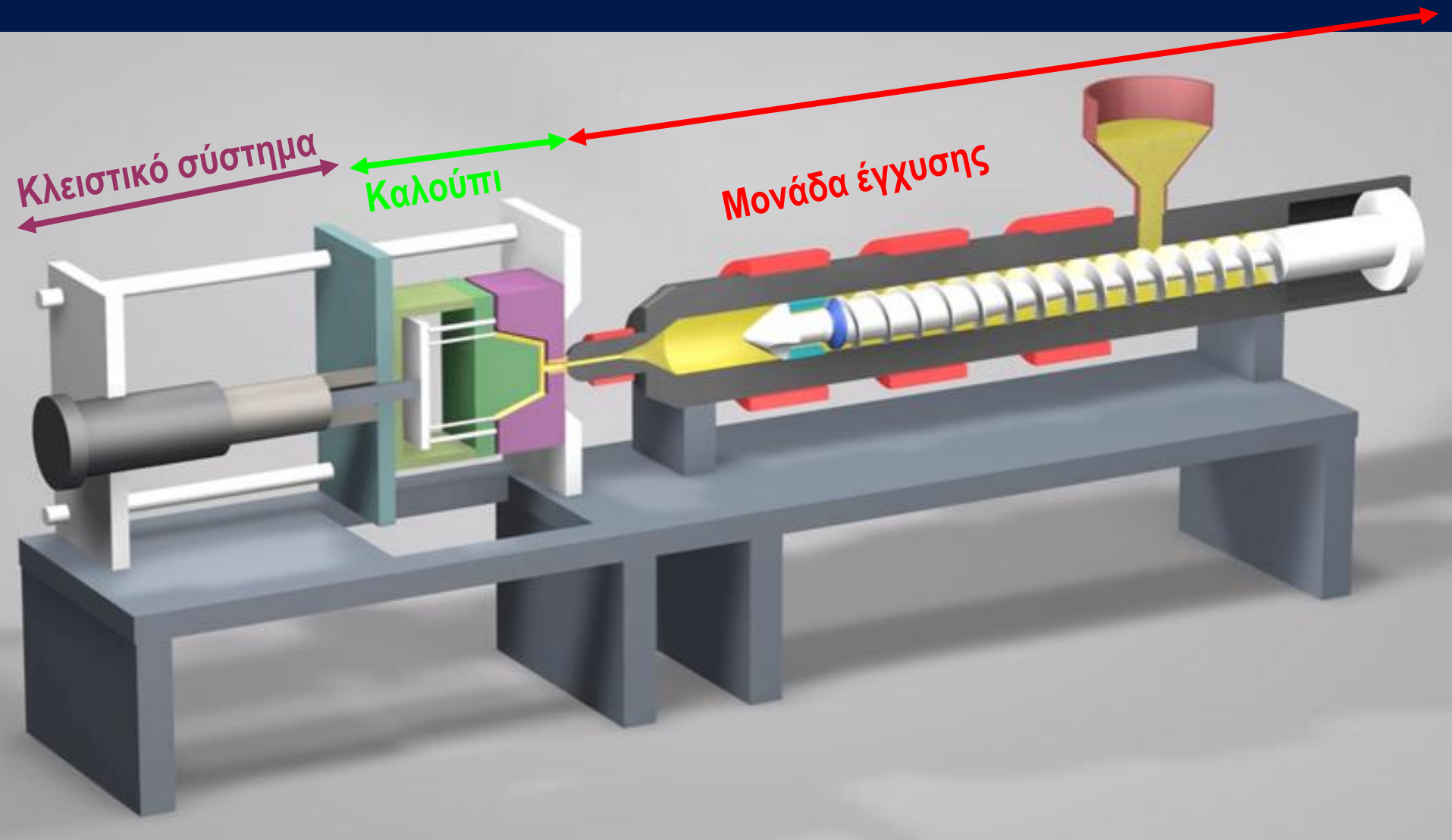


Τι είναι έγχυση (injection molding)?

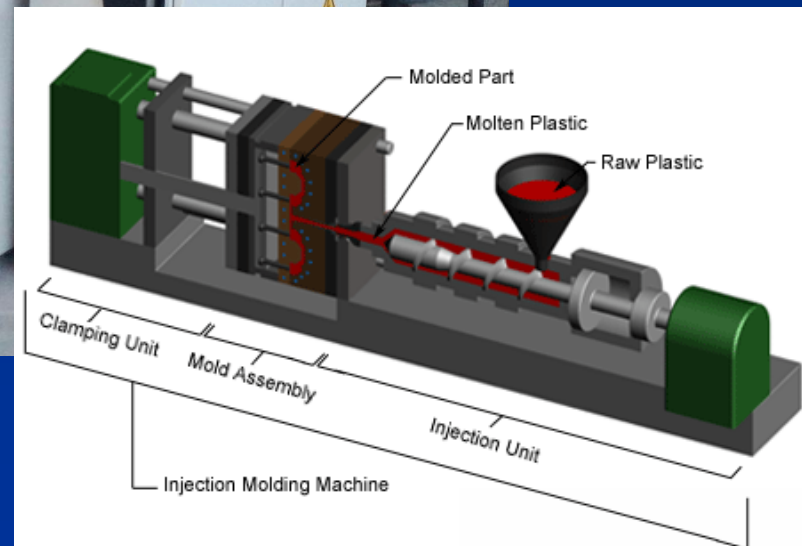
- Ασυνεχής (κυκλική), διεργασία
- Κύκλος: Τηγμένο υλικό «γεμίζει» κοιλότητα καλουπιού (mould) → ψύχεται → απομακρύνεται
- Παραγωγή διακριτών αντικειμένων με πολύπλοκο σχήμα και με ποικίλη εξωτερική επιφάνεια
- 1/3 των θερμοπλαστικών μορφοποιείται με έγχυση

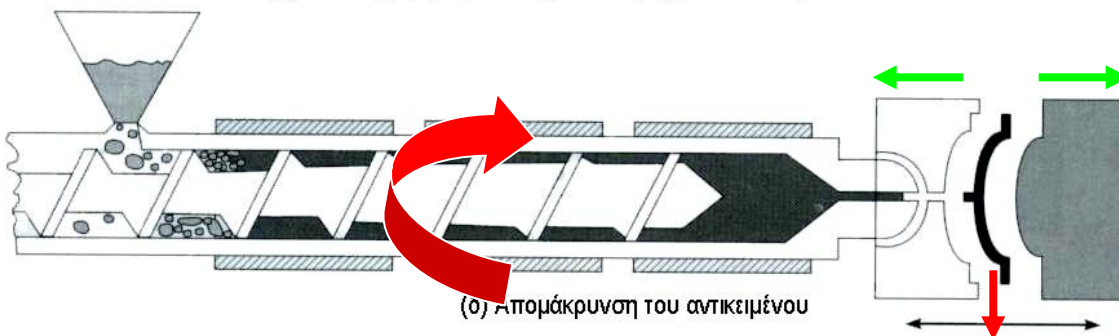
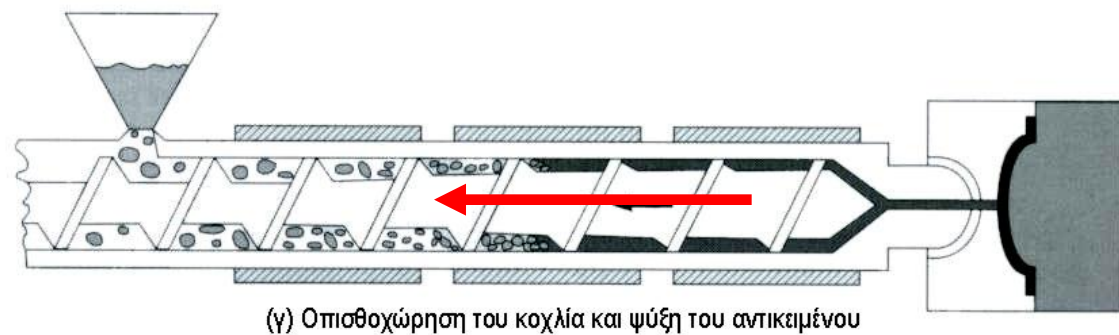
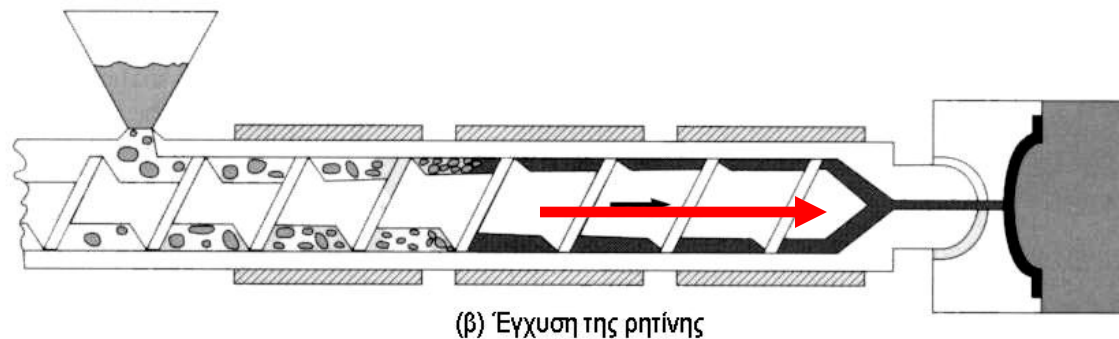
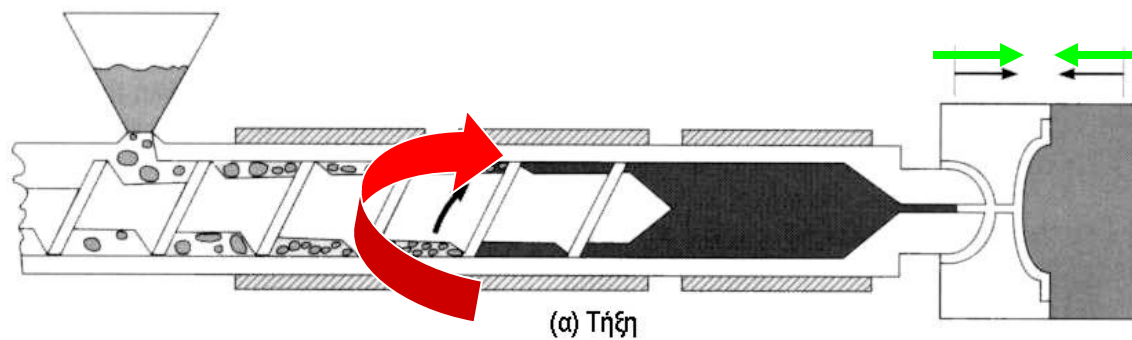


Μορφοποίηση πολυμερών με έγχυση (injection)



Εργαστ. “Τεχνολογίας Πολυμερών” - Μονάδα Έγχυσης





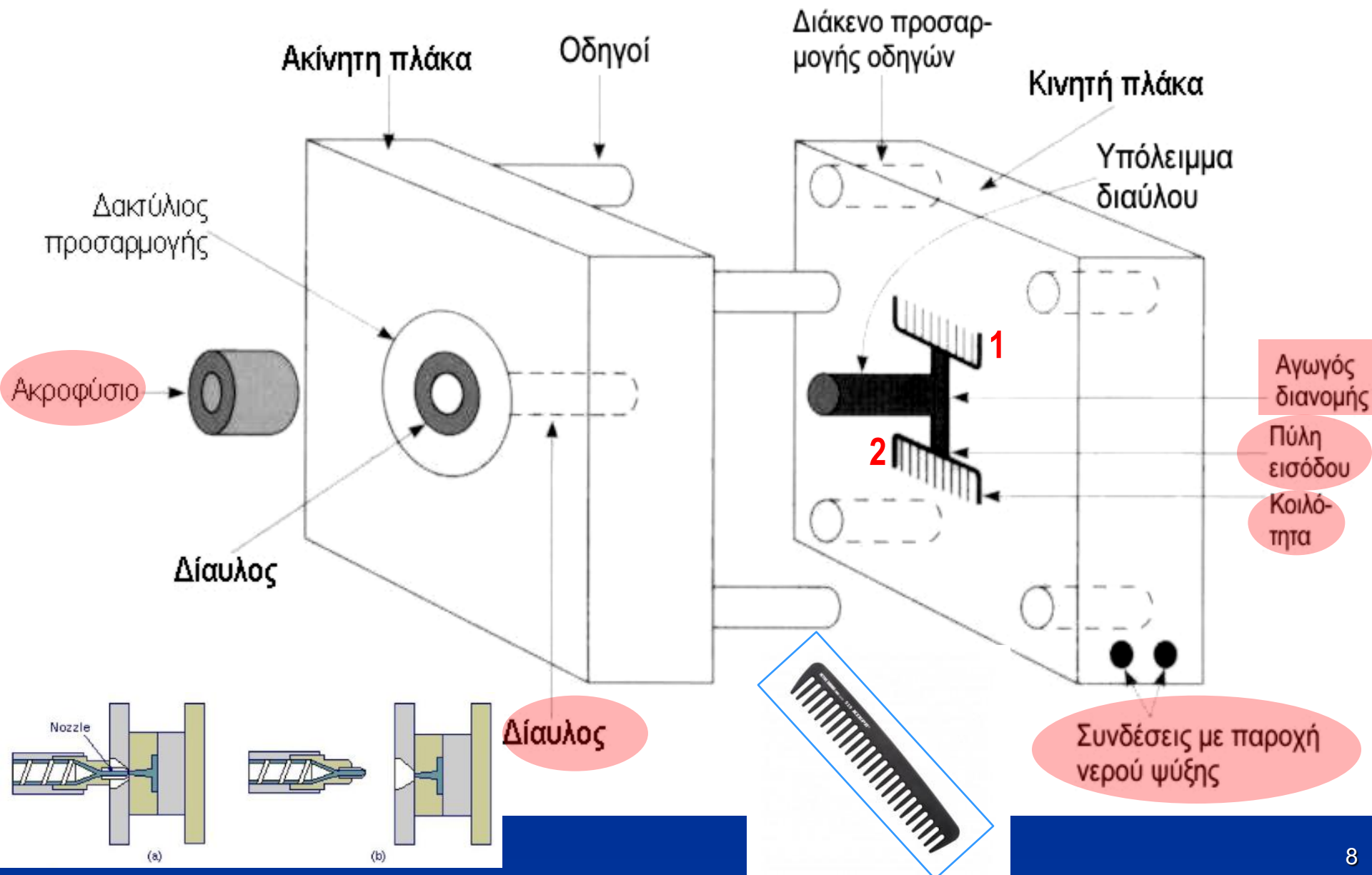
Τύπος παλινδρομούντος κοχλίας (reciprocating screw)

Ποσότητα έγχυσης
(shot size):
20 gr – 20 Kgr

Ο κοχλίας στην έγχυση έχει ίδια μορφή με την εκβολή
Τρεις ζώνες: τροφοδοσίας, συμπίεσης/τήξης και δοσιμετρίας.
Μικρότερος λόγος L/D ($= 15-20$) και συμπίεσης ($2.5/1 - 3/1$)
(→ άρα περισσότερη θερμική ενέργεια στη διεργασία).

Πολυμερή που μορφοποιούνται με έγχυση:
PP, ABS, PS, HDPE, LDPE, PA, PVC, PLA

Καλούπι έγχυσης



Πύλη εισόδου (gate)



Sprue gate



Pin gate



Edge gate



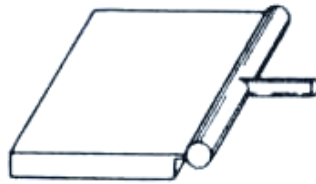
Ring gate



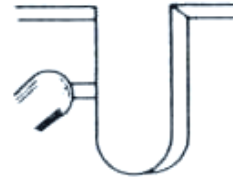
Diaphragm gate



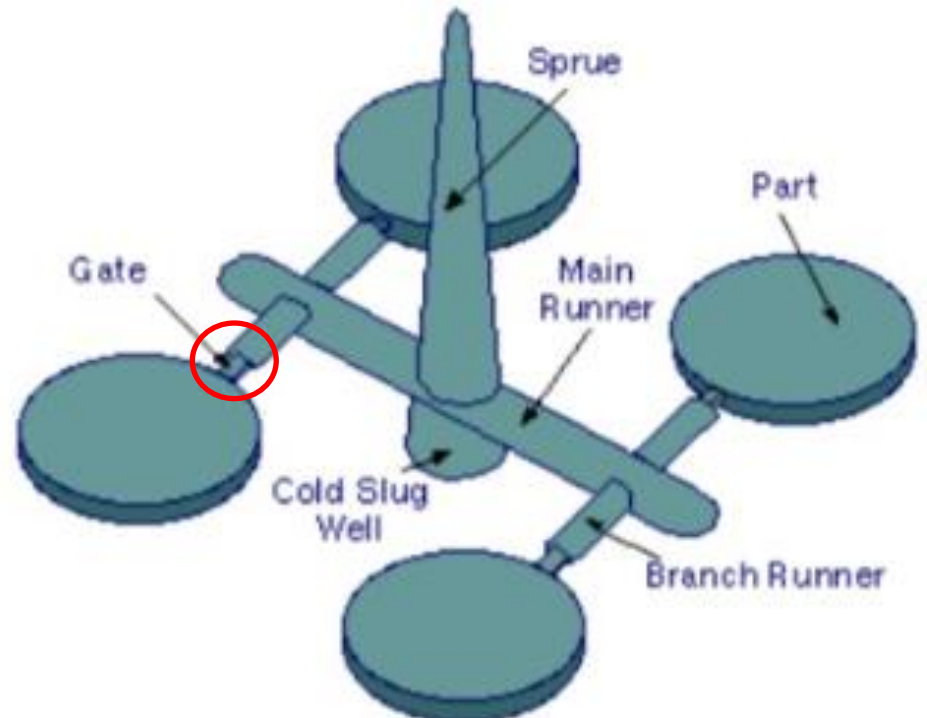
Fan gate



Film gate



Tab gate



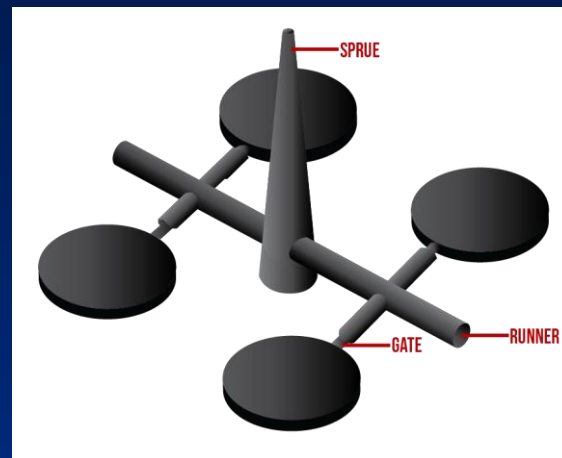
Έγχυση - video

- <https://www.youtube.com/watch?v=RMjtmsr3CqA>
- <https://www.youtube.com/watch?v=YPXCeY24Mjs>
- <https://www.youtube.com/watch?v=b1U9W4iNDiQ>

Αγωγοί διανομής (runners)

Ο σχεδιασμός των αγωγών διανομής εξαρτάται:

- Από τα χαρακτηριστικά ροής του τήγματος (ιξώδες)
 - Θερμοκρασία τήγματος
- Την ανάπτυξη διατμητικών τάσεων κατά τη ροή του τήγματος μέσα από τους αγωγούς.
- Τον όγκο, το μέγεθος και το πάχος του αντικειμένου μορφοποίησης



Χαρακτηριστικά μεγέθη: μήκος και η διατομή

Αγωγοί διανομής με μικρή διατομή και μεγάλο μήκος



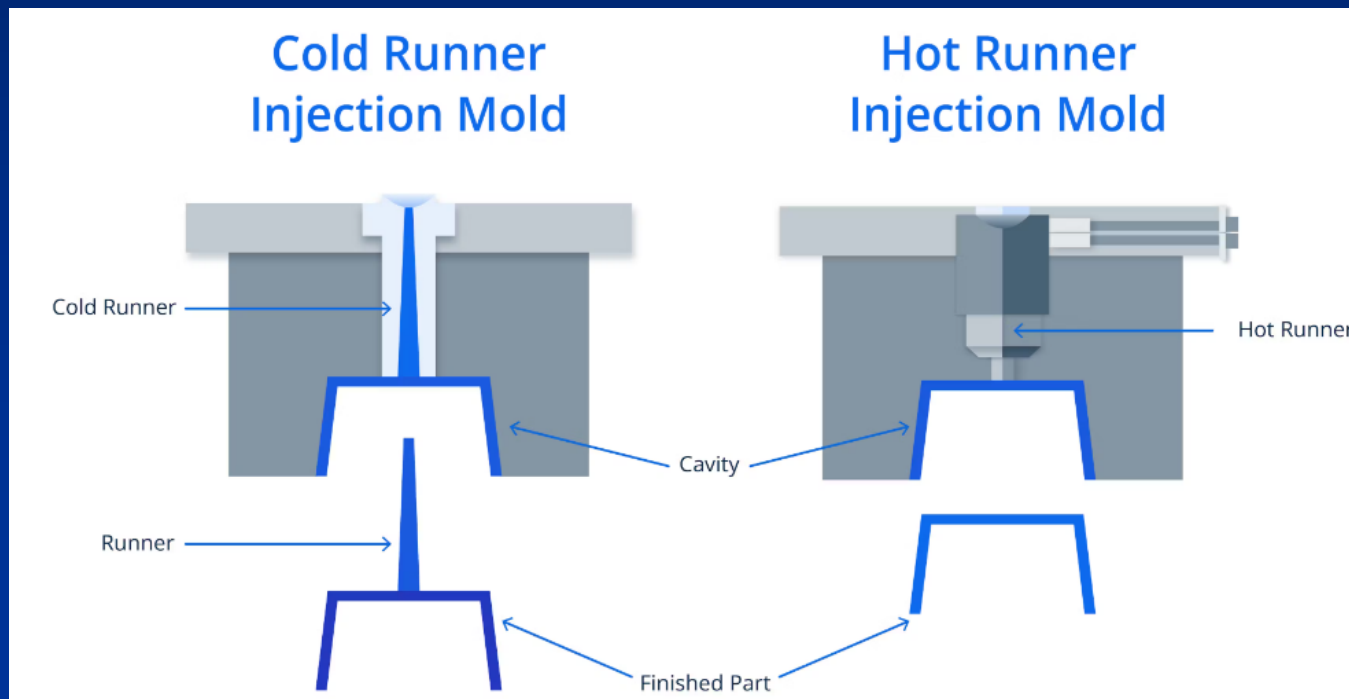
Πιθανά η ρητίνη να ψυχθεί μέχρι να φθάσει στο καλούπι

- Οι αγωγοί απομακρύνονται μαζί με το αντικείμενο →
Βιομηχανικό υπόλειμμα παραγωγής (scrap) →
πρωτογενής/μηχανική ανακύκλωση [ανακύκλωση κλειστού κύκλου (closed loop)] : το ανακυκλωμένο προϊόν επιστρέφει στην ίδια εφαρμογή

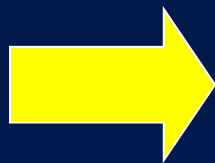


Θερμαινόμενοι αγωγοί διανομής

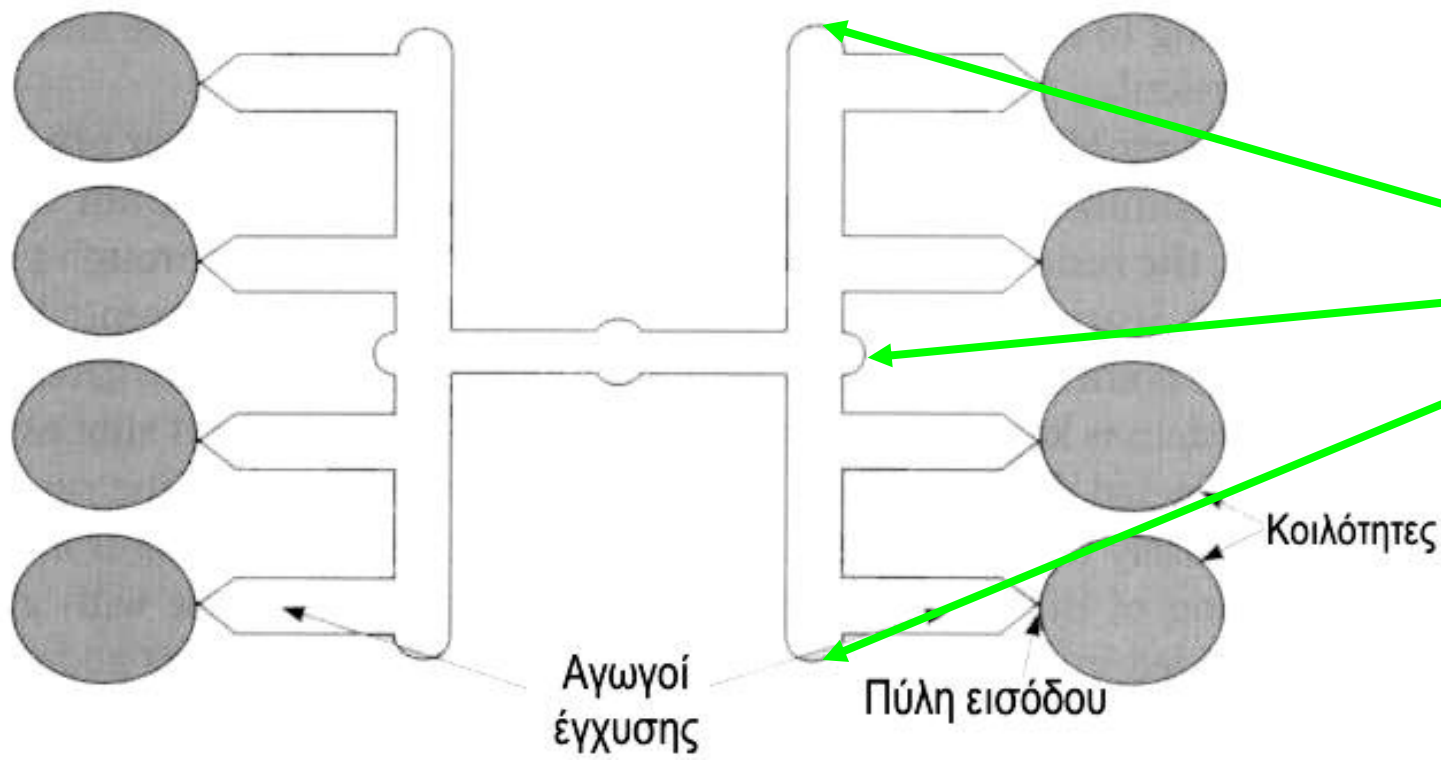
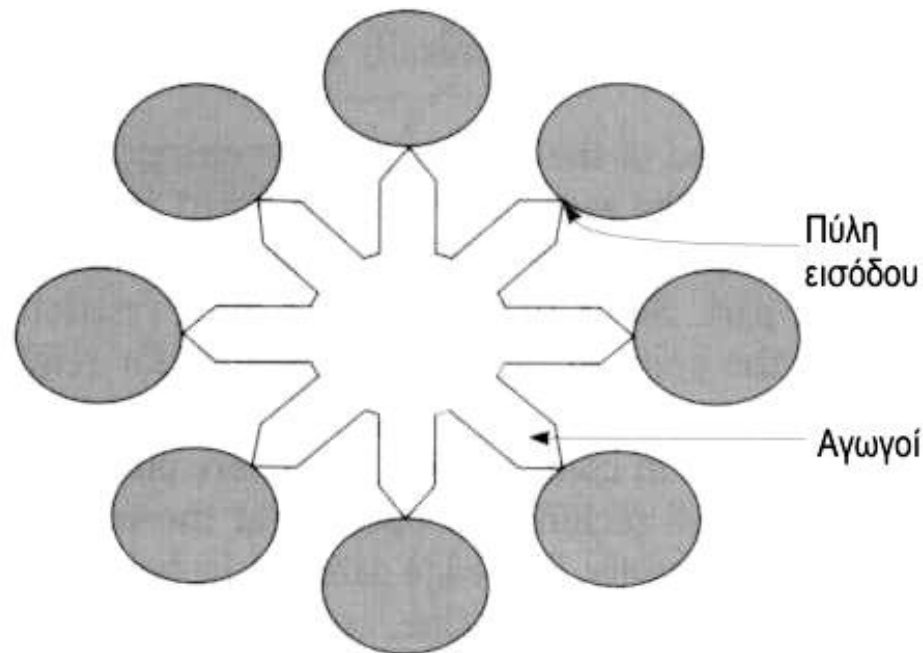
- ✎ Αποφεύγεται η κοπή του αντικειμένου από το δίαυλο έγχυσης, και γίνεται στην πύλη εισόδου στην κοιλότητα
- ✎ Αυξημένη παραγωγικότητα
- ✎ Συντομότερος χρόνος έγχυσης (?)
- ✎ Λιγότερες απώλειες υλικού
- ✎ Αυξημένο κόστος κατασκευής καλουπιού (30%)



Συμμετρικό σύστημα
αγωγών διανομής



Μη-συμμετρικό σύστημα
αγωγών διανομής



Επεκτάσεις

Κλειστικό σύστημα (Clamping unit)

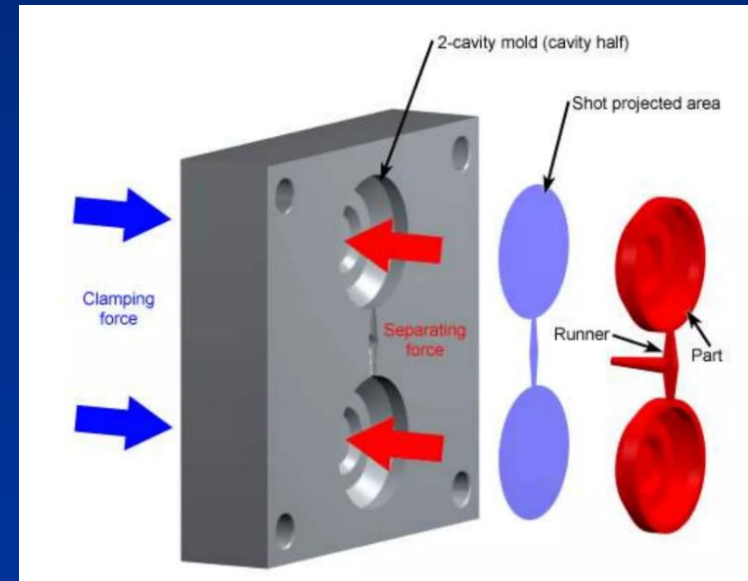
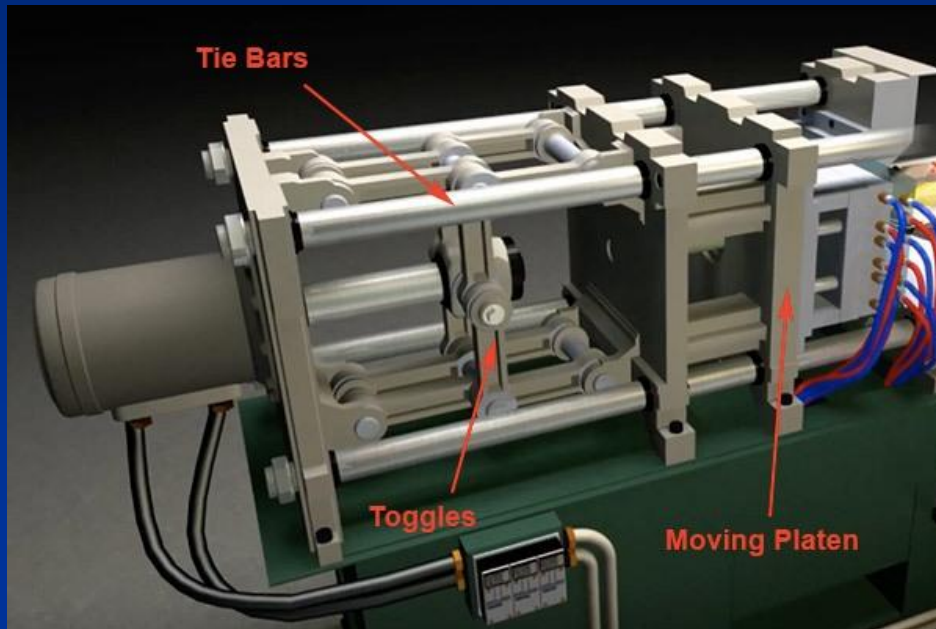
Υδραυλικό ή μηχανικό σύστημα με σκοπό να επιβάλλει αρκετά μεγάλη δύναμη σύσφιξης ώστε να κρατήσει το καλούπι κλειστό και ικανό να αντέξει στις μεγάλες πιέσεις έγχυσης.

$$F = P \times A$$

F: η δύναμη του κλειστικού

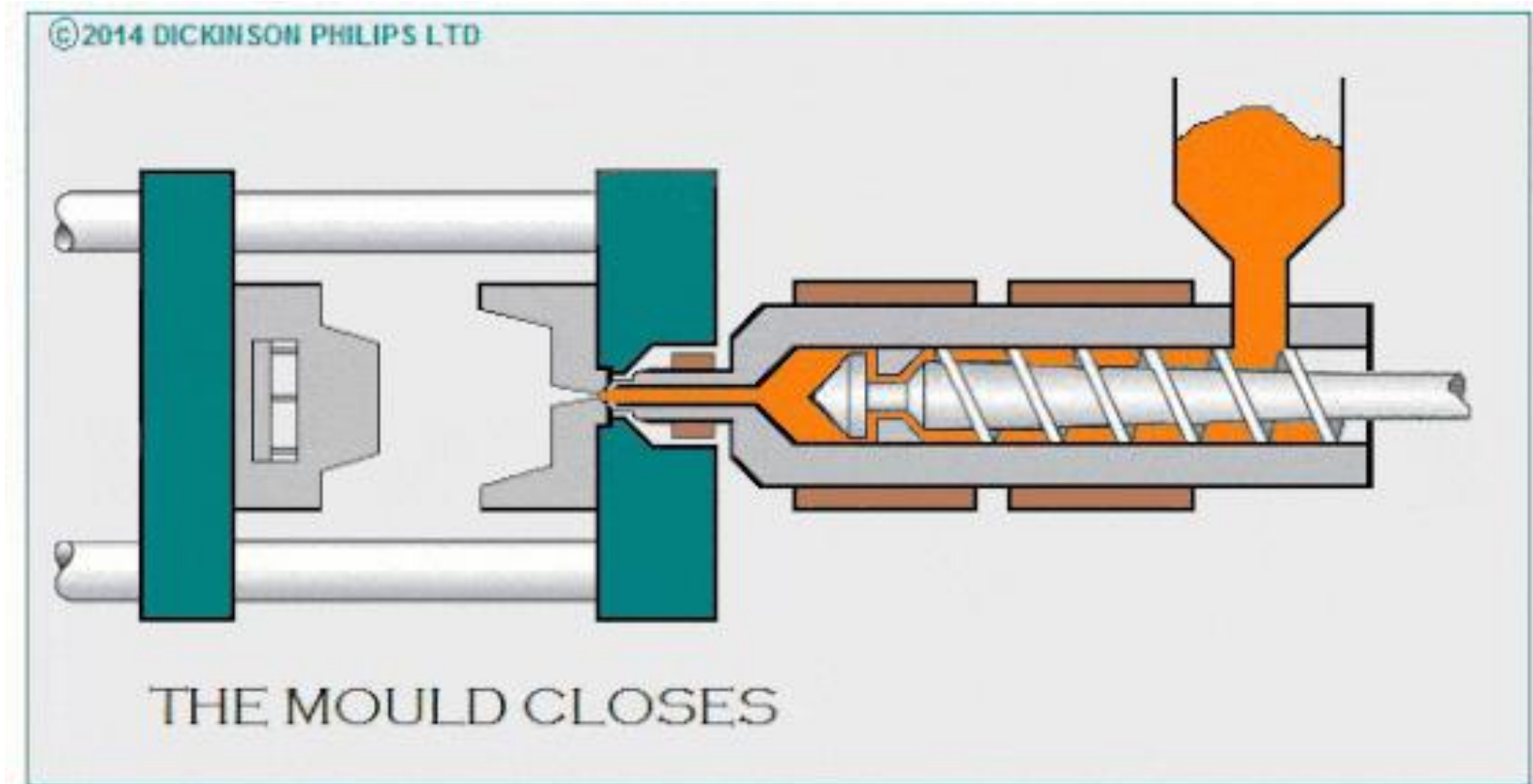
A: η συνολική εγκάρσια επιφάνεια των αντικειμένων

P: η πίεση έγχυσης

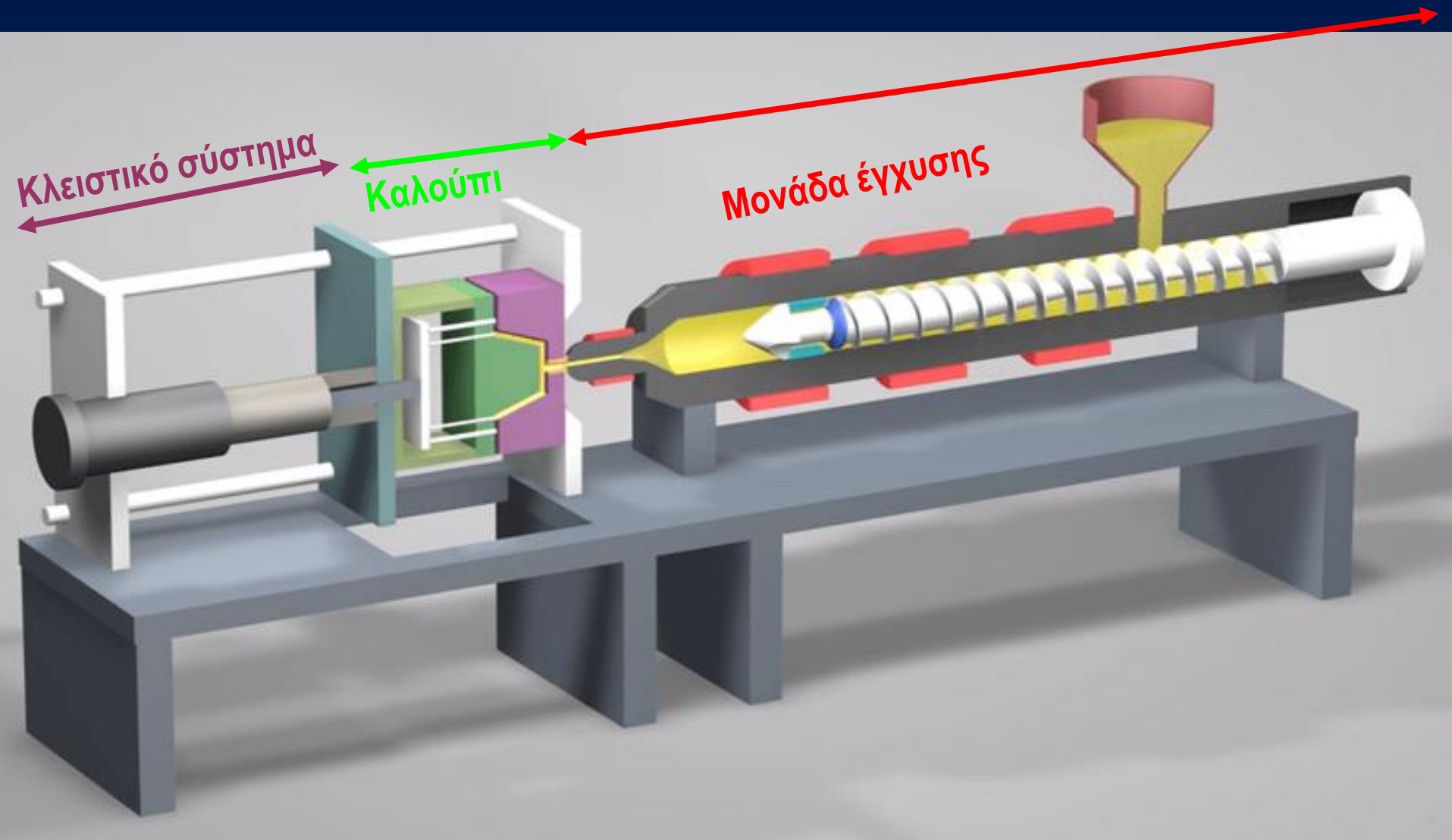


Τι είναι έγχυση (injection molding)?

- Ασυνεχής (κυκλική), διεργασία
- Κύκλος: Τηγμένο υλικό «γεμίζει» κοιλότητα καλουπιού (mould) → ψύχεται → απομακρύνεται
- Παραγωγή διακριτών αντικειμένων με πολύπλοκο σχήμα και με ποικίλη εξωτερική επιφάνεια
- 1/3 των θερμοπλαστικών μορφοποιείται με έγχυση



Μορφοποίηση πολυμερών με έγχυση (injection)



Συρρίκνωση

Διαστάσεις του τελικού αντικειμένου $\neq$

Διαστάσεις του καλουπιού (λόγω θερμικής συστολής)

Σε υψηλές θερμοκρασίες και για σταθερή πίεση, η πυκνότητα του πολυμερούς είναι χαμηλότερη από την πυκνότητα σε συνθήκες περιβάλλοντος.

Η πλήρωση της μήτρας γίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες και επομένως κατά την ψύξη, το μορφοποιημένο αντικείμενο συρρικνώνεται.

Σε σταθερή θερμοκρασία η πυκνότητα αυξάνει με την αύξηση της πίεσης.



Διατηρώντας για αρκετό διάστημα υψηλή την πίεση έγχυσης, εισέρχεται στην κοιλότητα μεγαλύτερη ποσότητα υλικού μειώνοντας έτσι τη συρρίκνωση.

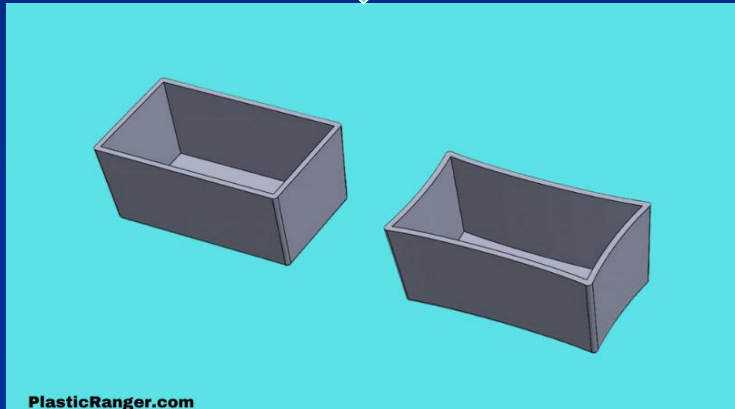
Συμπίεση (Packing)

Εφαρμόζεται αυξημένη πίεση στο καλούπι κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης:

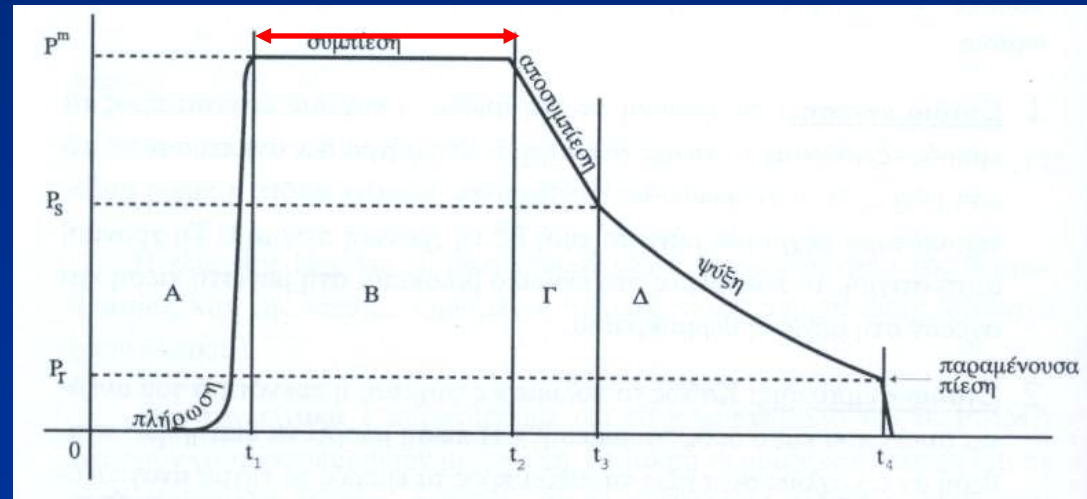


Αυξάνει η πυκνότητα του ψυχόμενου πολυμερούς, μείωση όγκου, περισσότερο τήγμα ρέει μέσα στην κοιλότητα για να κρατήσει σταθερό τον όγκο.

Προσθήκη επιπλέον ποσότητας ρητίνης στην κοιλότητα για να περιορισθούν οι μεταβολές στις διαστάσεις (συρρίκνωση) και στο σχήμα (σκέβρωση).



PlasticRanger.com



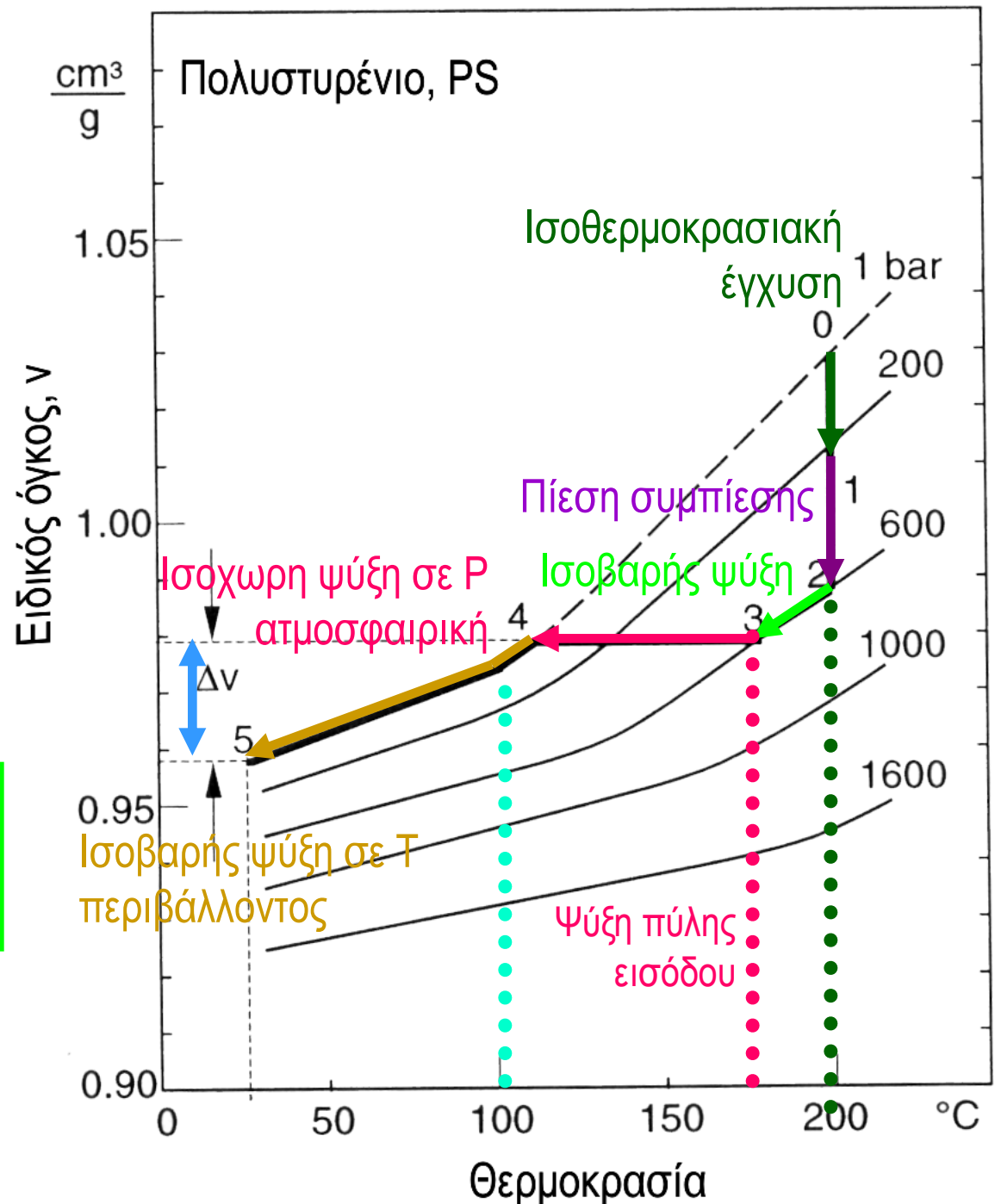
$$V^* = m v$$

V^* όγκος κοιλότητας

$$V = m v_0$$

V όγκος
μορφοποιημένου
αντικειμένου σε συνθήκες
αναφοράς

$$(P + \pi)(v - b) = \frac{RT}{M}$$

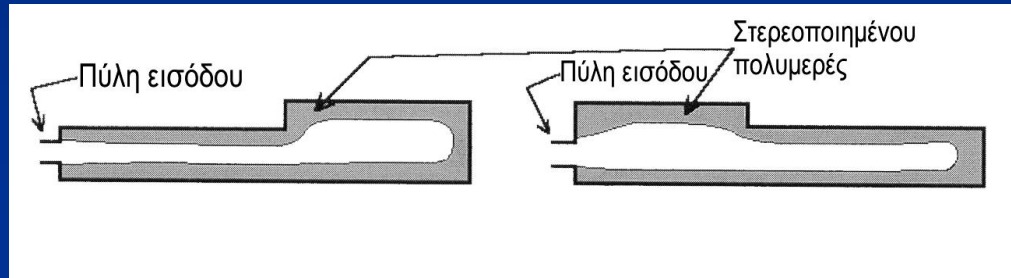


Η συρρίκνωση εξαρτάται:

- Θερμοκρασίες τήγματος-καλουπιού
- Παράμετροι λειτουργίας (πίεση έγχυσης, χρόνος άσκησης πίεσης συμπίεσης).
- Από τον τύπο του πολυμερούς (μοριακή μικροδομή, κρυσταλλικότητα)

Η συρρίκνωση ελαχιστοποιείται όταν:

- Εφαρμόζονται μεγάλοι χρόνοι στους κύκλους έγχυσης
- Εφαρμόζονται μεγάλες πιέσεις έγχυσης
- Με την αύξηση στις διαστάσεις του ανοίγματος της μήτρας/πύλης εισόδου



- Με τη χρήση κατάλληλων προσθέτων στη ρητίνη

Η συρρίκνωση εξαρτάται από τον τύπο του πολυμερούς:

- Η κρυσταλλικότητα αυξάνει τη συρρίκνωση (η αυξημένη σύνδεση και τάξη των μορίων συγκρατεί τα μόρια του πολυμερούς και επιφέρει μεγαλύτερη συρρίκνωση)
- Άμορφα πολυμερή (ακρυλικά, PVC, PS) έχουν μικρότερη συρρίκνωση από κρυσταλλικά πολυμερή (Nylon, PP, PE)

Υλικό	Ψύξη		Συρρίκνωση όγκου (%)
	Από (°C)	Σε (°C)	
Ακρυλικά	150	20	7
Nylon 6.6	285	20	14
Nylon 6	260	20	13
PE	190	20	18
PS	195	20	7

Διαστάσεις καλουπιού = Διαστάσεις αντικειμένου x
(1+ % συρρίκνωσης)

1) Πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (PMMA) πρόκειται να μορφοποιηθεί με την τεχνική της έγχυσης.

Η κοιλότητα σφραγίζεται με στερεοποίηση του τήγματος στην πύλη εισόδου σε θερμοκρασία 165°C και πίεση συμπίεσης 40 MPa.

Με την προϋπόθεση αργής και ομοιόμορφης ψύξης, να υπολογισθεί η θερμοκρασία του τήγματος στην οποία η πίεση στην κοιλότητα φθάνει στην ατμοσφαιρική.

Να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη καταστατική εξίσωση για το PMMA, η οποία συνδέει την πίεση (σε Pa), τον ειδικό όγκο v (σε m³/kg) και την απόλυτη θερμοκρασία T (εξίσωση Spencer-Gilmore):

$$(10^{-3} P + 2.158 \times 10^5)(10^3 v - 0.734) = 83.1T$$

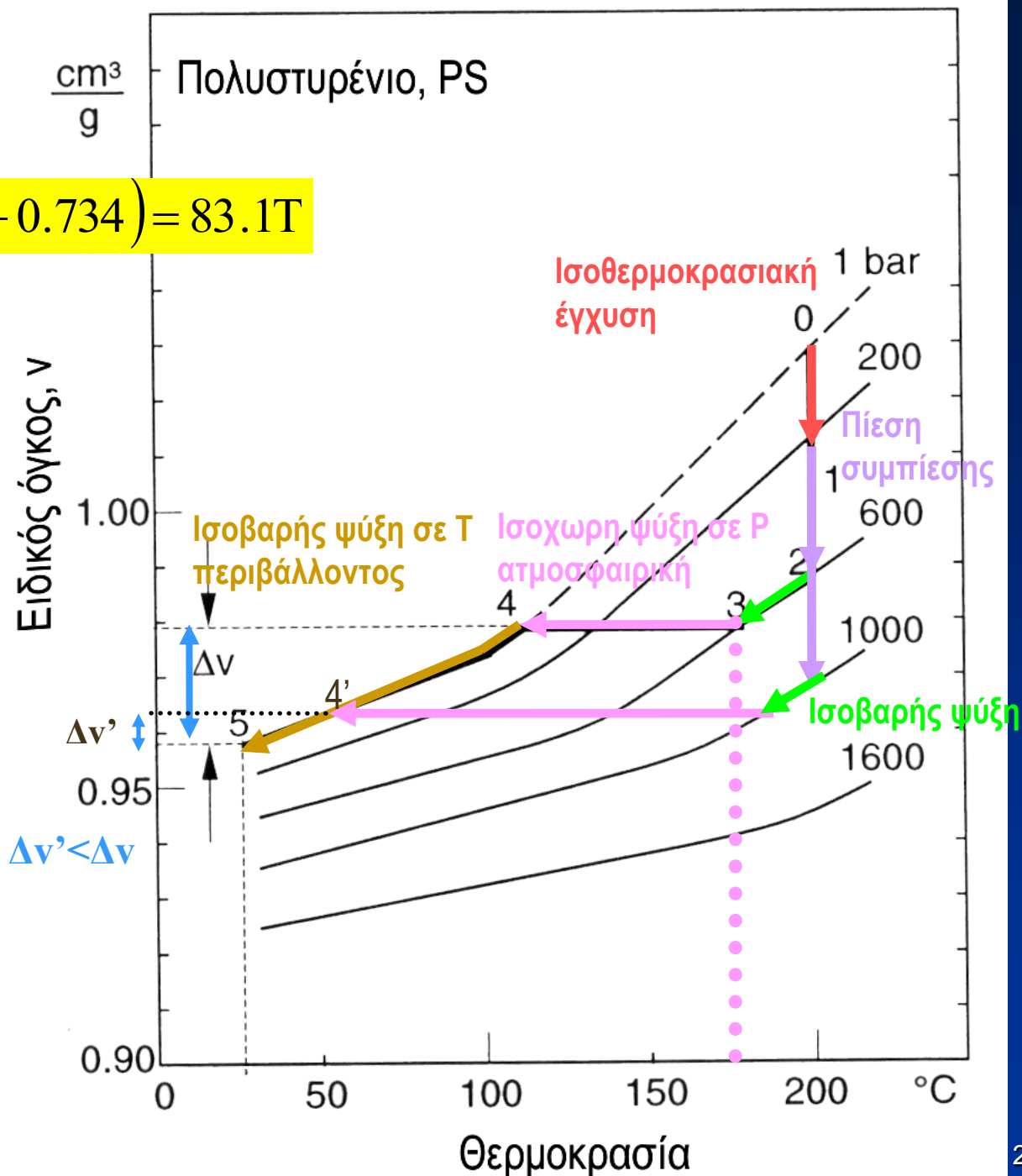
Δεδομένα: $T: 165^{\circ}\text{C}$

Ζητούμενα: $P=1.013$

$$(10^{-3}P + 2.158 \times 10^5)(10^3v - 0.734) = 83.1T$$

PMMA

$$(P + \pi)(v - b) = \frac{RT}{M}$$



Δεδομένα: T:165°C P: 40MPa,

Ζητούμενα: P=1.013x10⁵ Pa T?

$$\left(10^{-3} P + 2.158 \times 10^5\right) \left(10^3 v - 0.734\right) = 83.1 T$$

Μετά την ψύξη της πύλης εισόδου στην κοιλότητα μορφοποίησης η μάζα του πολυμερούς m παραμένει σταθερή

Ο όγκος της κοιλότητας μορφοποίησης V^* είναι σταθερός

Ο ειδικός όγκος του πολυμερούς v_0 είναι σταθερός

$$\left(10^{-3} \cdot 40 \times 10^6 + 2.158 \times 10^5\right) \left(10^3 v_0 - 0.734\right) = 83.1 \cdot 438$$

$$v_0 = 10^{-3} \left(0.734 + \frac{83.1 \cdot 438}{2.558 \times 10^5} \right) = 8.763 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Δεδομένα: T:165°C P: 40MPa,

Ζητούμενα: P=1.013x10⁵ Pa (ατμοσφαιρική πίεση) T?

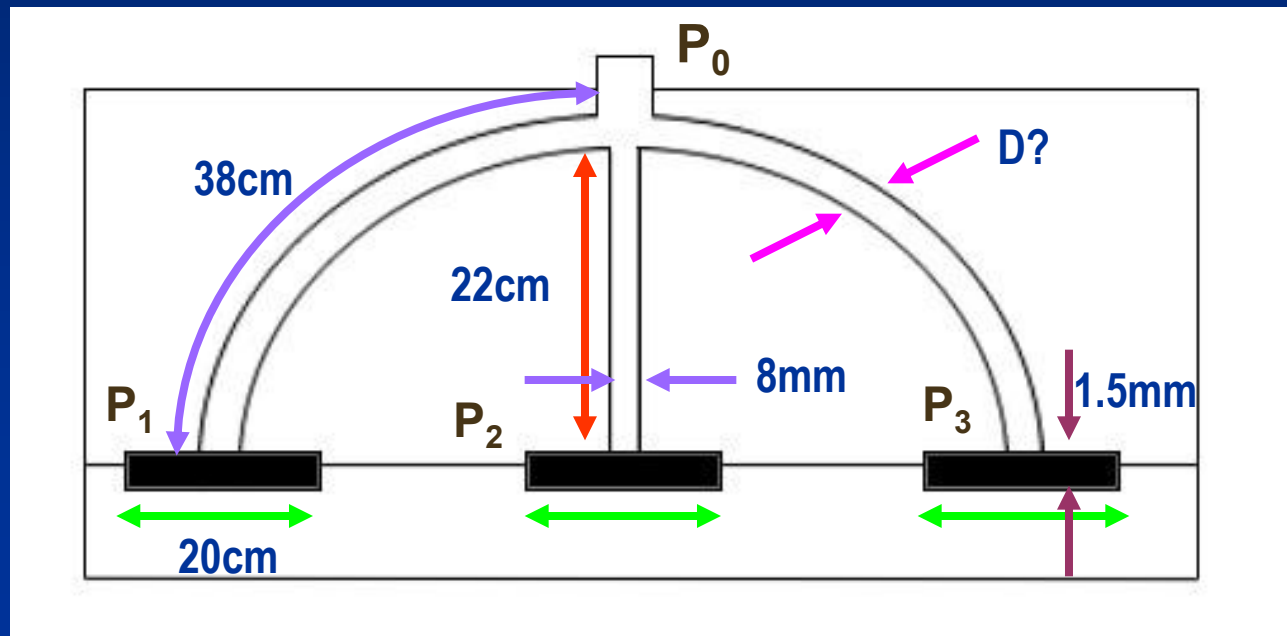
Κατά την ψύξη του τήγματος στην κοιλότητα, ενώ η πίεση είναι πάνω από την ατμοσφαιρική, το πολυμερές πιέζεται προς τα τοιχώματα του καλουπιού ενώ ο v_0 παραμένει σταθερός.

Για να αντισταθμιστεί η πτώση της θερμοκρασίας υπό σταθερό v_0 , συμβαίνει αντίστοιχη πτώση στην πίεση P.

$$\left(10^{-3} \cdot 1.013 \times 10^5 + 2.158 \times 10^5\right) \cdot \left(10^3 \cdot 8.763 \times 10^{-4} - 0.734\right) = 83.1T$$

$$T = 96.5^\circ \text{C}$$

2. Πρόκειται να σχεδιασθεί καλούπι τριών κοιλοτήτων για την ταυτόχρονη παραγωγή τριών ίδιων αντικειμένων με σχήμα δίσκου με την τεχνική της έγχυσης. Οι δίσκοι έχουν διάμετρο 20 cm και πάχος 1.5 mm. Οι αγωγοί διανομής πρέπει να έχουν τη διάταξη που φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Ο κεντρικός αγωγός έχει διάμετρο 8 mm και μήκος 22 cm. Οι πλευρικοί αγωγοί έχουν το ίδιο μήκος 38 cm και πρέπει να είναι ισοζυγισμένοι με τον κεντρικό αγωγό διανομής, ώστε να παράγονται αντικείμενα με ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά. Η πλήρωση των κοιλοτήτων μορφοποίησης πρέπει να ολοκληρώνεται σε 1.2 s. Το ιξώδες του πολυμερικού τήγματος να θεωρηθεί σταθερό με τιμή 31.05 Pa·s.



$$\mu = 31.05 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$t = 1.2 \text{ s}$$

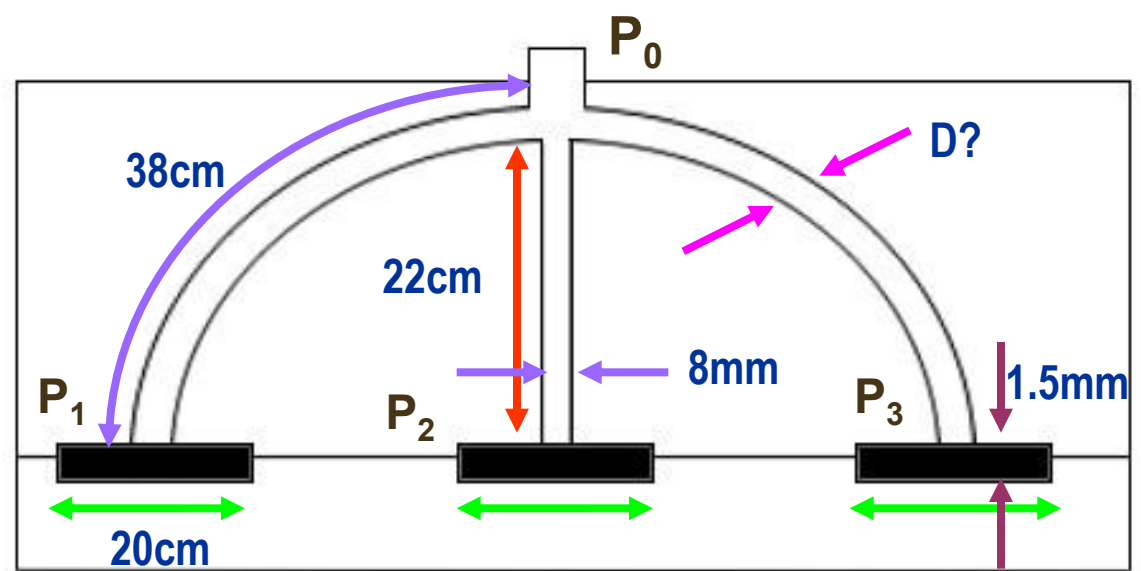
$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu} \frac{\Delta P}{L}$$

$$\Delta P = \frac{8Q\mu L}{\pi R^4}$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3$$

$$Q = \frac{V_{(\text{κοιλότητα})}}{\text{χρόνος πλήρωσης}} = \frac{\pi R_{\kappa}^2 \cdot \text{πάχος}}{t} =$$

$$\frac{\pi(0.1)^2 \cdot 1.5 \times 10^{-3}}{1.2} \Rightarrow Q = 3.927 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$$

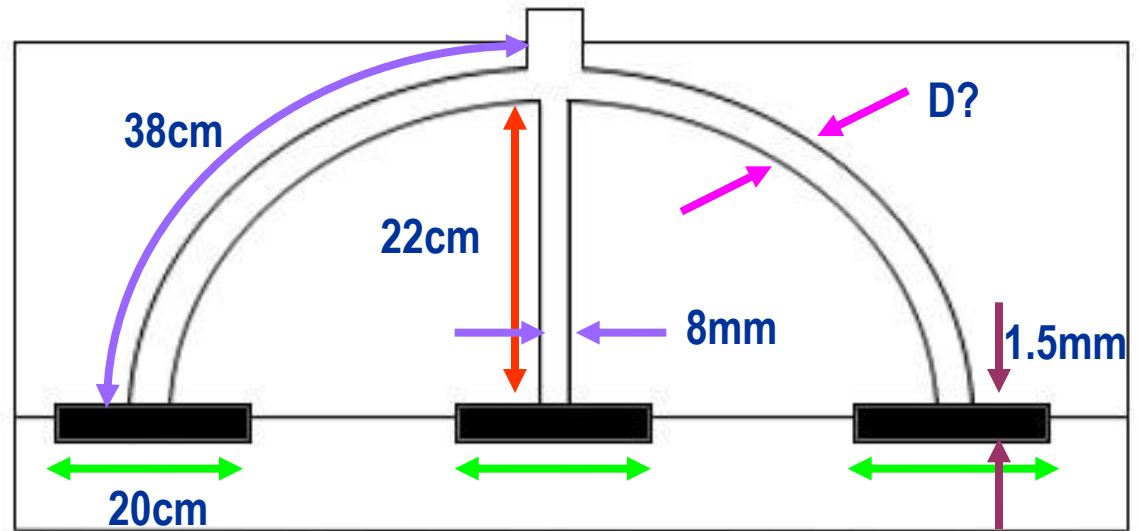


$$\Delta P = \frac{8Q\mu L}{\pi R^4}$$

$$L = 0.22\text{m}$$

$$R = 4 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\mu = 31.05 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$



$$\Delta P = \frac{8 \cdot 3.927 \times 10^{-5} \cdot 31.05 \cdot 0.22}{\pi (4 \times 10^{-3})^4} \Rightarrow \Delta P = 2.7 \text{ MPa}$$

$$R^4 = \frac{8Q\mu L}{\pi \Delta P} = \frac{8 \cdot 3.927 \times 10^{-5} \cdot 31.05 \cdot 0.38}{\pi \cdot 2.67 \times 10^6} \Rightarrow R = 4.58 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$D = 9.2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Σχεδιασμός διεργασίας μορφοποίησης με έγχυση

Τύπος του πολυμερούς

- ✎ Άμορφο, ημικρυσταλλικό
- ✎ Μοριακό βάρος και κατανομή MB
- ✎ Ιξώδες
- ✎ Διαγράμματα (PvT) → Συρρίκνωση

Παράμετροι της διεργασίας μορφοποίησης με έγχυση

- ✎ Θερμοκρασία τήγματος
- ✎ Θερμοκρασία καλουπιού
- ✎ Πίεση έγχυσης
- ✎ Πίεση συμπίεσης
- ✎ Χρονική διάρκεια διαφόρων φάσεων κατά τον κύκλο μορφοποίησης

Παράμετροι που επηρεάζουν το σύστημα των θερμοκρασιών (τήγμα-καλούπι):

- ☞ Η ποσότητα έγχυσης
- ☞ Ο ρυθμός έγχυσης
- ☞ Το μέγεθος αγωγών έγχυσης (?)
- ☞ Το πάχος του προς μορφοποίηση αντικειμένου

Θερμοκρασία τήγματος

Χαμηλότερη θερμοκρασία τήγματος



Υψηλότερες τιμές ιξώδους τήγματος



Αύξηση των διατμητικών τάσεων



Αύξηση του προσανατολισμού στην κατεύθυνση ροής



Υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό

Θερμοκρασία καλουπιού

Χαμηλή θερμοκρασία



Συντομότερος χρόνος μορφοποίησης

Η Κρυσταλλικότητα του ημικρυσταλλικού πολυμερούς ?

- Κρίσιμο σημείο: το άνοιγμα της πύλης εισόδου στην κοιλότητα
Μέγεθος ανοίγματος τέτοιο που να επιτρέπει την καλύτερη ροή στην κοιλότητα στη χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία.



Πίεση έγχυσης και πίεση Συμπίεσης

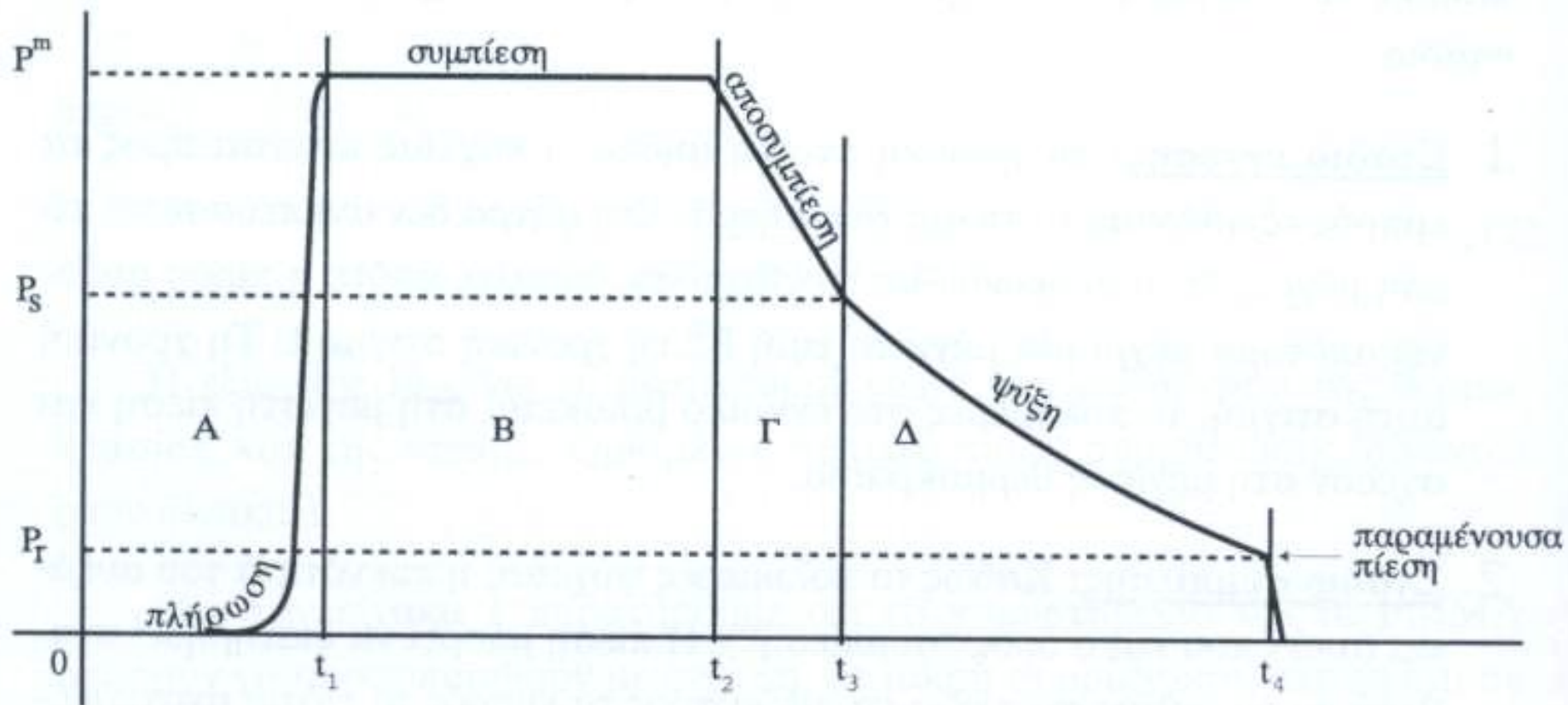
- Η χαμηλότερη δυνατή πίεση που δεν οδηγεί σε *ελλιπή πλήρωση* (short shot) του καλουπιού
- Αρκετά υψηλή για να περιορισθεί η *συρρίκνωση* του αντικειμένου
- Αυξημένη πίεση βοηθά την προσέγγιση των μοριακών αλυσίδων και την πιθανότητα για ανάπτυξη *κρυσταλλικής δομής*.



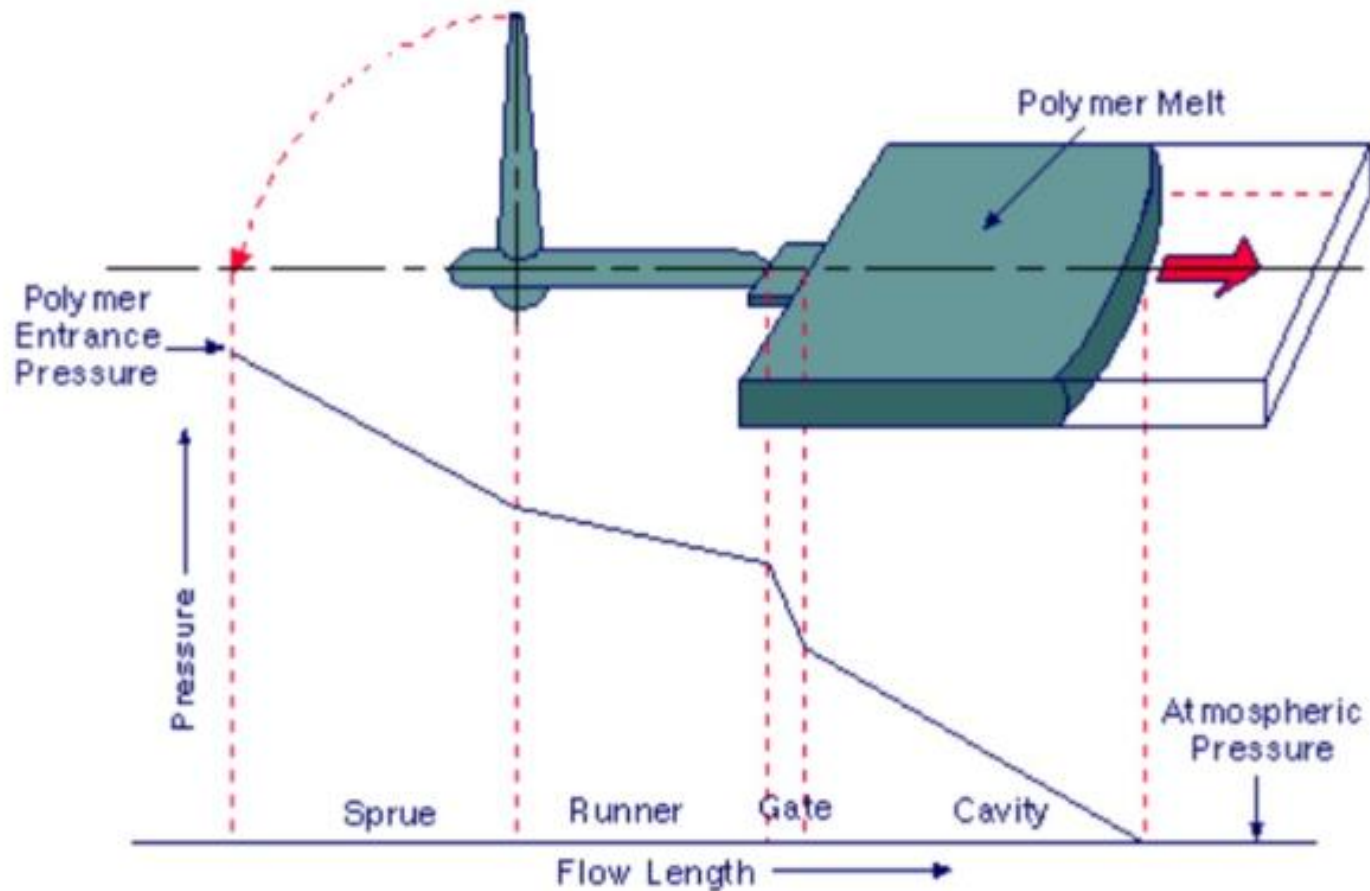
Περιορισμοί:

- i. Η δυναμικότητα της μονάδας έγχυσης και του κλειστικού συστήματος της μηχανής
- ii. Η κατασκευή του καλουπιού

Πίεση έγχυσης και πίεση συμπίεσης



Μεταβολή της πίεσης την ίδια χρονική στιγμή σε διάφορα σημεία του καλουπιού



Χρόνος & ρυθμός έγχυσης

Ο χρόνος που το τήγμα γεμίζει το καλούπι εξαρτάται από:

- 👉 τη γεωμετρία του αντικειμένου
- 👉 το μέγεθος του ανοίγματος της μήτρας
- 👉 το ιξώδες του τήγματος

Χρόνος συμπίεσης

Ο χρόνος που εφαρμόζεται πίεση στο καλούπι μετά από την πλήρωσή του.

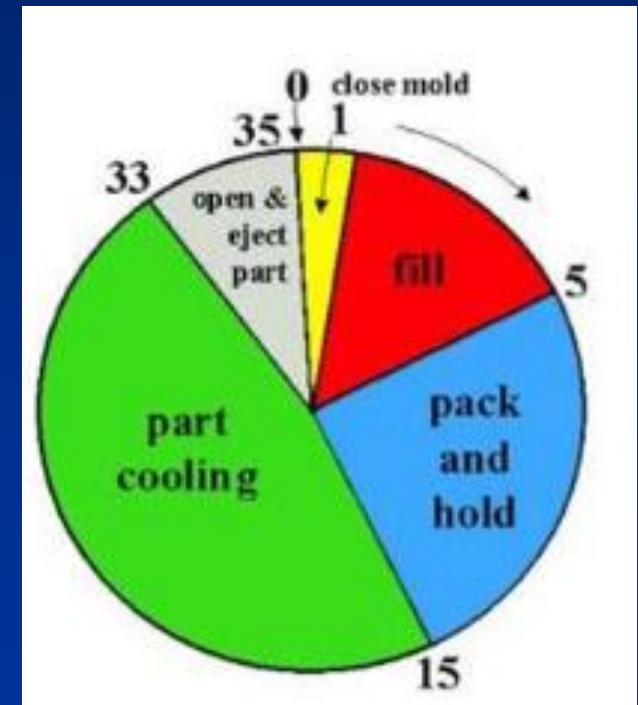
Χρόνος ψύξης

Ο χρόνος από τη στιγμή που δεν εξασκείται καμία πίεση μέχρι το άνοιγμα του καλουπιού.

Εξαρτάται από το πάχος του αντικειμένου.

Διαρκούν από 10-100s.

Χρόνος εξώλκευσης



<https://boyanmfg.com/injection-molding-process-steps/>

Μορφολογία φλοιού- πυρήνα (skin-core)

Η θερμοκρασία του τήγματος
στην κοιλότητα μορφοποίησης
αυξάνει όσο απομακρύνεται το
υλικό από τα τοιχώματα του
καλουπιού →

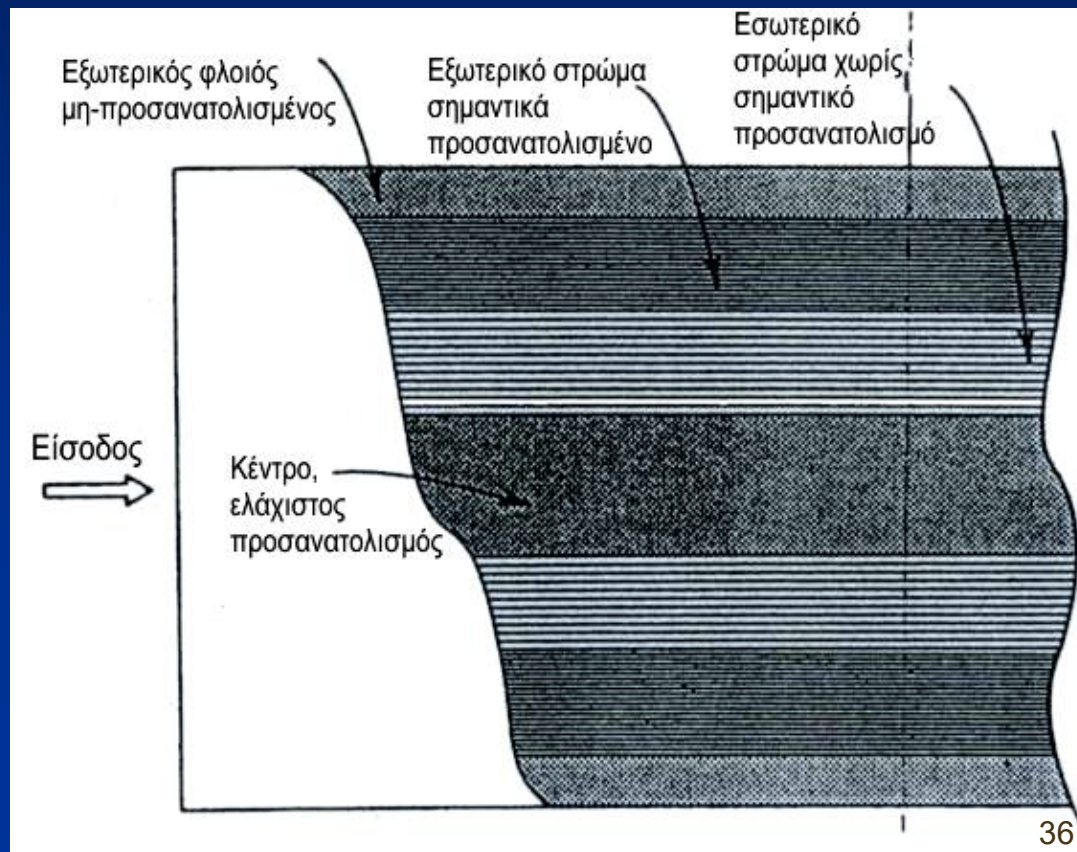
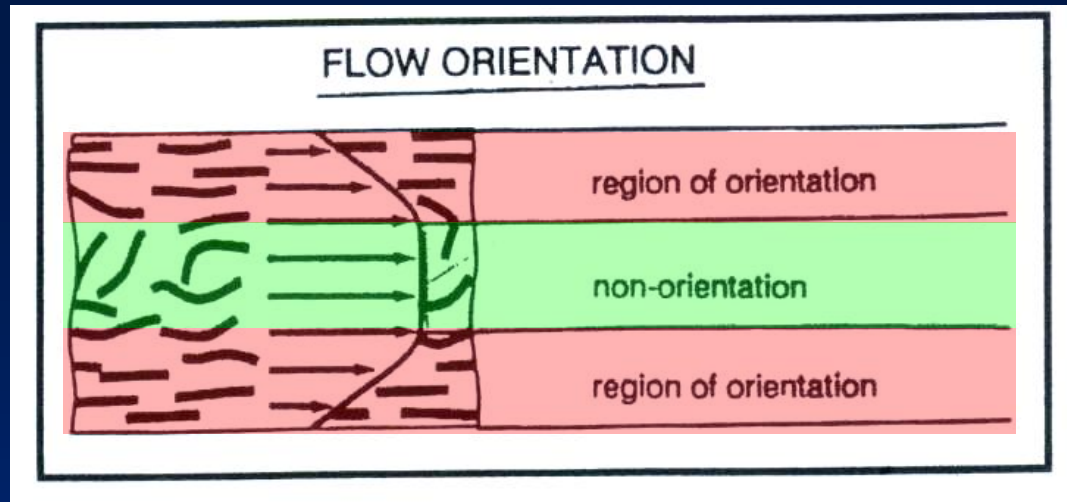
το ιξώδες μειώνεται →

διαφοροποιείται ο
προσανατολισμός των
μακρομορίων →

διαφοροποιούνται οι ιδιότητες

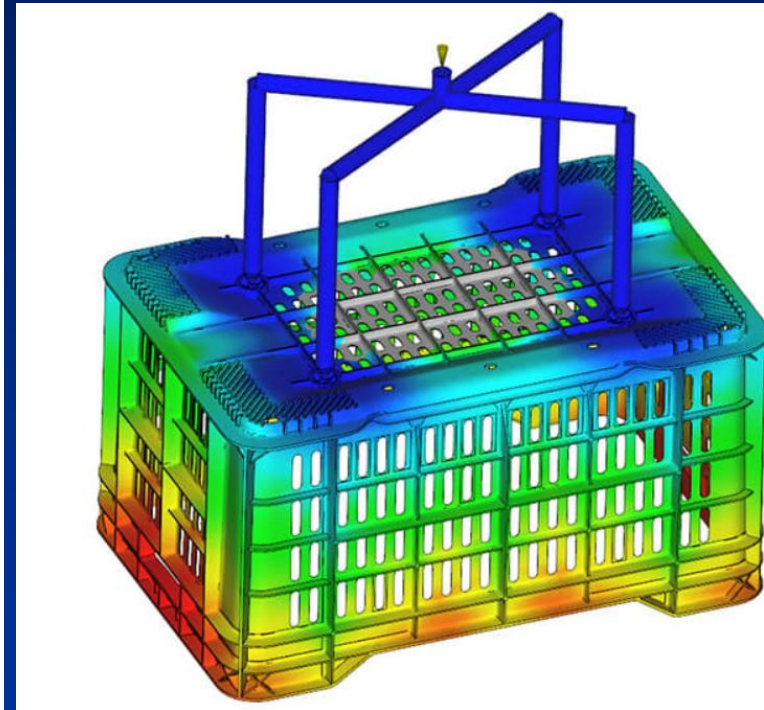
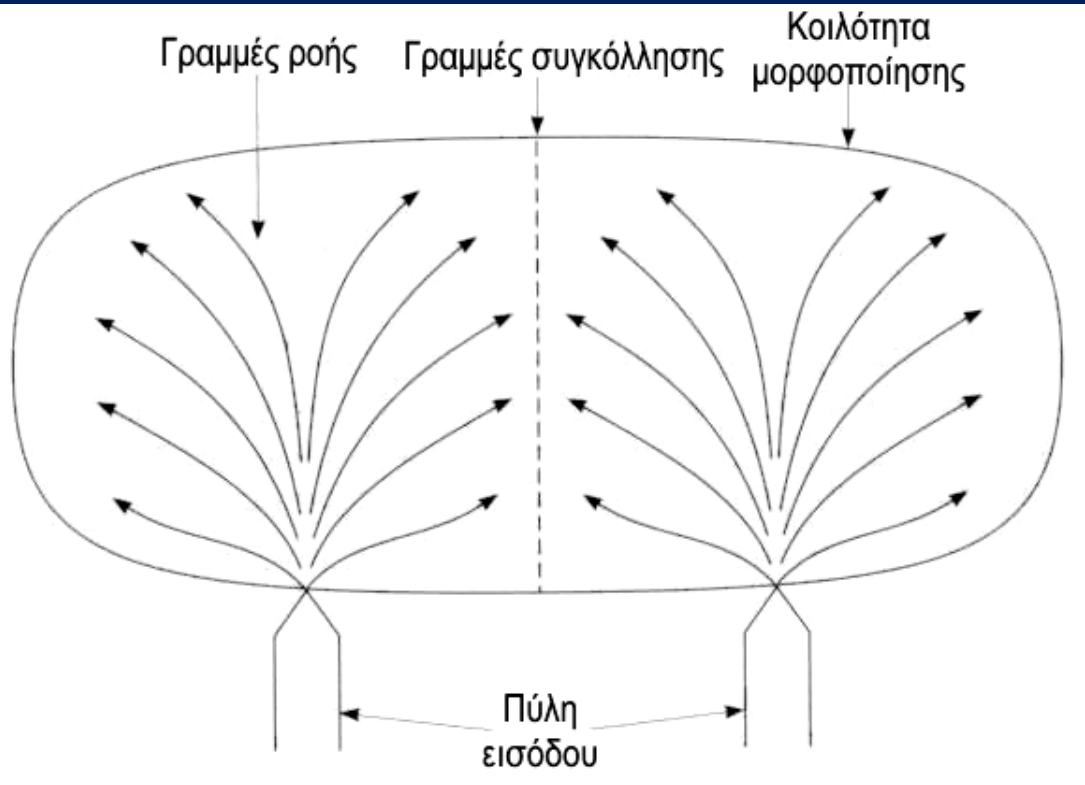


Ανισότροπα προϊόντα



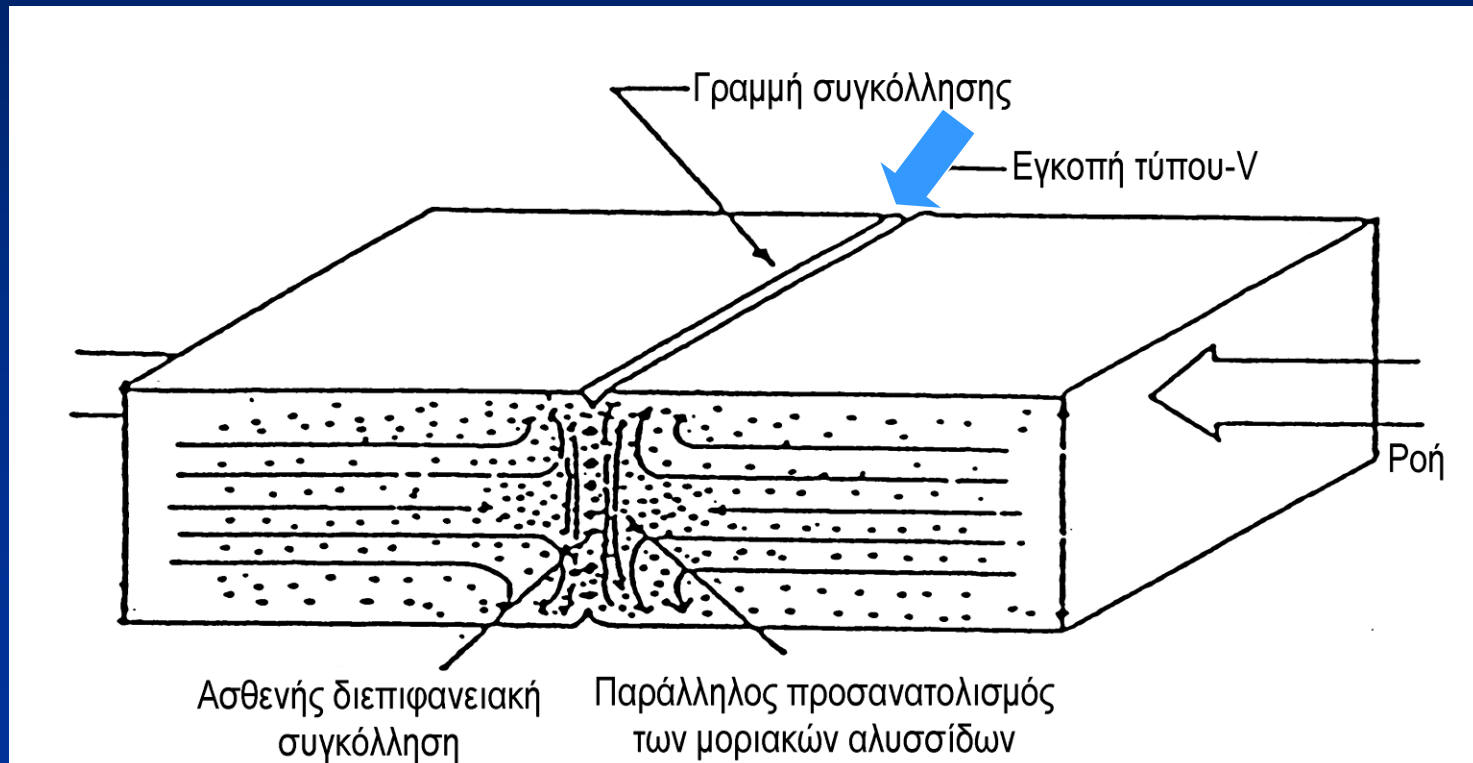
Γραμμές συγκόλλησης (weld lines)

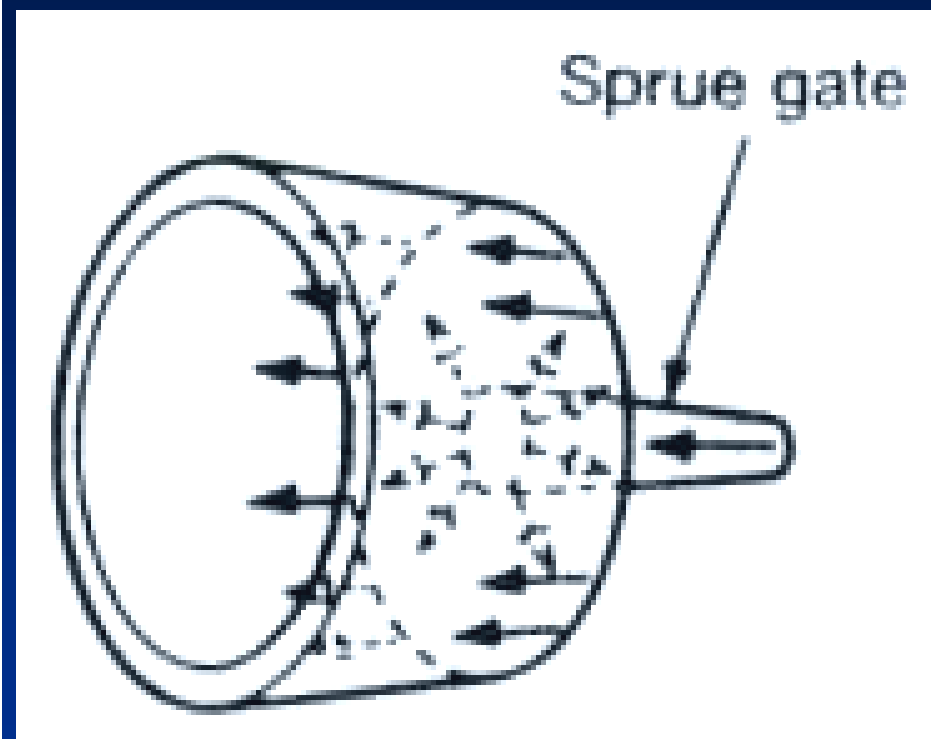
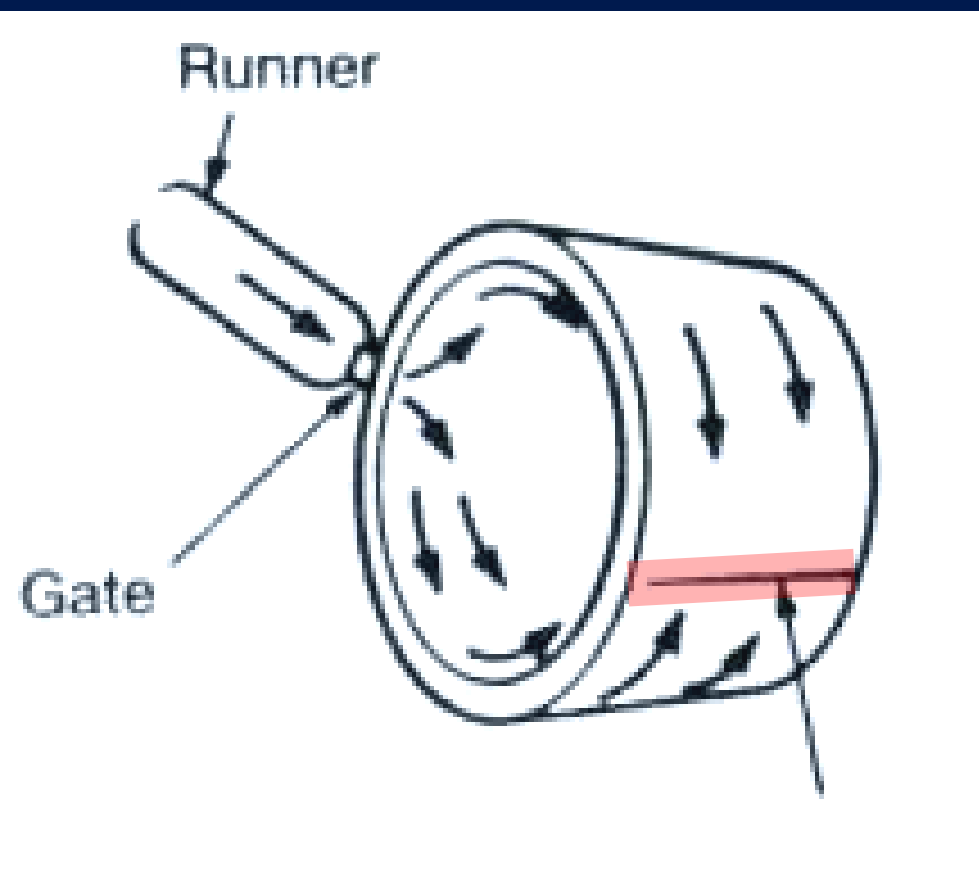
Το σημείο που συναντώνται τα διαφορετικά πεδία ροής δημιουργείται η γραμμή συγκόλλησης με πιθανή εμφάνιση υποδεέστερων μηχανικών ιδιοτήτων.



Οι γραμμές συγκόλλησης είναι γραμμές αδυναμίας λόγω:

- i. Ατελών ή ανεπαρκών διεπιφανειακών συνδέσεων
- ii. Εγκλωβισμού παράλληλα στη ροή προσανατολισμού των μορίων λόγω ψύξης
- iii. Επιφανειακών ατελειών που σχηματίζουν μορφές τύπου “V” κοντά στην τριεπιφάνεια μεταξύ των δύο μετώπων





Πλεονεκτήματα

- Υψηλοί ρυθμοί παραγωγής
- Επιτρέπει “μαζική”, αυτοματοποιημένη παραγωγή με σχετικά μικρή συμμετοχή χειρονακτικής εργασίας
- Επιτρέπει την παραγωγή αντικειμένων με σύνθετες γεωμετρίες και διαφορετικά μεγέθη (πολύ μικρά μεγέθη που είναι αδύνατο να παραχθούν με άλλες μεθόδους)
- Περιορισμένη απώλεια υλικού από αγωγούς και ελαττωματικά αντικείμενα (scrap) καθώς μπορούν να τεμαχισθούν και ανακυκλωθούν → **μηχανική ανακύκλωση**.
- Οι επιφάνειες των αντικειμένων είναι μορφοποιημένες με ακρίβεια
- Χρήση ευρεία κλίμακας πολυμερών και ενισχυμένων πολυμερών

Μειονεκτήματα

- Ακριβό κόστος κατασκευής καλουπιών (υψηλές πιέσεις) και εξοπλισμού
- Αντικείμενα χαρακτηρίζονται από ανισοτροπία
- Έλεγχος συρρίκνωσης μορφοποιημένων αντικειμένων

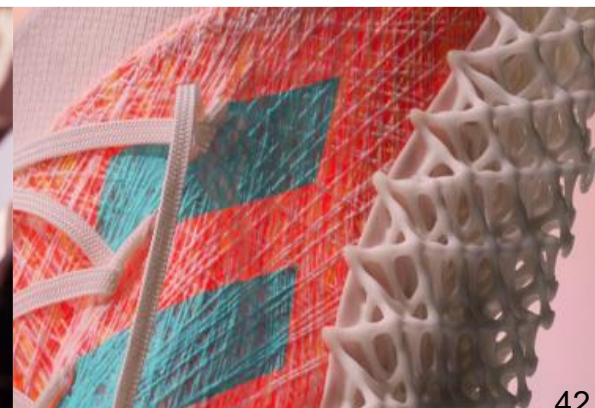
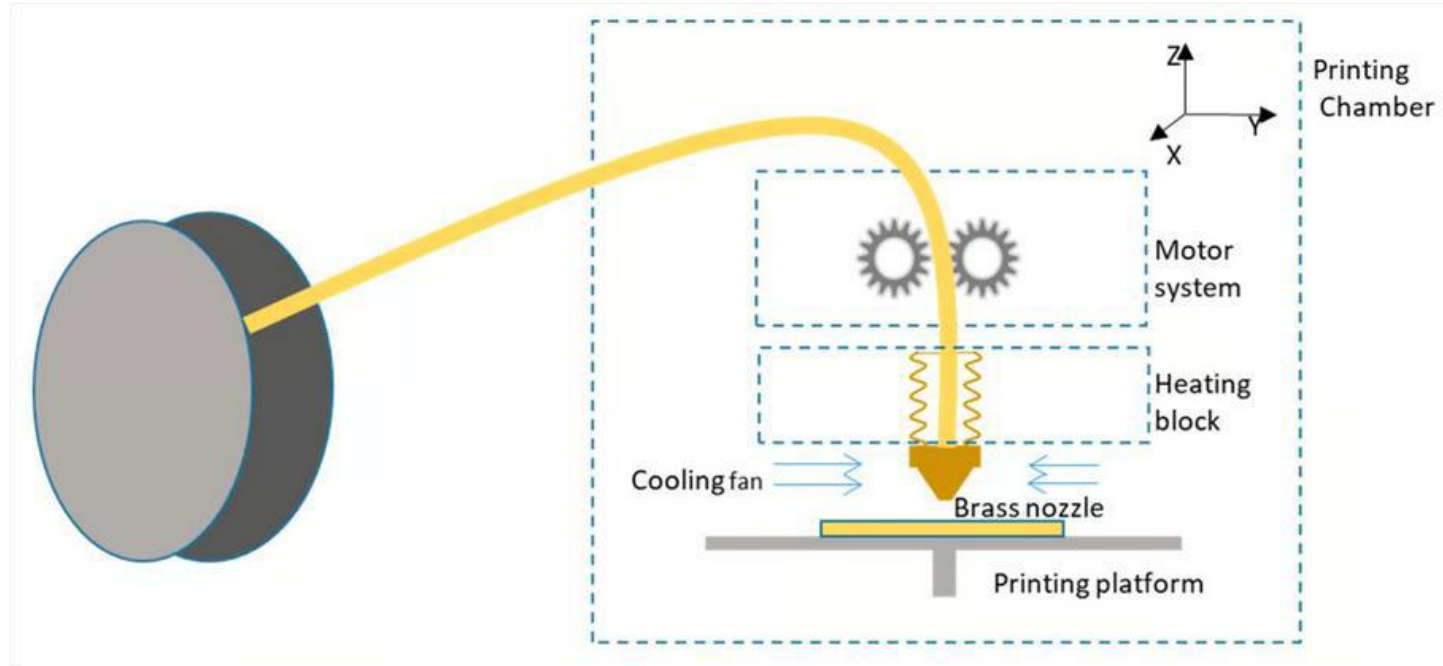
Κατάλληλος τύπος πολυμερούς (grade) σε σχέση με τη διεργασία μορφοποίησης: Extrusion grade and Injection grade

Extrusion grade: υψηλό μοριακό βάρος, υψηλό ιξώδες τήγματος (χαμηλός MFR $\eta_{\text{τήγματος}}/10 \text{ min}$, <10), ευρεία κατανομή μοριακών βαρών, υψηλή αντοχή τήγματος, διακλαδώσεις

Injection grade: χαμηλό μοριακό βάρος, χαμηλό ιξώδες τήγματος (υψηλό MFR, $\eta_{\text{τήγματος}}/10 \text{ min}$, >6), στενή κατανομή μοριακών βαρών, γρήγορη και ομοιόμορφη κρυστάλλωση

Τεχνολογίες Προσθετικής κατασκευής (additive manufacturing)

Τεχνολογία εναπόθεσης συντηγμένου υλικού (Fused Deposition Modeling FDM), ή Κατασκευή συντηγμένου νήματος (Fused Filament Fabrication FFF)



Προτερήματα

Αδυναμίες

Έγχυση

- Ταχύτερος χρόνος ανά εξάρτημα
- Ακρίβεια και επαναληψιμότητα
- Χαμηλότερο κόστος πρώτων υλών
- Ευρεία ποικιλία υλικών προς κατασκευή
- Συνεχής διαδικασία παραγωγής
- Καλύτερη ποιότητα τελικών προϊόντων

- Αυξημένος χρόνος κατασκευής καλουπιών
- Περιορισμός παραγωγής στην τοποθεσία της μηχανής
- Απαιτήσεις χώρων αποθήκευσης καλουπιών
- Κόστος εξαρτώμενο από την γεωμετρία
- Υψηλά κόστη αγοράς καλουπιών

3D Εκτύπωση

- Σχεδόν απεριόριστη γεωμετρική σχεδίαση
- Κόστος ανεξαρτήτου γεωμετρίας
- Μηδενική επένδυση καλουπιών
- Κατασκευή προϊόντος μέσω CAD
- Χαμηλότερο κόστος κατασκευής μέχρι 2000 κομμάτια

- Αυξημένος χρόνος κατασκευής για κάθε κομμάτι
- Ανισοτροπία υλικών
- Μειωμένη επαναληψιμότητα
- Μειωμένο επιφανειακό τελείωμα
- Περιορισμός στη διαθεσιμότητα πρώτων υλών

Βιβλιογραφία

“Σημειώσεις του μαθήματος Δυναμικές Μηχανικές Ιδιότητες Υλικών-Ρεολογία” στο HELIOS, Κεφ. 3

Further reading

1. Κ.Γ. Παναγιώτου. “Πολυμερή: Επιστήμη και Τεχνολογία”, Εκδ. Σιμώνη 2023, Κεφ. 21: §21.2.1, 21.2.6