

6. ΧΥΤΕΥΣΗ

6.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Η χύτευση ανήκει στις αρχέγονες κατεργασίες (primary forming processes) και είναι μηχανική κατεργασία διατήρησης μάζας, βλέπε Κεφ. 5, όπου το προς μορφοποίηση υλικό που βρίσκεται σε ρευστή κατάσταση διοχετεύεται σε μια προετοιμασμένη κοιλότητα, τον *τύπο* (αποτύπωμα ή καλούπι), και αφήνεται να στερεοποιηθεί αποκτώντας την επιθυμητή μορφή. Για την προετοιμασία της κοιλότητας που θα υποδεχθεί το τηγμένο μέταλλο, στις περισσότερες μεθόδους χύτευσης, χρησιμοποιείται ένα *μοντέλο* ή *πρότυπο* (pattern).

Εάν με την χύτευση προσδίδεται στο στερεό και το τελικό του σχήμα, τότε το στερεό ονομάζεται *χυτό* (casting) και αυτή είναι η περίπτωση που θα μας απασχολήσει, κυρίως, στη συνέχεια (shape casting). Εάν όμως το στερεοποιημένο σώμα πρόκειται να υποβληθεί σε κατεργασίες διαμόρφωσης (π.χ. έλαση ή σφυρηλάτηση) για να αποκτήσει τις επιθυμητές ιδιότητες και την τελική του μορφή, τότε ονομάζεται *πλίνθωμα* (ingot) η δε διαδικασία μορφοποίησης του (χύτευση πλινθώματος) ουσιαστικά αποτελεί ένα προκαταρκτικό στάδιο κατεργασιών διαμόρφωσης.

Παρόλο που κατασκευάζονται χυτά αντικείμενα από μη μεταλλικά υλικά (συνθετικές ύλες, θερμοπλαστικά υλικά, κεραμικά), ή χύτευση έχει πρωτεύουσα σημασία στη παραγωγή μεταλλικών προϊόντων από σιδηρούχα (χυτοσίδηρος, χυτοχάλυβας) και μη σιδηρούχα (αλουμίνιο, χαλκός, ορείχαλκος, μαγνήσιο, ψευδάργυρος, κασσίτερος, μόλυβδος και κράματα αυτών) μέταλλα. Επισημαίνεται εδώ ότι τα βιομηχανικά κράματα ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα *κράματα χύτευσης* (cast alloys) και τα *κράματα διαμόρφωσης* (wrought alloys).

Οι διαστάσεις των χυτών αντικειμένων ποικίλουν και καλύπτουν όλη την περιοχή από τεμάχια μεγέθους μερικών χιλιοστών και βάρους κλάσματος τού γραμμαρίου, όπως τα δόντια ενός φερμουάρ, μέχρι τεμάχια διαστάσεων 10 και πλέον μέτρων και βάρους πολλών τόνων, όπως π.χ. προπέλες πλοίων. Με τη χύτευση κατασκευάζονται ακόμα και σύνθετες μορφές τεμαχίων που μερικές φορές είναι αδύνατο να κατασκευασθούν με άλλες μεθόδους κατεργασίας, π.χ. τεμάχια που έχουν κενούς χώρους, οπές, καμπυλότητες ή τεμάχια από μέταλλα που είναι δύσκολο να υποστούν μια περαιτέρω κατεργασία αποβολής υλικού. Λόγω των προτερημάτων και των δυνατοτήτων της, η χύτευση είναι μια από τις πιο σημαντικές παραγωγικές κατεργασίες.

6.2 Μέθοδοι χύτευσης: Ταξινόμηση και ορολογία

6.2.1 Ταξινόμηση των μεθόδων χύτευσης

Οι μέθοδοι χύτευσης που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι πολλές και εμφανίζονται με διαφορετικές παραλλαγές. Χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η παραγωγή πλινθωμάτων (ingot casting), μια **ταξινόμηση των μεθόδων χύτευσης** μπορεί να γίνει με κριτήριο τη φύση του μοντέλου και του καλούπιού. Διακρίνονται οι ακόλουθες μεγάλες ομάδες μεθόδων χύτευσης:

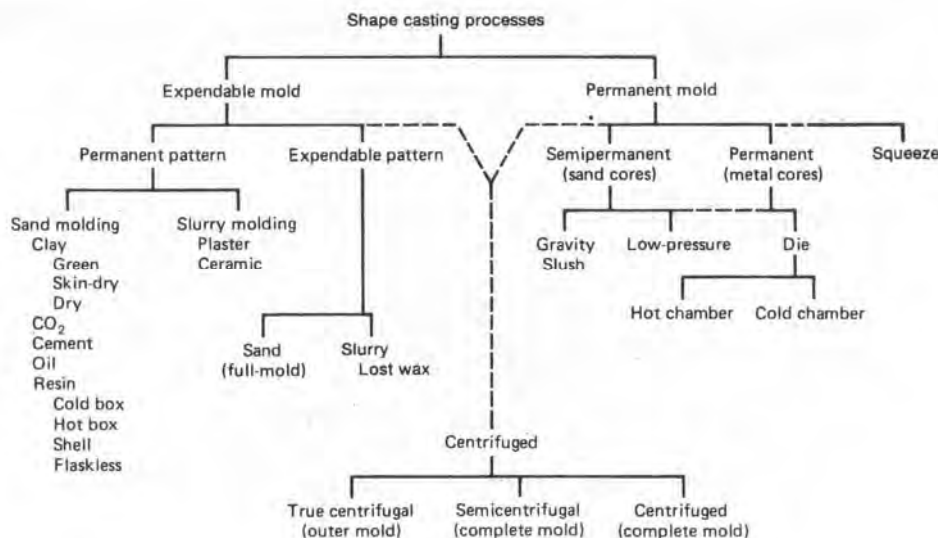
- Μέθοδοι με καλούπι μιας χρήσης και μόνιμο μοντέλο.
- Μέθοδοι με καλούπι και μοντέλο μιας χρήσης.
- Μέθοδοι με μόνιμο καλούπι.
- (Ειδικές) Μέθοδοι με μόνιμο ή μιας χρήσης καλούπι.

Στις ομάδες αυτές περιλαμβάνονται, αντίστοιχα, οι ακόλουθες τεχνικές:

- ➔ *Μέθοδοι με καλούπι μιας χρήσης και μόνιμο μοντέλο (expandable mold, permanent pattern casting)*
 - Χύτευση σε άμμο (sand casting) με κύριες παραλλαγές τη μέθοδο της υγρής άμμου (green sand casting) και τη μέθοδο της ξηρής άμμου (dry-sand casting)
 - Χύτευση σε άλλα μέσα πλινθ άμμου (slurry-mold casting) με κύριες παραλλαγές τη χύτευση σε γύψινο καλούπι (plaster-mold casting) και τη χύτευση σε κεραμικό καλούπι (ceramic-mold casting)
- ➔ *Μέθοδοι με καλούπι και μοντέλο μιας χρήσης (expandable mold, expandable pattern casting)*
 - Χύτευση με "μάσκα" (shell casting)
 - Χύτευση με "επένδυση" (investment casting)
- ➔ *Μέθοδοι με μόνιμο καλούπι (permanent pattern casting)*
 - Χύτευση βαρύτητας (gravity casting)
 - Χύτευση χαμηλής πίεσης (low-pressure casting)
 - Χύτευση πίεσης (die casting)
 - Χύτευση συμπίεσεως (squeeze casting)
- ➔ *(Ειδικές) Μέθοδοι με μόνιμο ή μιας χρήσης καλούπι*
 - Φυγοκεντρική χύτευση (centrifugal casting)

- Ημι-φυγοκεντρική χύτευση (semi-centrifugal casting)
- Φυγοκεντριζόμενη χύτευση (centrifugal casting)

Η ταξινόμηση των μεθόδων χύτευσης παρουσιάζεται διαγραμματικά στο Σχήμα 6.1. Κάθε μία από τις μεθόδους αυτές διαθέτει ορισμένα πλεονεκτήματα και συγκεκριμένα πεδία εφαρμογών. Οι κυριότερες από αυτές παρουσιάζονται συνοπτικά στην ενότητα 6.4.



Σχήμα 6.1: Ταξινόμηση μεθόδων χύτευσης των μετάλλων.
(προέλευση: Schey, 1987)

6.2.2 Βασική ορολογία χύτευσης

Η ορολογία που χρησιμοποιείται στην χύτευση παρουσιάζεται με αναφορά σ' ένα τυπικό **καλούπι (mold)** για χύτευση σε (υγρή) άμμο, βλέπε Σχήμα 6.2. Τα καλούπια είναι ο σημαντικότερος παράγοντας σε μία χύτευση και συνήθως είναι διαιρετά και αποτελούνται από δύο μέρη. Εξαιρεση αποτελεί η χύτευση με μοντέλα από κερί ή θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη όπου χρησιμοποιείται ολόσωμο καλούπι, καθώς και οι μέθοδοι χύτευσης σε μόνιμο (επαναχρησιμοποιούμενο) τύπο όπου χρησιμοποιούνται καλούπια ή μήτρες με περισσότερα από δύο μέρη προκειμένου να χυτευθούν αντικείμενα πολύπλοκης γεωμετρίας. Το καλούπι περιορίζεται και διαμορφώνεται μέσα στο **πλαίσιο** ή **κάσα (flask)**. Τα πλαίσια διακρίνονται σε *σταθερά* ή *λνόμενα* και χρησιμοποιούνται κατά ζεύγη οπότε διακρίνουμε, αντίστοιχα, **άνω πλαίσιο (cope)** και **κάτω πλαίσιο (drag)**, βλέπε Σχήμα 6.2. Τα πλαίσια είναι συνήθως ξύλινα ή μεταλλικά και χωρίς πυθμένα. Στο εσωτερικό τους φέρουν οριζόντιες *νευρώσεις* για τη συγκράτηση της άμμου, ενώ στις

εξωτερικές πλευρές τους προσαρτώνται υποδοχές, όπου προσαρμόζονται οι **ευθυντήριοι πείροι (connecting pins)** που εξασφαλίζουν την τακτοποίηση στη σωστή θέση των δύο τμημάτων του πλαισίου κατά τις διάφορες φάσεις της χύτευσης.

Για να δοθεί στην κοιλότητα του καλουπιού το κατάλληλο σχήμα, ώστε να χυτευθεί το υλικό και να παραχθεί το χυτό, χρησιμοποιούνται τα μοντέλα. Το **μοντέλο (pattern)** είναι «όμοιο» του αντικειμένου που πρόκειται να παραχθεί με μια κύρια διαφορά: Όλες οι διαστάσεις του είναι αυξημένες, σε σχέση με το τελικό αντικείμενο, για να ληφθεί υπόψη η συστολή του τήγματος μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (solid shrinkage ή shrinkage allowance). Εφόσον προβλέπεται κατεργασία κοπής για αποπεράτωση του χυτού, προστίθεται και το κατάλληλο πάχος υλικού που προβλέπεται να απομακρυνθεί κατά την αποπεράτωση (machining allowance). Το μοντέλο συνήθως κατασκευάζεται από ξύλο (λόγω του χαμηλού του κόστους), μέταλλο, γύψο ή συνθετικές ρητίνες. Τα μεταλλικά μοντέλα έχουν μεγαλύτερο κόστος παραγωγής, κατασκευάζονται συνήθως από αλουμίνιο, μπρούντζο ή χυτοσίδηρο και διαθέτουν καλύτερη στιβαρότητα και διαστατική σταθερότητα σε σχέση με τα ξύλινα. Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που απαιτείται «τύπωμα» πολλών τεμαχίων και υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του ξύλινου προτύπου.

Το μοντέλο πρέπει να απομακρύνεται εύκολα από το καλούπι και για το λόγο αυτό κατασκευάζεται συνήθως σε δύο τμήματα (διαιρετό ή διμερές). Αντίστοιχα και στο καλούπι επιλέγεται ένα **επίπεδο διαχωρισμού (parting line)** που διαχωρίζει την κοιλότητα σε δύο τμήματα. Οι επιφάνειες οι κάθετες στη διεύθυνση απομάκρυνσης του μοντέλου διαμορφώνονται με μια **κωνικότητα (draft)**, ώστε να είναι δυνατή η αφαίρεση του μοντέλου χωρίς καταστροφή ή παραμόρφωση του τύπου.

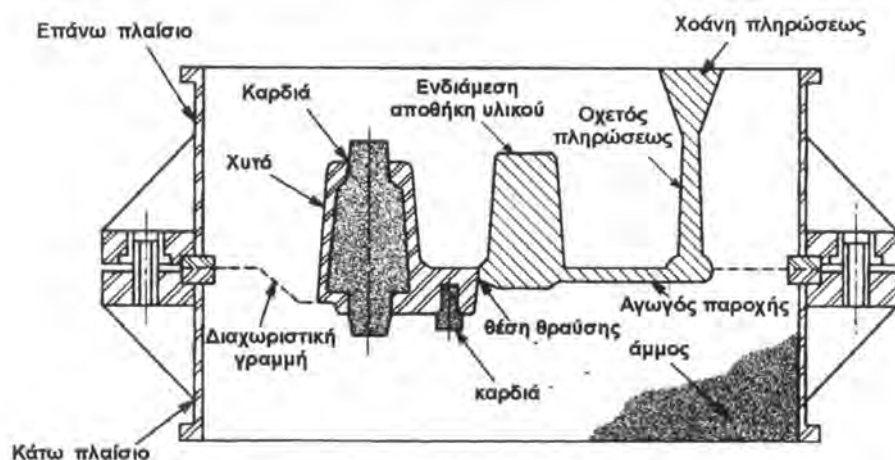
Για να δημιουργηθούν οι εσωτερικές διαμορφώσεις του χυτού, μέσα στην κοιλότητα του χυτού χρησιμοποιούνται **πυρήνες ή καρδιές (core)** που είναι φτιαγμένες από ειδική άμμο ή μέταλλο. Με τον τρόπο αυτό γίνεται δυνατή η χύτευση αντικειμένων συνθετότερης γεωμετρίας αλλά αυξάνει το κόστος κατασκευής. Οι καρδιές στηρίζονται σε ειδικές υποδοχές του καλουπιού (nesting holes ή core prints).

Κάθε καλούπι διαθέτει επίσης **αγωγούς (runners)** για να διοχετευθεί το λιωμένο μέταλλο και τουλάχιστον ένα κατακόρυφο αγωγό (**χοάνη** και **οχετό πλήρωσης/pouring basin - sprue**) για την τροφοδότηση με τήγμα. Ιδιαίτερα σε χυτά τεμάχια μεγάλου όγκου χρησιμοποιούνται στο καλούπι **ενδιάμεσες αποθήκες υλικού (feeder head ή blind riser)**. Ο ρόλος των αποθηκών αυτών είναι πολύ σημαντικός, γιατί στις περιπτώσεις μεγάλων

τεμαχίων δημιουργούνται κενά στο χυτό εξ αιτίας της στερεοποίησης των εξωτερικών επιφανειών πριν από το εσωτερικό του χυτού. Με τη χρήση τους, τα σφάλματα στερεοποίησης (βλέπε ενότητα 6.7) δημιουργούνται σε αυτές και το χυτό παραμένει χωρίς κενά. Επίσης στη χύτευση πολύ καθαρών μετάλλων, στις ενδιάμεσες αποθήκες συγκεντρώνονται οι τυχόν ακαθαρσίες, ενώ το χυτό παραμένει καθαρό.

Γενικά, ο σχετός πλήρωσης, οι αγωγοί ροής, οι αποθήκες υλικού κ.λπ. σχηματίζουν ένα **σύστημα καναλιών (gating system)** που επιτρέπει την ομοιόμορφη ροή και κατανομή του τήγματος σε όλο τον όγκο του χυτού. Η σωστή σχεδίαση και συγκρότηση του συστήματος καναλιών είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή, τεχνικά και οικονομικά, χύτευση -χωρίς ελαττώματα- και απαιτεί αυξημένη τεχνογνωσία και εμπειρία.

Το ρευστό μέταλλο πρέπει να διοχετευθεί στον τύπο κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να απομακρύνονται ο αέρας ή τα αέρια που δημιουργούνται από την επίδραση του θερμού μετάλλου πάνω στον τύπο και να επιτευχθεί η τέλεια πλήρωση του τύπου από το ρευστό μέταλλο, ώστε το τελικό χυτό να είναι συμπαγές και απαλλαγμένο από ελαττώματα.



Σχήμα 6.2: Ορολογία χύτευσης με αναφορά σε τομή καλουπιού για χύτευση σε άμμο.

6.3 Ροή τήγματος – Εύροια

Η έγχυση του τήγματος και η ροή του μέσα στον τύπο είναι φαινόμενο που εμπίπτει στη μηχανική των ρευστών και κατά συνέπεια μελετάται με εφαρμογή αντίστοιχων αρχών.

α) αρχή της συνέχειας

Για ασυμπίεστο υγρό και σε σύστημα με μη διαπερατά τοιχώματα ισχύει:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (6.1)$$

όπου Q: η παροχή όγκου, A: η διατομή του αγωγού και v: η ταχύτητα του ρευστού

Η αρχή της συνέχειας εναλλακτικά διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Σε αγωγό σταθερής διατομής: } Q = \text{σταθερή} \quad (6.1a)$$

$$\text{Σε διακλάδωση: } \Sigma Q_{\text{εισερχ}} = \Sigma Q_{\text{εξερχ}} \quad (6.1b)$$

β) θεώρημα Bernoulli

Το θεώρημα του Bernoulli στηρίζεται στην αρχή διατήρησης της ενέργειας και συσχετίζει την πίεση (p), την ταχύτητα (v) και την υψομετρική διαφορά (h) (από μία στάθμη αναφοράς) ενός ρευστού:

$$h + p/\rho g + v^2/2g = \text{ct} \quad (\text{σταθερά}) \quad (6.2)$$

Κατά συνέπεια σε δύο διαφορετικές θέσεις (1) και (2) του συστήματος καναλιών (gating system) ενός χυτού θα ισχύει:

$$h_1 + p_1/\rho g + v_1^2/2g = h_2 + p_2/\rho g + v_2^2/2g + f \quad (6.3)$$

όπου f: οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβών

γ) χαρακτήρας ροής

Η παρουσία στροβιλισμών (τύρβης) έχει ιδιαίτερη σημασία κατά τη ροή του τήγματος στο δίκτυο των οχετών χύτευσης. Ο χαρακτήρας της ροής περιγράφεται κατά τα γνωστά με την χρήση του αριθμού Reynolds (Re). Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός αυτός τόσο εντονότερη είναι η τάση για την ανάπτυξη τυρβώδους ροής. Σ' ένα σύνηθες δίκτυο οχετών χύτευσης ο αριθμός Reynolds κυμαίνεται από 2.000 έως 20.000. Τιμή $Re < 2000$ υποδηλώνει στρωτή ροή. Ροή στην περιοχή 2.000-20.000 ισοδυναμεί με «μίξη» στρωτής και τυρβώδους ροής. Αριθμός Reynolds πλησίον της τιμής 20.000 πρέπει να αποφεύγεται διότι δημιουργεί έντονα φαινόμενα τύρβης τα οποία οδηγούν σε παγίδευση αέρα και δημιουργία φυσαλίδων και οξειδίων που αποτελούν ελάττωμα του χυτού.

Ικανότητα των υλικών προς χύτευση ή εύροια (fluidity)

Με τον γενικό όρο *εύροια* περιγράφεται η ικανότητα του τήγματος να γεμίζει με ακρίβεια το αποτύπωμα. Η εύροια εξαρτάται από τις ιδιότητες/παραμέτρους του τήγματος και τις συνθήκες χύτευσης.

Παράμετροι του τήγματος που επηρεάζουν την εύροια είναι:

- το ιξώδες
- η επιφανειακή τάση

- η επιφανειακή τάση λόγω οξείδωσης
- τα διαλυμένα στο τήγμα αέρια
- οι αιωρούμενες στο τήγμα σκουριές (εγκλείσματα)
- ο τρόπος στερεοποίησης και κρυστάλλωσης του τήγματος

Συνθήκες της χύτευσης που επηρεάζουν την εύροια είναι:

- το σχήμα του τεμαχίου
- η πίεση εγχύσεως του τήγματος προς πλήρωση του αποτυπώματος
- οι ιδιότητες των τοιχωμάτων του αποτυπώματος
- ο ρυθμός χύτευσης
- ο βαθμός υπερθέρμανσης του τήγματος

Η *ικανότητα προς χύτευση (castability)* είναι γενικότερος όρος που αναφέρεται στη δυνατότητα ενός υλικού να μορφοποιείται σε τελικό προϊόν με κατεργασία χύτευσης. Είναι ανάλογος των όρων «συγκολλητότητα» και «διαμορφωσιμότητα» που αναφέρονται στη δυνατότητα μορφοποίησης με συγκόλληση και κατεργασίες διαμόρφωσης, αντίστοιχα. Ο Πίνακας 6.1 που ακολουθεί παρουσιάζει τις κύριες εφαρμογές και την ικανότητα προς χύτευση των τυπικών βιομηχανικών κραμάτων.

Πίνακας 6.1: Τυπικές εφαρμογές χύτευσης των βιομηχανικών κραμάτων.
(προέλευση: Kalpakjian and Schmid, 2003)

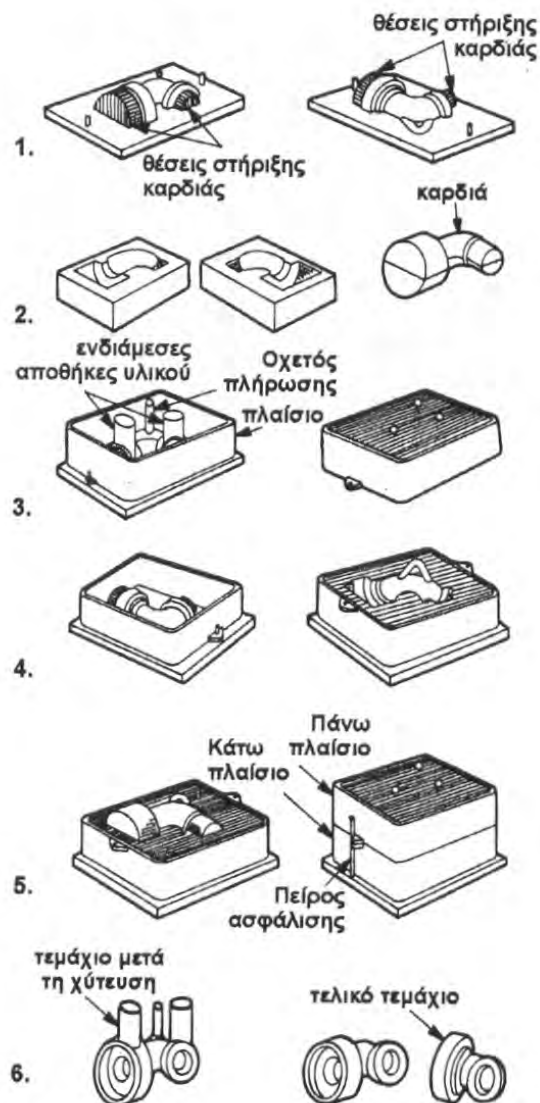
TYPE ALLOY	OF	APPLICATION	CASTABILITY	WELDABILITY	MACHINABILITY
Aluminum		Pistons, clutch housings, intake manifolds, engine blocks, heads, cross members, valve bodies, oil pans, suspension components	G-E	F	G-E
Copper		Pumps, valves, gear blanks, marine propellers	F-G	F	G-E
Gray Iron		Engine blocks, gears, brake disks and drums, machine bases	E	D	G
Magnesium		Crankcase, transmission housings, portable computer housings, toys	G-E	G	E
Malleable iron		Farm and construction machiner, heavy-duty bearings, railroad rolling stock	G	D	G
Nickel		Gas turbine blades, pump and valve components for chemical plants	F	F	F
Nodular iron		Crankshafts, heavy-duty gears	G	D	G
Steel (carbon and low alloy)		Die blocks, heavy-duty gear blanks, aircraft undercarriage members, railroad wheels	F	E	F-G
Steel (high alloy)		Gas turbine housings, pump and valve components, rock crusher jaws	F	E	F
White iron (Fe ₃ C)	iron	Mill liners, shot blasting nozzles, railroad brake shoes, crushers and pulverizers	G	VP	VP
Zinc		Door handles, radiator grills	E	D	E

*E, excellent; G, good; F, fair; VP, very poor; D, difficult.

6.4 Κύριες μέθοδοι χύτευσης

6.4.1 Μέθοδοι με χρήση μη μόνιμου τύπου (expendable mold casting)

⇒ Χύτευση σε άμμο (sand casting)

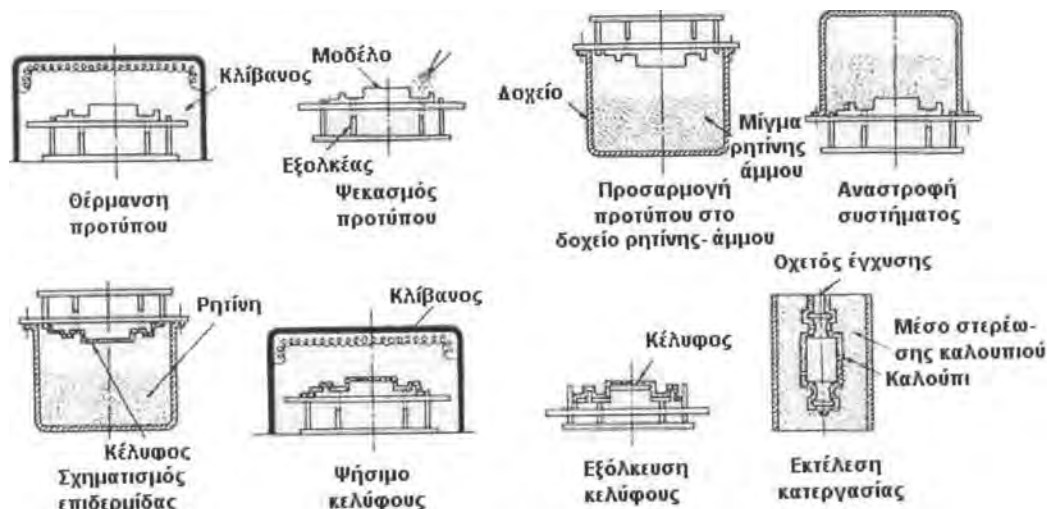


Σχήμα 6.3: Χύτευση σε άμμο.

⇒ Χύτευση σε γύψινο καλούπι (Plaster-mold casting)

⇒ Χύτευση σε κεραμικό καλούπι (ceramic-mold casting)

⇒ Χύτευση κελύφους ή χύτευση με «μάσκα» ή μέθοδος Croning (shell mould casting)



Σχήμα 6.4: Χύτευση κελύφους ή χύτευση με «μάσκα».

(προέλευση: Μανωλάκος, 2001)

⇒ Χύτευση με επένδυση ή με «λιωμένο κερί» (*investment casting*)

Πρόκειται για μέθοδο χύτευσης μεγάλης ακριβείας, γνωστής ήδη από την κλασική αρχαιότητα*. Εφαρμόζεται κυρίως για την κατασκευή μεγάλου εύρους μορφής χυτών μικρών διαστάσεων και σε υλικά που δεν επιδέχονται εύκολα κατεργασία αποβολής υλικού ή σε υλικά που η δευτερογενής επεξεργασία τους είναι πολύ δαπανηρή. Το βάρος των κατασκευαζόμενων χυτών ποικίλλει από μερικά gr μέχρι μερικά kg, ενώ μπορεί να επιτευχθούν πάχη μέχρι 0.5 mm. Η μέθοδος είναι εφαρμόσιμη σε όλα τα σιδηρούχα και μη σιδηρούχα κράματα. Τυπικά παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου αποτελούν η κατασκευή κοσμημάτων, οδοντικών προθέσεων, κοπτικών εργαλείων ειδικής γεωμετρίας, πτερυγίων στροβίλων κ.λπ.

Χρησιμοποιείται μεταλλικό πρότυπο λείο και μεγάλης διαστατικής ακριβείας (το λεγόμενο κύριο πρότυπο) κατασκευασμένο συνήθως από μπρούντζο ή ορείχαλκο. Οι διαστάσεις του προσδιορίζονται έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη και να αντισταθμίζονται όλες οι αποκλίσεις λόγω συστολής που αναμένονται κατά τη χύτευση (στο καλούπι, στο κερί, στο υλικό επένδυσης, στο υλικό χύτευσης). Ο προσδιορισμός των διαστάσεων του

* Με την μέθοδο αυτή έχουν κατασκευασθεί λαμπρά έργα τέχνης, όπως ο “έφηβος των Αντικυθήρων”, ο “Ποσειδών του Αρτεμισίου”, ο “Ηνίοχος των Δελφών”, οι “ήρωες του Riace” κ.α. Τα δύο πρώτα από αυτά βρίσκονται στο Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο Αθηνών. Ως εισαγωγική αναφορά, βλέπε:

- T.K. Derry and T.I. Williams, *A short history of technology*, Dover, reprint 1993, p. 118.
- *Αρχαία Ελληνική Τεχνολογία*, κατάλογος έκθεσης, Τεχνόπολις 2002, σ. 45.

προτύπου απαιτεί προηγούμενη εκτεταμένη πειραματική εργασία και διαδικασίες δοκιμής-λάθους-δοκιμής, γεγονός που ανεβάζει υψηλά το κόστος κατασκευής του.

Από το κύριο πρότυπο κατασκευάζεται διαιρετό καλούπι (die), συνήθως από μαλακό μέταλλο (π.χ. Al), το οποίο είναι κοίλο και πρόκειται να πληρωθεί με κερί αναπαράγοντας ακριβώς το κύριο πρότυπο. Η χύτευση με επένδυση υλοποιείται με τη διαδοχή των ακόλουθων φάσεων, βλέπε Σχήμα 6.5.

Φάση 1: Στην αρχή αποχέεται μέσα στο καλούπι κερί (ή κάποιο θερμοπλαστικό υλικό – συνήθως πολυστυρένιο) υπό πίεση και λαμβάνεται τηκόμενο μοντέλο, πανομοιότυπο προς το κύριο πρότυπο. Μπορεί να ληφθεί οιοσδήποτε αριθμός κέρινων μοντέλων. Το τηκόμενο μοντέλο εκπλύεται με οινόπνευμα για την απομάκρυνση τυχόν λιπαρών ή ρυπαρών ουσιών.

Φάση 2: Μετά τον καθαρισμό, το κέρινο μοντέλο βυθίζεται σε πάστα που αποτελείται από σκόνη πυριτίου, νερό και συνδετικό υλικό. Στη συνέχεια, απομακρύνεται από την πάστα, περιστρέφεται κατάλληλα, ώστε να δημιουργηθεί ομοιόμορφη επικάλυψη, να καλυφθούν εσωτερικές διαβαθμίσεις (γωνίες) και να απομακρυνθεί τυχόν περίσσεια πάστας.

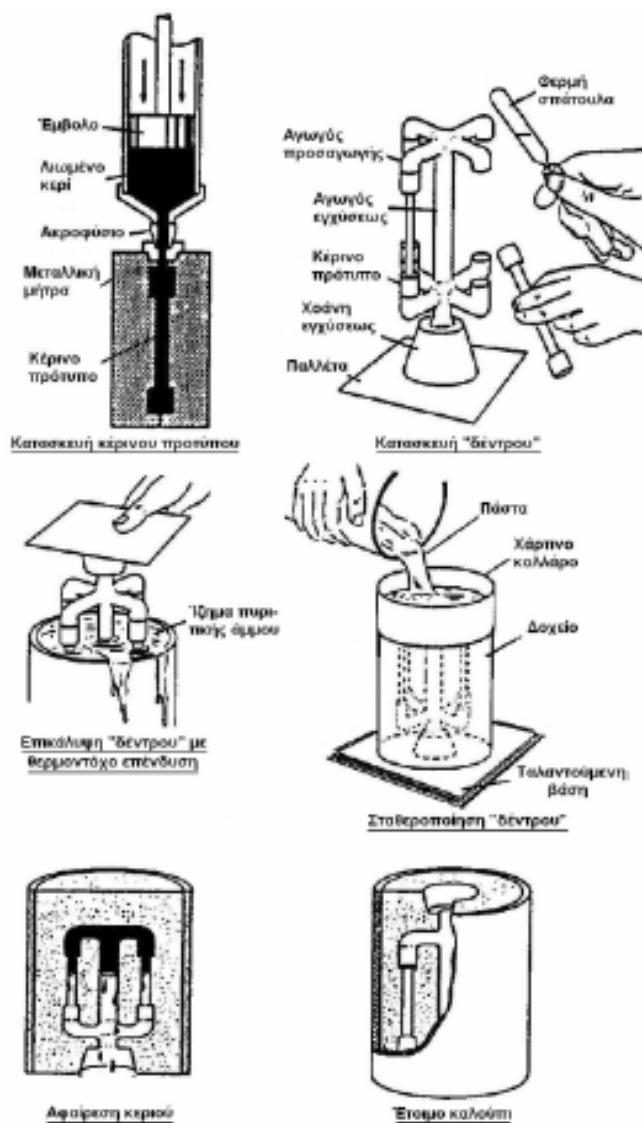
Φάση 3: Κατασκευή του συστήματος έγχυσης και προσαγωγής του μετάλλου χύτευσης και προσαρμογή επ’ αυτού του κέρινου μοντέλου (συνήθως περισσότερων μοντέλων υπό μορφή «δένδρου» για λόγους οικονομίας) με ζεστή σπάτουλα (για το τοπικό λιώσιμο του μοντέλου).

Φάση 4: Στη συνέχεια το σύστημα ψεκάζεται με λεπτόκοκκη πυριτική άμμο και μετά την ξήρανση σχηματίζεται επί του τηκόμενου μοντέλου πολύ λεπτή θερμοάντοχος επένδυση πάχους μερικών δεκάτων του mm.

Φάση 5: Το λαμβανόμενο σύστημα τοποθετείται με τη χοάνη εγχύσεως προς τα κάτω μέσα σε χαλύβδινο δοχείο, ανοικτό και από τα δύο άκρα και το όλο σύστημα στερεώνεται πάνω σε χαλύβδινη πλάκα με λιωμένο κερί. Στη συνέχεια το δοχείο γεμίζει με πάστα από αυτοσκληρυνόμενο θερμοάντοχο μίγμα, το οποίο στερεοποιείται και «δένει» μέσα σε 24 ώρες.

Φάση 6: Το προκύπτον σύνολο εισάγεται σε κλίβανο, όπου το κερί λιώνει και απομακρύνεται δια βαρύτητος, αφήνοντας το κατάλληλο αποτύπωμα (κοιλότητα) για το σχεδιαζόμενο χυτό. Τυχόν υπολειπόμενο κερί απομακρύνεται με πύρωση του λαμβανόμενου αποτυπώματος για 24 ώρες.

Φάση 7: Απόχυση του προς χύτευση τήγματος στο αποτύπωμα, το οποίο κρατείται σε υψηλή θερμοκρασία. Με τον τρόπο αυτό προστατεύεται το τήγμα από τους σχηματιζόμενους υδρατμούς και αποφεύγονται μεγάλες μεταβολές θερμοκρασίας μεταξύ τήγματος και τοιχωμάτων αποτυπώματος. Σε πολλές περιπτώσεις η έγχυση του τήγματος γίνεται εν κενώ ή σε αδρανές περιβάλλον (αέριο argon). Μετά τη στερεοποίηση του τήγματος, αφαιρείται το χαλύβδινο δοχείο και απομακρύνεται η περιβάλλουσα σκληρή θερμοάντοχος επένδυση με σφυρόκρουση ή τεχνητή πρόκληση κραδασμών. Το λαμβανόμενο χυτό καθαρίζεται από την υπολειπόμενη επικάλυψη με αμμοβολή ή χημική διεργασία καταβύθισης.



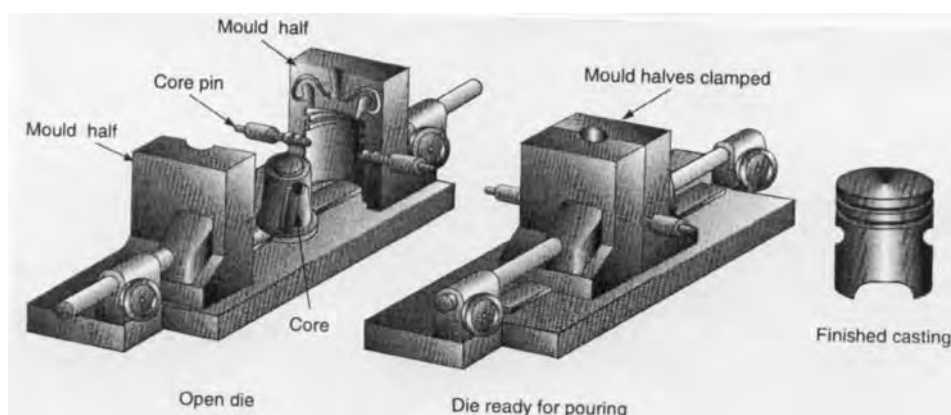
Σχήμα 6.5: Χύτευση με επένδυση ή με «λιωμένο κερί» (investment casting).
(προέλευση: Μανωλάκος, 2001)

Τα κύρια πλεονεκτήματα της χύτευσης με επένδυση έναντι των άλλων μεθόδων χύτευσης είναι:

- Προκύπτουν χυτά με άριστη ποιότητα επιφάνειας και απόλυτη διαστατική ακρίβεια (της τάξεως του ± 0.07 mm).
- Το παραγόμενο αποτύπωμα είναι μονοκόμματο, οπότε δεν απαιτείται σχεδιασμός της ευθείας διαχωρισμού (parting line).
- Αποφεύγεται η διαδικασία αφαίρεσης του προτύπου με τις γνωστές δυσκολίες.
- Επιτρέπει την κατασκευή χυτών πολύπλοκου σχήματος που δεν επιδέχονται άλλη μέθοδο χύτευσης.
- Αν και το κόστος της μεθόδου είναι αρκετά υψηλό, το τελικό όφελος που προκύπτει από την αποφυγή δευτερογενούς κατεργασίας επί του χυτού είναι σημαντικά μεγαλύτερο.

6.4.2 Μέθοδοι με χρήση μόνιμου τύπου (permanent mold casting)

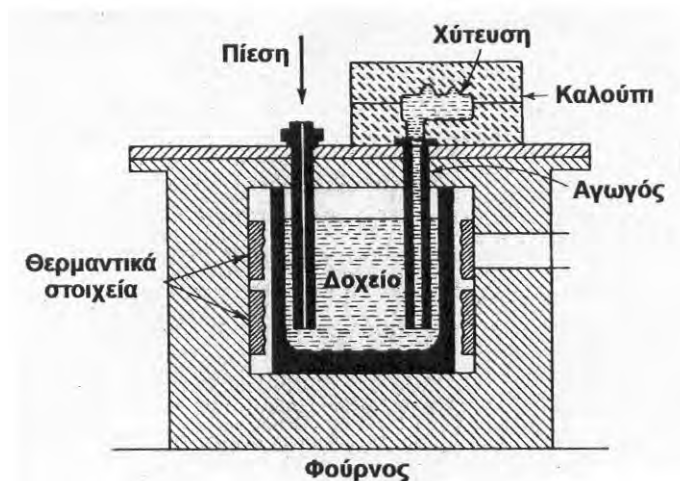
⇒ **Χύτευση σε μόνιμο (μεταλλικό) τύπο (gravity die-casting)**



Σχήμα 6.6: Χύτευση (με βαρύτητα) σε μόνιμο τύπο.
(προέλευση: Swift and Booker, 1997)

⇒ **Χύτευση υπό χαμηλή πίεση (low-pressure casting ή pouring pressure casting)**

Η χύτευση υπό χαμηλή πίεση διαφέρει από τη χύτευση με βαρύτητα στη διαδικασία εισόδου του τήγματος. Το τηγμένο μέταλλο βρίσκεται σε ειδικό δοχείο που θερμαίνεται συνεχώς και εξαναγκάζεται να εισέλθει στο καλούπι μέσω πίεσης, η οποία διατηρείται μέχρι τη στερεοποίηση του υλικού. Μόλις διακοπεί η πίεση, το προκύπτον χυτό απομακρύνεται, ενώ το παραμένον τήγμα στον αγωγό επιστρέφει στο δοχείο. Η αρχή της μεθόδου αυτής παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.7. Χρησιμοποιείται κυρίως για τη χύτευση κραμάτων αλουμινίου σε καλούπια από γύψο ή χυτοσίδηρο.



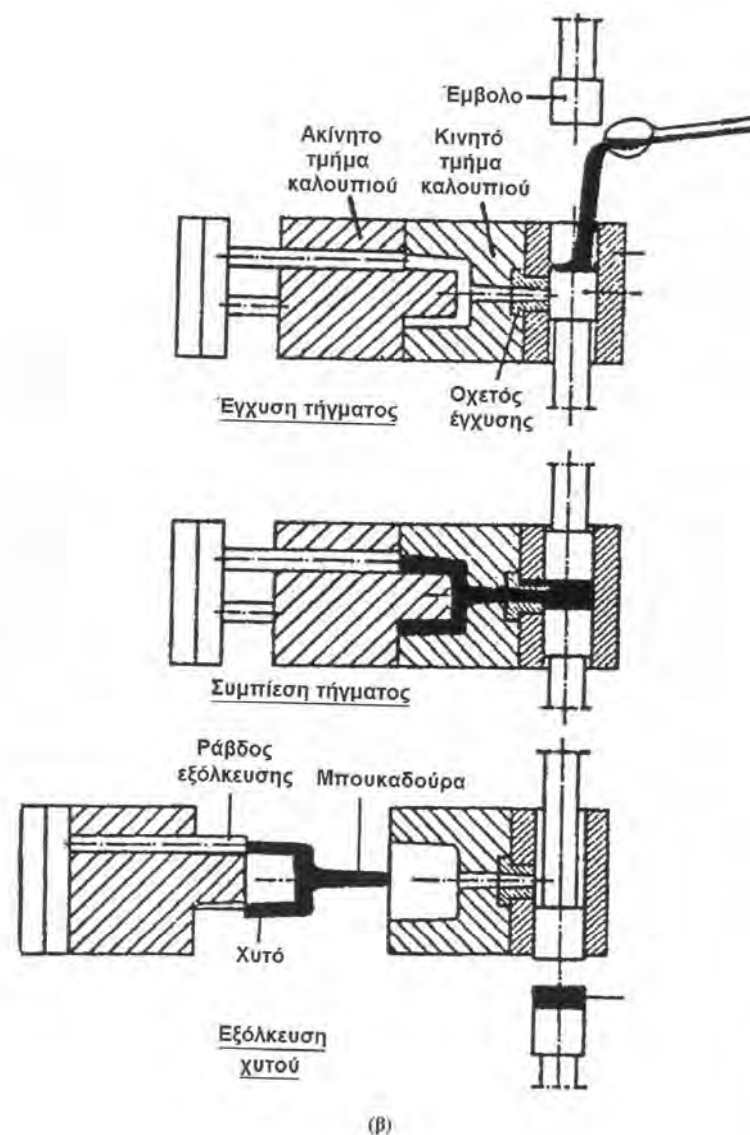
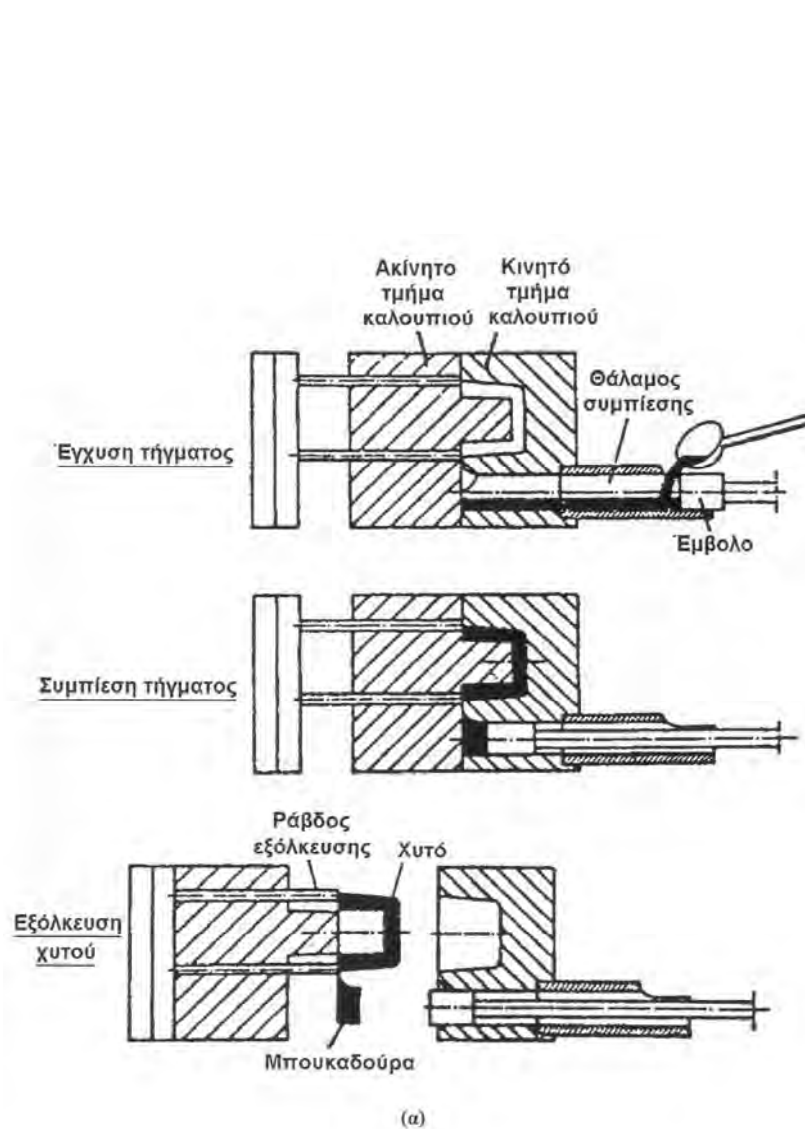
Σχήμα 6.7: Χύτευση υπό χαμηλή πίεση.

⇒ Χύτευση υπό πίεση (die-casting)

Το κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής είναι η διοχέτευση του τήγματος σε χαλύβδινο τύπο υπό υψηλή πίεση (0,7 – 700 MPa), όπου αυτό στερεοποιείται. Η αρχή της μεθόδου φαίνεται διαγραμματικά στα Σχήματα 6.7(α) και (β) ενώ, όπως προκύπτει από το ίδια σχήματα, ο κύκλος χύτευσης υπό πίεση περιλαμβάνει τρεις κύριες φάσεις:

1. Έγχυση του τήγματος στο θάλαμο συμπίεσης.
2. Συμπίεση του τήγματος μέσα στο καλούπι.
3. Άνοιγμα του καλουπιού και εξόλκευση του χυτού.

Ανάλογα με τη θέση και την κίνηση του εμβόλου συμπίεσης διακρίνουμε δύο τύπους χύτευσης υπό πίεση (και αντίστοιχες Ε/Μ-χυτόπρεσσες): Χύτευση υπό πίεση με οριζόντια κίνηση του εμβόλου, βλέπε Σχήμα 6.8(α) και χύτευση υπό πίεση με κατακόρυφη κίνηση του εμβόλου, βλέπε Σχήμα 6.8(β).



Σχήμα 6.8: Χύτευση υπό πίεση (die-casting) - (α) με οριζόντια κίνηση εμβόλου, (β) με κατακόρυφη κίνηση εμβόλου.
(προέλευση: Μανωλάκος, 2001)

Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι εργαλειομηχανές οι οποίες επιτελούν τη χύτευση υπό πίεση ονομάζονται χυτόπρεσσες. Είναι, γενικά, βαριές, πολύπλοκες και δαπανηρές κατασκευές. Αναπτύσσουν μεγάλες δυνάμεις εμβόλου και δέχονται έντονη θερμική καταπόνηση κατά τη διάρκεια της χύτευσης (η οποία συνήθως αντιμετωπίζεται με ιδιαίτερο σύστημα ψύξης). Τα δομικά μέρη μιας χυτόπρεσσας είναι τα ακόλουθα:

→ Βασικά μέρη

1. Το *τμήμα χύτευσης* (παραλαμβάνει και συμπιέζει το τήγμα).
2. Το τμήμα που *απαρτίζεται* από το *διμερές καλούπι* και τον *κύριο μηχανισμό κίνησης* (ρυθμίζει το άνοιγμα και κλείσιμο του καλουπιού).

→ Συμπληρωματικός εξοπλισμός

1. Ο *μηχανισμός εξόλκευσης* (ρυθμίζει την απομάκρυνση του χυτού από το καλούπι)
2. Η *κάμινος τήξης* του μετάλλου
3. Το συγκρότημα αντλιών, κυλίνδρων και συσσωρευτών
4. Το κύκλωμα πεπιεσμένου αέρα
5. Βοηθητικές συσκευές και αυτοματισμοί.

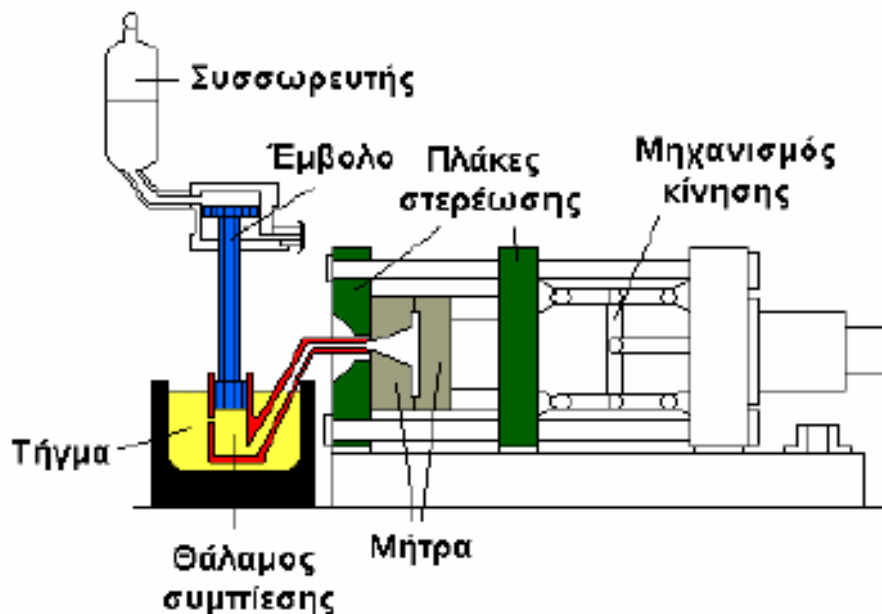
Τα γενικά χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι η μεγάλη ταχύτητα παραγωγής και η μεγάλη ακρίβεια διαστάσεων των χυτών καθώς και η δυνατότητα μαζικής παραγωγής. Ο κύριος περιορισμός για την επικράτηση της μεθόδου έναντι των συναφών κατεργασιών είναι το κόστος του απαιτούμενου εξοπλισμού και το οικονομικό μέγεθος της παραγωγής.

Διακρίνονται δύο βασικές κατηγορίες χύτευσης υπό πίεση και αντίστοιχες μηχανές χύτευσης (χυτόπρεσσες): Χύτευση θερμού θαλάμου συμπίεσης (hot chamber die casting) και χύτευση ψυχρού θαλάμου συμπίεσης (cold chamber die casting).

Στην πρώτη περίπτωση για έγχυση του ρευστού μετάλλου χρησιμοποιείται έμβολο ή πεπιεσμένος αέρας. Η κάμινος τήξης του μετάλλου είναι ενσωματωμένη στην Ε/Μ χύτευσης και ο χώρος υποδοχής και συμπίεσης είναι μόνιμα μέσα στο ρευστό μέταλλο. Το ρευστό μέταλλο διοχετεύεται σε μία μήτρα που βρίσκεται σε χαμηλή θερμοκρασία μέσω αγωγού με μορφή «λαιμού χήνας» (goozeneck). Το υλικό στερεοποιείται πολύ γρήγορα και το χυτό απομακρύνεται από τον τύπο. Η δυνατότητα αυτοματισμού της λειτουργίας μίας τέτοιας διάταξης είναι προφανής. Η αρχή της μεθόδου αυτής παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.9.

Συχνά ο τύπος ψύχεται με νερό και χρησιμοποιούνται διατάξεις εξόλκευσης για τη γρήγορη απομάκρυνση του χυτού από τον τύπο και συνεπώς για την αύξηση της παραγωγικής δυνατότητας. Η μέθοδος του «θερμού θαλάμου συμπίεσης» χρησιμοποιείται για τη χύτευση κραμάτων χαμηλού σημείου τήξης (κράματα Pb, Zn, Sn) που απαιτούν σχετικά χαμηλή πίεση

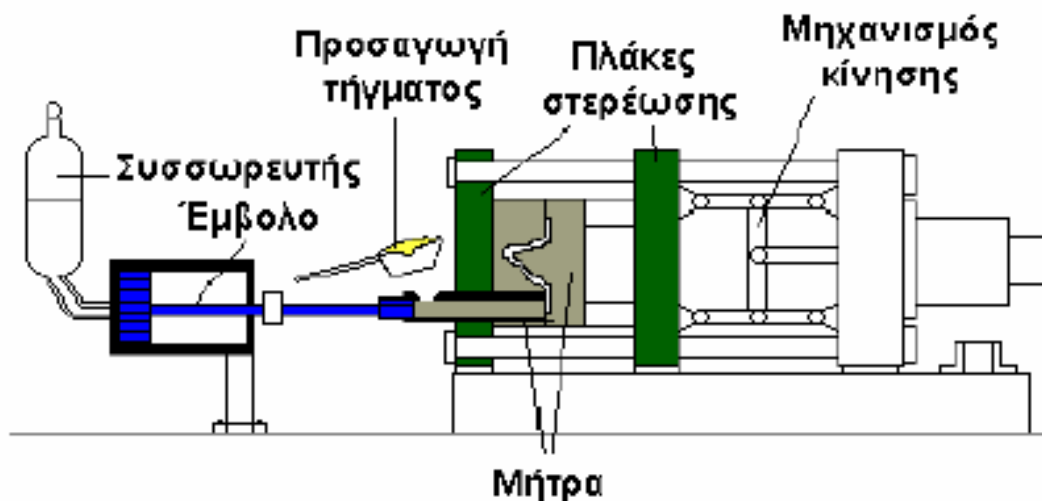
συμπίεσης, μέχρι 35 MPa. Σημειώνεται επίσης ότι στις χυτόπρεσες «θερμού θαλάμου» η κίνηση του εμβόλου συμπίεσης είναι συνήθως κατακόρυφη.



Σχήμα 6.9: Χύτευση υπό πίεση «θερμού θαλάμου» συμπίεσης.
(προέλευση: Μανωλάκος, 2001)

Στη μέθοδο «ψυχρού θαλάμου συμπίεσης» στην οποία το μέταλλο τήκεται και διατηρείται σε κατάλληλη θερμοκρασία σε ιδιαίτερη ανεξάρτητη κάμινο, χρησιμοποιούνται γενικά υψηλότερες πιέσεις, της τάξης συνήθως, 20-70 MPa, σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο. Η αρχή της χύτευσης ψυχρού θαλάμου φαίνεται στο Σχήμα 6.10. Το ρευστό μέταλλο μετά την τήξη του σε ιδιαίτερη κάμινο μεταφέρεται στη χυτόπρεσσα, όπου έμβολο ωθεί το μέταλλο μέσα στον τύπο που ψύχεται με νερό. Μετά την χύτευση το έμβολο υποχωρεί και το χυτό εξολκεύεται από τον τύπο. Η μέθοδος χαρακτηρίζεται από υψηλή παραγωγικότητα (είναι δυνατή ή παραγωγή περίπου 400 χυτών ανά ώρα). Εφαρμόζεται συνήθως σε υλικά υψηλότερου σημείου τήξης (κράματα Al, Mg, Cu), της τάξης των 600-1000 °C. Επισημαίνεται, ότι χυτοσίδηροι και χυτοχάλυβες σε ελάχιστες περιπτώσεις χυτεύονται υπό πίεση. Σημειώνεται επίσης ότι στις χυτόπρεσες «ψυχρού θαλάμου» η κίνηση του εμβόλου συμπίεσης είναι είτε κατακόρυφη είτε οριζόντια.

Τα κύρια πεδία εφαρμογών της χύτευσης υπό πίεση αναφέρονται στη βιομηχανία αυτοκινήτων (έμβολα, μπλοκ κυλίνδρων κ.λπ.), στον ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό, στη «λεπτομηχανουργική» (παιχνίδια, οπτικά και τυπογραφικά όργανα κ.λπ.) και στα εξαρτήματα ελέγχου και αυτοματισμού μηχανών.



Σχήμα 6.10: Χύτευση υπό πίεση «ψυχρού θαλάμου» συμπίεσης.
(προέλευση: Μανωλάκος, 2001)

6.4.3 Ειδικές μέθοδοι χύτευσης

⇒ Φυγοκεντρική χύτευση (*centrifugal casting*)

Στην περίπτωση αυτή το καλούπι περιστρέφεται ή περί κάθετο άξονα, -στην «κατακόρυφη φυγοκεντρική χύτευση», ή περί οριζόντιο άξονα, -στην «οριζόντια φυγοκεντρική χύτευση», ή και περί κεκλιμένο άξονα. Επιπλέον, το καλούπι συνήθως φέρει θερμομόντοχο επένδυση από πυρίμαχο υλικό. Σχηματική παράσταση της αρχής της μεθόδου δίδεται στο Σχήμα 6.11.

Το τήγμα αποχέεται μέσα στο καλούπι ενώ αυτό περιστρέφεται και κατανέμεται στα τοιχώματα του περιστρεφόμενου καλουπιού, ωθούμενο από την αναπτυσσόμενη κεντρομόλο δύναμη. Κατά τη στερεοποίηση οι ακαθαρσίες χαμηλής πυκνότητας συγκεντρώνονται στην εσωτερική επιφάνεια, πλησιέστερα προς τον άξονα περιστροφής, επειδή είναι ελαφρότερες από το μέταλλο. Κατά συνέπεια, μετά το πέρας της στερεοποίησης και την απομάκρυνση του χυτού από το καλούπι είναι δυνατόν να απομακρυνθούν εύκολα με μία κατεργασία αποπεράτωσης (κοπής).

Η φυγοκεντρική χύτευση εφαρμόζεται, συνήθως στις ακόλουθες παραλλαγές:

- *Τυπική φυγοκεντρική χύτευση:* Ο άξονας περιστροφής είναι οριζόντιος και το μήκος του καλουπιού μεγάλο. Τυπικά προϊόντα χύτευσης είναι σωλήνες μεγάλου μήκους, χωρίς ραφή.
- *Ημι-φυγοκεντρική χύτευση:* Αναφέρεται στη χύτευση αξονοσυμμετρικών χυτών μεγάλου πλάτους (με ακτίνες).
- *Φυγοκεντριζόμενη χύτευση:* Το καλούπι τοποθετείται έκκεντρα ως προς τον άξονα περιστροφής. Με τον τρόπο αυτό, το αποχεόμενο μέταλλο δέχεται μεγαλύτερη πίεση που το

διευκολύνει να καλύψει όλες τις κοιλότητες μέσα στο καλούπι. Με ρύθμιση της απόστασης του καλουπιού από τον άξονα περιστροφής επιφέρονται επιθυμητές μεταβολές στις ιδιότητες του χυτού.

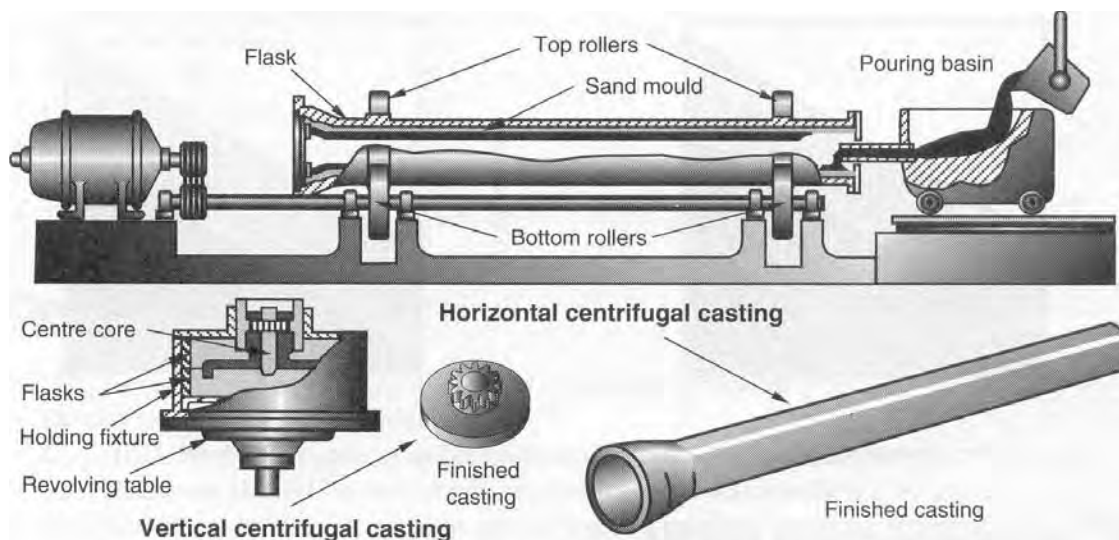
Η τυπική φυγοκεντρική και η ημι-φυγοκεντρική χύτευση χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αξονοσυμμετρικών κοίλων αντικειμένων. Τα τυπικά προϊόντα της φυγοκεντρικής χύτευσης περιλαμβάνουν τροχούς τρένων, δοχεία πίεσης, σωλήνες μεγάλου μήκους χωρίς ραφή, κυλίνδρους αεροπορικών κινητήρων, κοσμήματα κ.λπ. Η φυγοκεντρική χύτευση εφαρμόζεται συνήθως σε χάλυβες και κράματα Ni, Al και Cu.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα ακόλουθα:

- Ομοιομορφία ιδιοτήτων χυτού.
- Αποφυγή χρήσης οχετών και απομάκρυνσης μπουκαδούρων.
- Οι εξωτερικές διαστάσεις των χυτών δεν απαιτούν φινίρισμα.
- Το χρησιμοποιούμενο καλούπι δεν απαιτεί καθορισμό γραμμών διαχωρισμού.
- Οικονομία στη χρήση του υλικού με μικρή ποσότητα scrap.

Ως μειονεκτήματα αναφέρονται ότι:

- Απαιτείται ειδικός εξοπλισμός για τη φυγόκεντρη επιτάχυνση του καλουπιού.
- Η εσωτερική επιφάνεια του χυτού περιέχει ακαθαρσίες.



Σχήμα 6.11: Σχηματική παράσταση φυγοκεντρικής χύτευσης.
(προέλευση: Swift and Booker, 1997)

⇒ Συνεχής Χύτευση (Continuous casting)

6.5 Σχεδίαση εργαλείων/μητρών (die design)

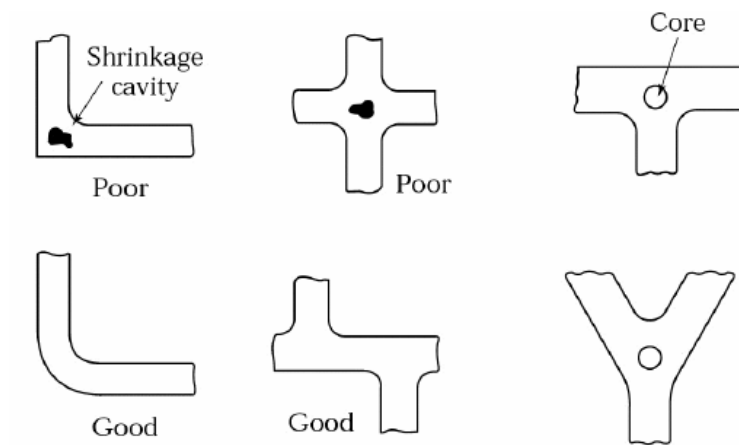
Η σχεδίαση και κατασκευή των εργαλείων της χύτευσης (καλούπια) είναι δύσκολη εργασία και απαιτεί πολλή μελέτη και πείρα. Πρέπει να αντιμετωπισθούν δύο βασικά προβλήματα: οι αναπτυσσόμενες μεγάλες πιέσεις και οι υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες λειτουργούν. Υπάρχουν ορισμένες βασικές κατευθυντήριες οδηγίες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Για να επιτευχθεί η απομάκρυνση του μοντέλου από ένα καλούπι, πρέπει να υπάρχει μία γωνιακή «χάρη», δηλαδή οι κάθετες πλευρές να έχουν μία κλίση μεταξύ $0,5^\circ$ - 2° . Κατ' αυτόν τον τρόπο ελαττώνεται ο κίνδυνος φθοράς του εργαλείου.

Παράγοντες που αφορούν τη ροϊκή και θερμοκρασιακή συμπεριφορά του υλικού κατά την έγχυση και στερεοποίηση πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη σχεδίαση των καλουπιών. Το μοντέλο πρέπει να έχει μεγαλύτερες διαστάσεις από το πραγματικό αντικείμενο ώστε να ληφθεί υπόψη η συστολή λόγω στερεοποίησης. Ευτηκτικά χυτά κράματα πρέπει να χρησιμοποιούνται για τη μείωση του μικροπορώδους και την αύξηση της ρευστότητας.

Όταν υπάρχει αλλαγή στη διατομή πρέπει να προβλέπονται μεγάλες ακτίνες καμπυλότητας στο μοντέλο για την αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων. Επίσης θα πρέπει να μην υπάρχουν απότομες μεταβολές παχών και να προβλέπονται νευρώσεις που δεν πρέπει να διακόπτονται απότομα.

Σχεδιαστικές λεπτομέρειες για τη σχεδιομελέτη μητρών και εργαλείων χύτευσης ώστε να αποφεύγονται τυπικά ελαττώματα δίδονται στο Σχήμα 6.13.



Σχήμα 6.13: Σχεδιαστικές λεπτομέρειες για την σχεδιομελέτη μητρών και εργαλείων χύτευσης. (προέλευση: προσαρμογή από Kalpakjian and Schmid, 2003)

Μια σύγκριση των διαφόρων μεθόδων χύτευσης ως προς τις τεχνικές δυνατότητες εφαρμογής (ελάχιστες επιτεύξιμες διαστάσεις, διαστατική ακρίβεια, τραχύτητα, πολυπλοκότητα σχήματος κ.λπ.) παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2: Σύγκριση των διαφόρων μεθόδων χύτευσης.
(προέλευση: Kalpakjian and Schmid, 2003)

	Sand	Shell	Evaporative pattern	Plaster	Investment	Permanent mold	Die	Centrifugal
Typical materials cast	All	All	All	Nonferrous (Al, Mg, Zn, Cu)	All	All	Nonferrous (Al, Mg, Zn, Cu)	All
Weight (kg): minimum maximum	0.01 No limit	0.01 100+	0.01 100+	0.01 50+	0.001 100+	0.1 300	<0.01 50	0.01 5000+
Typ. surface finish ($\mu m R_a$)	5-25	1-3	5-25	1-2	0.3-2	2-6	1-2	2-10
Porosity ¹	3-5	4-5	3-5	4-5	5	2-3	1-3	1-2
Shape complexity ¹	1-2	2-3	1-2	1-2	1	2-3	3-4	3-4
Dimensional accuracy ¹	3	2	3	2	1	1	1	3
Section thickness (mm): minimum maximum	3 No limit	2 -	2 -	1 -	1 75	2 50	0.5 12	2 100
Typ. dimensional tolerance (mm/mm)	1.6-4 mm (0.25 mm for small)	±0.003		±0.005-0.010	±0.005	±0.015	±0.001-0.005	0.015
Cost ^{1,2}								
Equipment	3-5	3	2-3	3-5	3-5	2	1	1
Pattern/die	3-5	2-3	2-3	3-5	2-3	2	1	1
Labor	1-3	3	3	1-2	1-2	3	5	5
Typical lead time ^{2,3}	Days	Weeks	Weeks	Days	Weeks	Weeks	Weeks-months	Months
Typical production rate ^{2,3} (parts/mold-hour)	1-20	5-50	1-20	1-10	1-1000	5-50	2-200	1-1000
Minimum quantity ^{2,3}	1	100	500	10	10	1000	10,000	10-10,000

Notes: 1. Relative rating, 1 best, 5 worst. For example, die casting has relatively low porosity, mid- to low shape complexity, high dimensional accuracy, high equipment and die costs and low labor costs. These ratings are only general; significant variations can occur depending on the manufacturing methods used.

2. Data taken from Schey, J.A., Introduction to Manufacturing Processes, 3rd ed, 2000.

3. Approximate values without the use of rapid prototyping technologies.

6.6 Μηχανισμός στερεοποίησης χυτών*

Γενικά, δεν υπάρχει ένας μοναδικός, τυπικός μηχανισμός στερεοποίησης των χυτών και υπενθυμίζεται ότι τα καθαρά μέταλλα και τα κράματα ακολουθούν διαφορετικούς νόμους πήξης. Τα καθαρά μέταλλα στερεοποιούνται σε καθορισμένη θερμοκρασία, ενώ τα κράματα σε μια περιοχή θερμοκρασιών που ξεκινά από τη γραμμή liquidus και τελειώνει στη γραμμή solidus, του διαγράμματος θερμικής ισορροπίας του κράματος.

Κατά την χύτευση, έχει διαπιστωθεί ότι ο χρόνος πήξης, που έχει άμεση σχέση με το ρυθμό απόψυξης και κατά συνέπεια με την αποκτούμενη κρυσταλλική δομή του χυτού, περιγράφεται από τη σχέση Chvorinov:

$$T = K (V / A)^2 \quad (6.4)$$

* Επισημαίνεται, με έμφαση, ότι για το εδάφιο αυτό ιδιαίτερα αλλά και για όλη την διαπραγμάτευση της χύτευσης είναι απαραίτητη προαπαιτήση η γνώση της δομής των μετάλλων και κραμάτων και τα διαγράμματα φάσεων, δηλαδή απαιτείται η προηγούμενη διδασκαλία ενός τυπικού μαθήματος «τεχνολογίας υλικών». Η παρουσίαση περιορίζεται σε μια «ελάχιστη περιγραφή».

όπου:

K: σταθερά

V: ο όγκος του στερεοποιούμενου ρευστού μετάλλου

A: η διεπιφάνεια μεταξύ ρευστού μετάλλου και τύπου

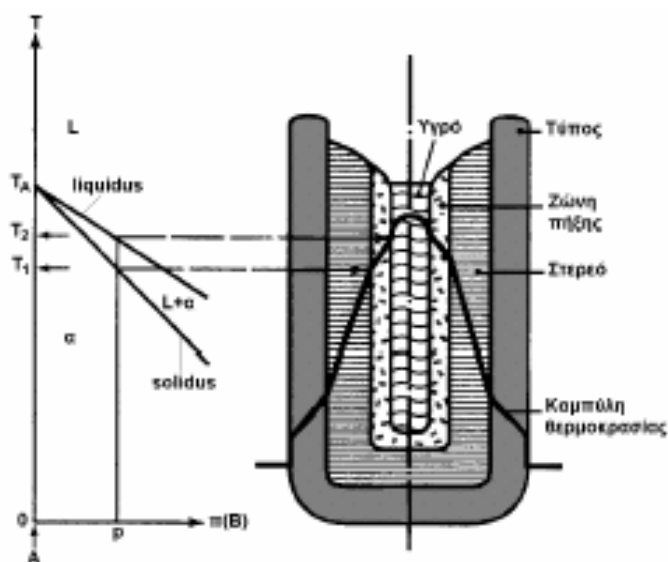
Όταν εγχύεται τήγμα μετάλλου μέσα σε τύπο, η στερεοποίηση ξεκινά από τα τοιχώματα του τύπου που βρίσκονται σε χαμηλή θερμοκρασία. Η απόψυξη συνεχίζεται με ροή της θερμότητας δια μέσου του υπό πήξη πλινθώματος προς τα εξωτερικά τοιχώματα του και δια των τοιχωμάτων του τύπου προς το περιβάλλον.

Οι θερμικές συνθήκες της πήξης και της απόψυξης του μετάλλου εξαρτώνται από τους ακόλουθους, κυρίως, παράγοντες:

- Τη φύση του κράματος, τις θερμικές σταθερές του (θερμότητα , θερμική διαπερατότητα, λανθάνουσα θερμότητα πήξης) και τυχόν εκλυόμενη θερμότητα κατά τους διάφορους μετασχηματισμούς του.
- Τη θερμοκρασία του κράματος και την ταχύτητα πλήρωσης του τύπου.
- Τη φύση του τύπου (υλικό, ειδική θερμότητα, θερμική διαπερατότητα).
- Την αρχική θερμοκρασία του τύπου και τον τρόπο απόψυξης του (ελεύθερα στο περιβάλλον ή με κυκλοφορία ψυκτικού μέσου μέσω των τοιχωμάτων του).
- Τα γεωμετρικά στοιχεία του τύπου (πάχος τοιχωμάτων και σχήμα).
- Τον όγκο του πλινθώματος και τη σχέση όγκος πλινθώματος / όγκος ύλης του τύπου.
- Την τυχόν χρήση επαλείψεων στην εσωτερική επιφάνεια του τύπου για την εξασφάλιση καλής ποιότητας επιφάνειας πλινθώματος.

Σε μια ενδιάμεση χρονική στιγμή της στερεοποίησης συνυπάρχουν μέσα στον τύπο, βλέπε Σχήμα 6.14:

- Η *στερεά φάση* που ξεκινά από τα τοιχώματα του τύπου και επεκτείνεται προς το εσωτερικό του.
- Η *υγρή φάση* που εντοπίζεται στο κεντρικό τμήμα του τύπου και συνεχώς συρρικνώνεται σε όφελος της στερεάς φάσης.
- Η *ζώνη πήξης* που προχωρεί από έξω προς τα μέσα και στην οποία συνυπάρχουν η υγρή και η στερεά φάση. Η εξωτερική της επιφάνεια έχει τη θερμοκρασία του τέλους πήξης T_2 και η εσωτερική της επιφάνεια τη θερμοκρασία αρχής πήξης T_1 , το δε πάχος της είναι αύξουσα συνάρτηση του *θερμοκρασιακού εύρους πήξης*, $(T_1 - T_2)$.



Σχήμα 6.14: Χαρακτηριστικές φάσεις κατά τη στερεοποίηση τήγματος.
(προέλευση: Κονοφάνος, 1973)

Τα φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την πήξη ενός τήγματος και αναλύονται στη συνέχεια είναι η *συστολή όγκου (shrinkage)*, η *διακρυστάλλωση (transcrystallization)* και ο *χημικός διαφορισμός (segragation)* στη μάζα του χυτού.

Μηχανισμός στερεοποίησης: Παρατηρούμενα φαινόμενα

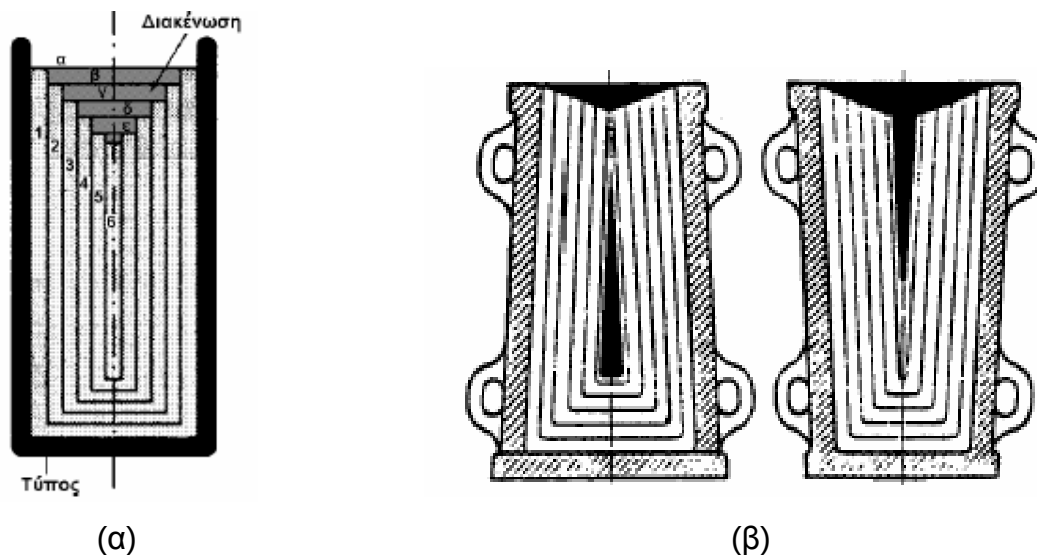
Το κύριο φαινόμενο που παρατηρείται κατά την πήξη ενός μετάλλου είναι η υποχώρηση του όγκου του λόγω συστολής. Η συστολή αυτή εκδηλώνεται και στις τρεις περιόδους απόψυξης και στερεοποίησης δηλ. κατά την υγρή κατάσταση (τήγμα), κατά την πήξη και στην στερεά κατάσταση και γίνεται η αιτία για την εμφάνιση πολλών ελαττωμάτων των χυτών αντικειμένων.

α) Υποχώρηση λόγω συστολής κατά την πήξη:

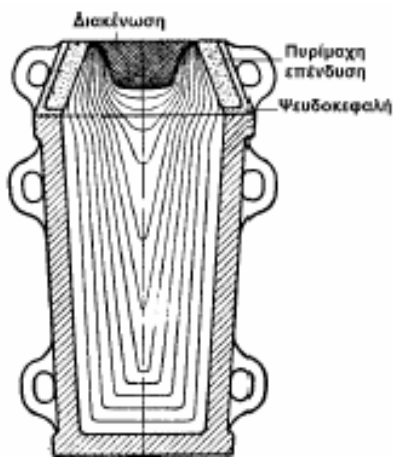
Διακενώσεις (ripping): Πρόκειται για κοιλότητες κωνικής μορφής λόγω της ανισόθερμης (ανομοιόμορφης) πήξης κατά συνεχείς στρώσεις από τα έξω προς τα μέσα, βλέπε Σχήμα 6.15(α). Η θέση, η μορφή και η έκταση των διακενώσεων εξαρτάται από την μορφή του καλουπιού και το ρυθμό απόψυξης του χυτού, βλέπε Σχήμα 6.15(β).

Στα χυτά η διακένωση σχηματίζεται εκεί που το υγρό στερεοποιείται τελευταίο, κατά κανόνα στο εσωτερικό του χυτού και κατά συνέπεια δεν είναι ορατή. Αποτελεί *ελάττωμα* για το πλίνθωμα και πρέπει να αφαιρείται. Για τη διόρθωση της διακένωσης γίνεται χρήση *ψευδοκεφαλής (hot top, sinkhead)*, με σκοπό αυτή να περιοριστεί μέσα στην ψευδοκεφαλή και να αφαιρεθεί μετά μ' αυτήν αποδίδοντας υγιές πλίνθωμα, βλέπε Σχήμα 6.16. Πολλές φορές, για

να μειωθούν οι διαστάσεις της ψευδοκεφαλής αυτή κατασκευάζεται με εσωτερική μονωτική επένδυση που συντηρεί το μέταλλο στο στόμιο της υγρό (θερμή ψευδοκεφαλή).

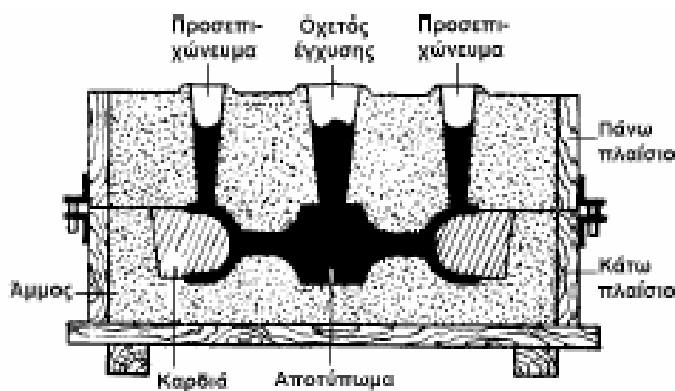


Σχήμα 6.15: (α) Σχηματισμός διακένωσης,
(β) Επίδραση της γεωμετρίας του τύπου στο σχηματισμό διακένωσης.
(προέλευση: Κονοφάγος, 1973)

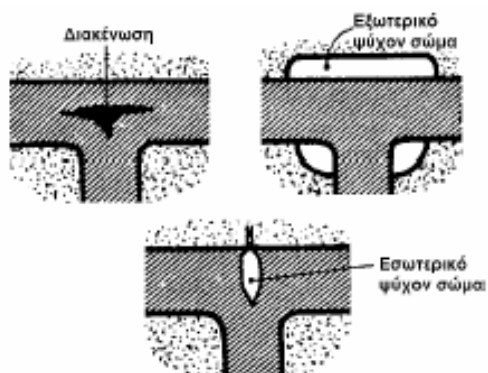


Σχήμα 6.16: Εφαρμογή και λειτουργία ψευδοκεφαλής.
(προέλευση: Κονοφάγος, 1973)

Για την αποφυγή των διακενώσεων και άλλων συναφών ελαττωμάτων στη χύτευση χρησιμοποιούνται επίσης *προσεπιχωνεύματα* (feeder head, riser) και *ψύχοντα σώματα* (chills). Τα προσεπιχωνεύματα εξασφαλίζουν τη συνεχή τροφοδοσία με τήγμα της σχηματιζόμενης - λόγω της στερεοποίησης - κοιλότητας, βλέπε Σχήμα 6.17. Τα ψύχοντα σώματα τοποθετούνται εξωτερικά (στις ογκωδέστερες περιοχές του χυτού) ή εσωτερικά (παραμένουν μέσα στο χυτό) με σκοπό την επίτευξη σύγχρονης πήξης σ' όλη τη μάζα του, βλέπε Σχήμα 6.18.



Σχήμα 6.17: Εφαρμογή προσεπιχωνεύματος.
(προέλευση: Μανωλάκος, 2002)



Σχήμα 6.18: Εφαρμογή «ψύχοντος σώματος».
(προέλευση: Μανωλάκος, 2002)

Μικροδιακενώσεις (micropiping): Είναι κενά που εμφανίζονται στα όρια στερεοποιηθέντων κρυσταλλιτών. Οφείλονται στον ασυνεχή εγκλωβισμό και την συνακόλουθη στερεοποίηση υγρού τμήματος μέσα στους σχηματιζόμενους κρυσταλλίτες. Οι μικροδιακενώσεις παρατηρούνται συνήθως όταν το θερμοκρασιακό εύρος τήξης είναι μεγάλο και το πάχος της ζώνης πήξης είναι σημαντικό. Όταν επακολουθεί μηχανική κατεργασία και πλαστική παραμόρφωση, οι μικροδιακενώσεις συγκολλούνται αυτόματα (εν ψυχρώ) και εξαφανίζονται. Άρα, δεν αποτελούν σοβαρό ελάττωμα και δεν απαιτείται ιδιαίτερος λόγος πρόληψης τους.

β) Υποχώρηση λόγω συστολής στην στερεά κατάσταση.

Η συστολή όγκου (μεταβολή διαστάσεων) στη στερεά φάση είναι επίσης σημαντική και εξαρτάται από τον συντελεστή θερμικής διαστολής του μετάλλου. Άλλη επίδραση οφειλόμενη στην ανομοιομορφία του ρυθμού απόψυξης του στερεού μετάλλου είναι η ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων στο αντικείμενο που αποτελούν εστία ανάπτυξης ρηγματώσεων. Οι τάσεις

αυτές είναι ανάλογες προς το μέτρο ελαστικότητας, τον συντελεστή διαστολής και την διαφορά θερμοκρασίας του μετάλλου, είναι δε ανεξάρτητες από τις διαστάσεις του τεμαχίου.

Ρωγμές λόγω εσωτερικών τάσεων που εμφανίζονται κάτω από την γραμμή solidus αλλά κατά την διάπυρη κατάσταση του μετάλλου ονομάζονται θερμές, ενώ οι δημιουργούμενες λόγω διαφορών συστολής μετά την πλήρη απόψυξη χαρακτηρίζονται ως ψυχρές ρωγμές.

γ) Διακρυστάλλωση

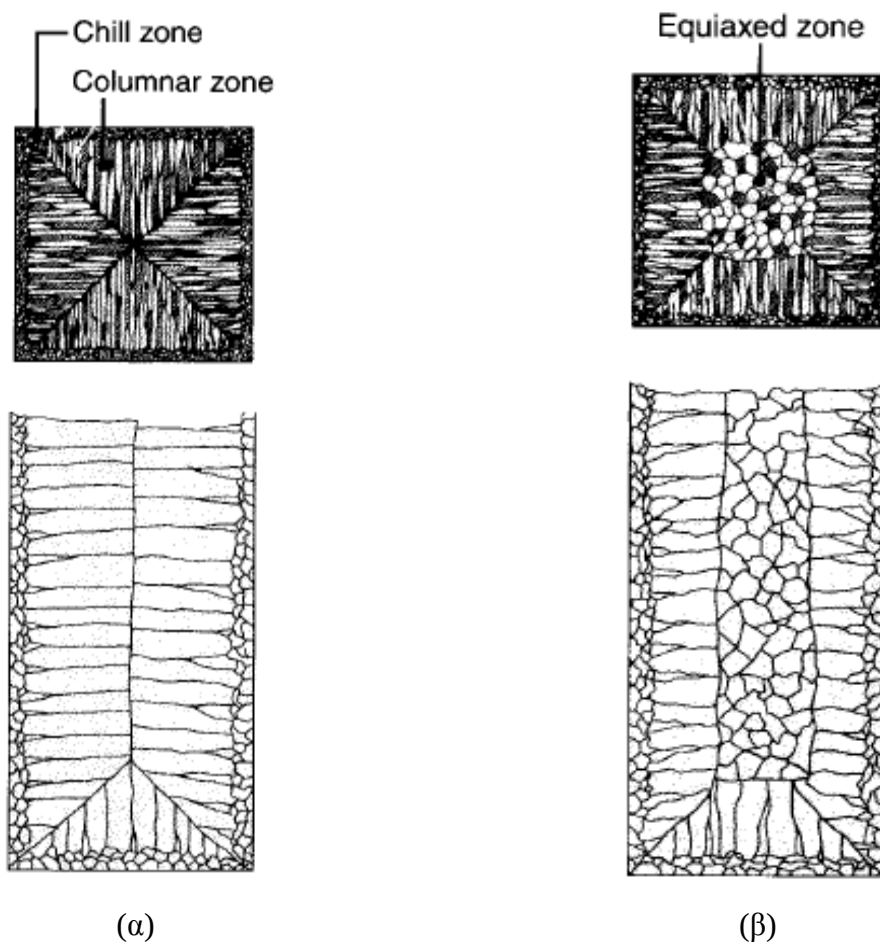
Με τον όρο διακρυστάλλωση περιγράφεται ο τρόπος κρυστάλλωσης ενός χυτού. Λόγω της απότομης ψύξης που συμβαίνει στην επιφάνεια επαφής του τήγματος με τα τοιχώματα του τύπου, σχηματίζεται στη διεπιφάνεια μια πολύ λεπτή ζώνη από πολυκρυσταλλικό λεπτόκοκκο μέταλλο που ονομάζεται *μικροκρυσταλλική* ή *ψυχρή ζώνη (chill zone)*. Το μικρό πάχος της ζώνης αυτής οφείλεται στην υψηλή υπόψυξη που εμφανίζει το τήγμα σ' αυτή, φαινόμενο που είναι η αιτία ώστε οι σχηματιζόμενοι πυρήνες κρυστάλλωσης να είναι πολυπληθείς, με αποτέλεσμα η ανάπτυξη των κόκκων να είναι ανταγωνιστική και να τερματίζεται πολύ γρήγορα.

Οι αναπτυσσόμενοι κρύσταλλοι είναι ισοαξονικοί, μικρού μεγέθους και τυχαίου προσανατολισμού. Μετά το σχηματισμό της μικροκρυσταλλικής ζώνης, η πήξη συνεχίζεται μέσα στη μάζα του μετάλλου με τη ζώνη πήξης να προχωρεί, συναρτήσει του χρόνου, από έξω προς τα μέσα. Μέσα στη ζώνη αυτή η υπόψυξη είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη της μικροκρυσταλλικής, με αποτέλεσμα οι δημιουργούμενοι πυρήνες κρυστάλλωσης να είναι ολιγάριθμοι. Σε κάθε θέση πυρήνωσης αναπτύσσεται εξόγκωμα που εξελίσσεται σε δενδρίτη.

Με την πρόοδο της στερεοποίησης αναπτύσσονται ευμεγέθεις δενδριτικοί κρυσταλλίτες, οι οποίοι λόγω της σύγχρονης μετακίνησης της ζώνης προς τα μέσα λαμβάνουν επιμήκη μορφή, κάθετη προς τις παρειές του τύπου. Η πλευρική ανάπτυξη των δενδριτικών κρυστάλλων σταματά όταν συναντηθούν με γειτονικά αναπτυσσόμενους κρυσταλλίτες. Μετά τη στερεοποίηση το χυτό αποκτά χαρακτηριστικό *ιστό*, η δε προκύπτουσα ζώνη ονομάζεται *βασαλτική* ή *κιονοειδής ζώνη (columnar zone)*.

Εάν το πάχος του πλινθώματος είναι μικρό, η βασαλτική ζώνη αναπτύσσεται μέχρι το κέντρο του, βλέπε Σχήμα 6.19(α). Εάν όμως το πάχος του πλινθώματος είναι σχετικά μεγάλο, κατά το τέλος της πήξης εμφανίζεται ένας διαφορετικός τρόπος κρυστάλλωσης, με βάση ένα μηχανισμό πολλαπλασιασμού των κρυστάλλων, στο κέντρο του πλινθώματος. Τότε οι κόκκοι είναι περίπου ισομεγέθεις κυτταροειδείς, χωρίς μικρογραφική μορφή ιστού (ισοαξονικοί). Η κεντρική αυτή περιοχή ονομάζεται *ισοαξονική ζώνη (equiaxed zone)*, βλέπε Σχήμα 6.19(β).

Σημειώνεται ότι σε πολλά βιομηχανικά κράματα είναι δυνατόν να απουσιάζει μία από τις τρεις αυτές ζώνες. Στους ανοξείδωτους χάλυβες η δομή είναι συνήθως κιονοειδής ενώ στους χαμηλά κραματωμένους χάλυβες εμφανίζονται και οι τρεις ζώνες.



Σχήμα 6.19: Τυπικές μορφές διακρυστάλλωσης χυτού – (α) ανάπτυξη δύο ζωνών, (β) ανάπτυξη τριών ζωνών. (προέλευση: προσαρμογή από *Kalpakjian and Schmid, 2003*)

δ) διαφορισμός

Γενικά, διαφορισμός (segregation) είναι η χημική ανομοιογένεια που εντοπίζεται στο χυτό από κάποιο κράμα. Όταν αναφέρεται στην κλίμακα κόκκου, πρόκειται για τον *μικροδιαφορισμό* που οφείλεται στη ταχεία πήξη του κράματος και μπορεί να εξαλειφθεί με ανόπτηση προς ομογενοποίηση. Εάν αναφέρεται σ' όλη την έκταση του χυτού, πρόκειται για *μακροδιαφορισμό*. Ο μακροδιαφορισμός ευνοείται από την βραδεία απόψυξη και συντελεί στην μεγαλύτερη συγκέντρωση των συνοδών στοιχείων ή των προσμίξεων στο κέντρο του τεμαχίου. Δεν εξαφανίζεται με θερμική κατεργασία του χυτού.

6.7 Ελαττώματα χυτών αντικειμένων.

Τα συνήθη ελαττώματα που εμφανίζονται στα χυτά αντικείμενα μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

→ *Ελαττώματα χημικής φύσεως*: Οφείλονται στον μακροδιαφορισμό και αφορούν:

α) χημική ανομοιογένεια των κανονικών συστατικών του χυτού στα διάφορα σημεία του που συνεπάγεται διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες με αποτέλεσμα αιφνίδιες θραύσεις.

β) διαφορισμό των ακαθαρσιών που δρουν σαν κέντρα κρυστάλλωσης με συνεπακόλουθο την δυσμενή επίδραση στις φυσικές ιδιότητες του χυτού.

→ *Φυσικά ελαττώματα*: Εδώ κατατάσσονται οι διακενώσεις και οι μικροδιακενώσεις

→ *Τυχαία ελαττώματα*: Είναι ασυνέχειες που οφείλονται στην συστολή του χυτού κατά την απόψυξη και παρουσιάζονται, είτε σαν σχισμές παράλληλες προς την επιφάνεια ή σαν κάθετες ρηγματώσεις στο εσωτερικό του χυτού.

→ *Ελαττώματα οφειλόμενα στον χρόνο χύτευσης*:

- Σπήλαια: είναι μεγάλες φυσαλίδες που οφείλονται στην ατελή έξοδο των αερίων, τα οποία παραμένουν μέσα στο υγρό μέταλλο καταστρέφοντας το αποτύπωμα.
- Φυσαλίδες: προέρχονται από τα αέρια του τήγματος ή την υγρασία της άμμου χύτευσης που δεν κατόρθωσαν να διαφύγουν Παρατηρούνται κυρίως στην επιφάνεια των χυτών αντικειμένων.
- Ρήγματα: οφείλονται στην ανώμαλη συστολή και την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων.
- Ασυνέχειες: προέρχονται από στιγμιαίες διακοπές εκχύσεως του μετάλλου.
- Ψυχρές σταγόνες: Προκύπτουν λόγω απόψυξης στερεοποίησης και οξείδωσης σταγόνων μετάλλου κατά την εκτίναξή τους μέσα στο αποτύπωμα.
- Διογκώσεις: εμφανίζονται εκεί όπου το αποτύπωμα δεν είναι ικανοποιητικά συμπιεσμένο.
- Παραμορφώσεις: εμφανίζονται λόγω κακής τοποθέτησης του καλουπιού ή πολυπλοκότητας της μορφής του αντικειμένου.

Δεδομένου, ότι συχνά, το ίδιο ελάττωμα περιγράφεται στην έγκυρη τεχνική βιβλιογραφία με διαφορετικό όνομα, έχει αναπτυχθεί από την “International Committee of Foundry Technical Associations” ένα τυποποιημένο σύστημα ταυτοποίησης και ονοματολογίας των ελαττωμάτων χύτευσης που τα κατατάσσει σε 7 κύριες κατηγορίες: metallic projections, cavities, discontinuities, defective surface, incomplete casting, incorrect dimensions or shape inclusions, βλέπε ενδεικτικά *Kalpakjian and Schmid, 2003*.

6.8 Οικονομικά της χύτευσης.

Από την ανασκόπηση των μεθόδων χύτευσης που προηγήθηκε προκύπτει με σαφήνεια ότι ορισμένες απαιτούν περισσότερο ένταση εργασίας, ενώ άλλες απαιτούν υψηλούς κόστους εξοπλισμό και κατασκευή μητρών και εργαλείων ή είναι χρονοβόρες. Ο Πίνακας 6.2, συνοψίζει τα στοιχεία αυτά κάθε ένα από τα οποία έχει επιπτώσεις σε έναν μεγαλύτερο ή το μικρότερο βαθμό στο ολικό κόστος μιας κατεργασίας χύτευσης. Όπως θα συζητηθεί λεπτομερέστερα σε επόμενο κεφάλαιο, το συνολικό κόστος ενός προϊόντος περιλαμβάνει τα κόστη υλικών (cost of materials), εργασίας (labor cost), εργαλείων (tooling cost) και εξοπλισμού (equipment cost). Τα προκαταρκτικά στάδια της χύτευσης περιλαμβάνουν την παραγωγή μοντέλων και καλουπιών, διαδικασία που απαιτεί πρώτες ύλες, χρόνο και τεχνική δεξιότητα στοιχεία που αναπόφευκτα συμβάλλουν στο κόστος. Αυτό το κόστος προετοιμασίας είναι σχετικά χαμηλό για τη χύτευση σε άμμο αλλά ιδιαίτερα υψηλό για χύτευση υπό πίεση (die-casting). Επιπρόσθετα σε κάθε περίπτωση χύτευσης απαιτούνται οι εγκαταστάσεις και εξοπλισμός για την τήξη και την έγχυση του λειωμένου μετάλλου στα καλούπια.. Το κόστος αυτού του εξοπλισμού εξαρτάται, γενικά, από το μέγεθός του και το επιθυμητό επίπεδο αυτοματοποίησης. Τέλος, ο καθαρισμός, η αποπεράτωση και η επιθεώρηση των χυτών συνεισφέρουν μια επιπλέον δαπάνη.

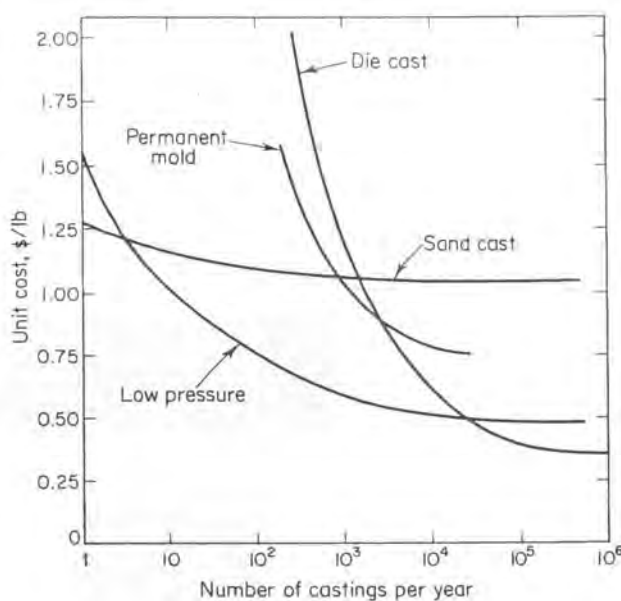
Το κόστος εργασίας που απαιτείται για την χύτευση ποικίλει σημαντικά εξαρτώμενο από την εφαρμοζόμενη τεχνική και το επίπεδο αυτοματοποίησης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η χύτευση με επένδυση απαιτεί ένταση εργασίας, λόγω του μεγάλου αριθμού βημάτων που υπεισέρχονται στην διαδικασία, ενώ αντίθετα αυτοματοποιημένες διαδικασίες (π.χ. χύτευση υπό πίεση) επιτυγχάνουν μεγάλους όγκους παραγωγής με χαμηλή απασχόληση. Ο Πίνακας 6.3 παρέχει συγκριτικά στοιχεία για τις διάφορες παραμέτρους κόστους των τεχνικών χύτευσης.

Πίνακας 6.3: Σύγκριση παραμέτρων κόστους των διαφόρων μεθόδων χύτευσης.
(προέλευση: Kalpakjian and Schmid, 2003)

Process	Cost*			Production rate (Pc/hr)
	Die	Equipment	Labor	
Sand	L	L	L-M	<20
Shell-mold	L-M	M-H	L-M	<50
Plaster	L-M	M	M-H	<10
Investment	M-H	L-M	H	<1000
Permanent mold	M	M	L-M	<60
Die	H	H	L-M	<200
Centrifugal	M	H	L-M	<50

* L, low; M, medium; H, high.

Γενικά, το κόστος του εξοπλισμού ανά παραγόμενο αντικείμενο (μοναδιαίο κόστος), μειώνεται με τον όγκο παραγωγής. Στην περίπτωση μεγάλης παρτίδας παραγωγής σε χύτευση υπό πίεση, το υψηλό αρχικό κόστος αποσβεννύεται ευχερώς. Αντίθετα εάν η ζήτηση (μέγεθος παραγωγής) είναι σχετικά μικρή, το μοναδιαίο κόστος αυξάνεται περίπου εκθετικά.. Σε τέτοια περίπτωση η χύτευση σε άμμο μπορεί να επιλεγεί ως η βέλτιστη, οικονομικά, κατεργασία. Το Σχήμα 6.20 παρουσιάζει, ποιοτικά, το μοναδιαίο κόστος για κάποιες από τις διαδεδομένες τεχνικές χύτευσης. Πρέπει να επισημανθεί όμως ότι οι τεχνικές χύτευσης που συγκρίνονται στο Σχήμα 6.20 χαρακτηρίζονται από διαφορετικές δυνατότητες σε σχέση με την διαστατική ακρίβεια ή/και την προκύπτουσα επιφανειακή τραχύτητα. Στην πραγματικότητα, για έναν μεγάλο αριθμό μηχανολογικών εξαρτημάτων η παραγωγή είναι επιτεύξιμη με περισσότερες από μια ή δύο τεχνικές χύτευσης. Η τελική απόφαση είναι προφανώς η συνισταμένη ενός πλήθους τεχνολογικών και οικονομικών παραμέτρων που απαιτούν πλήρη οικονομοτεχνική μελέτη.



Σχήμα 6.19: Μοναδιαίο κόστος μεθόδων χύτευσης⁺.
(προέλευση: Doyle et al., 1985)

⁺ Στο Σχήμα αυτό ο όρος “permanent mold” χρησιμοποιείται ως ισοδύναμος του “gravity die casting” ενώ ο όρος “die cast” αναφέρεται στη χύτευση υπό πίεση (βλέπε και υποενότητα 6.4.2).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αντωνιάδης, Α. και Πανταζόπουλος, Γ., *Μηχανουργική Τεχνολογία – II*, ΟΕΔΒ, Αθήνα, 1999.
- Κοναφάγος, Κ., *Μεταλλογνωσία - τόμος II – τα Κράματα*, Αθήναι, 1973.
- Μάμαλης, Α.Γ., *Κατεργασίες των Υλικών (Συγκολλήσεις – Χύτευση - Ανοχές)*, εκδ. ΕΜΠ, Αθήνα, 1991.
- Μανωλάκος, Δ.Ε., *Χύτευση (casting)*, ανέκδοτες σημειώσεις για τις παραδόσεις στο ΕΜΠ, 2001.
- Μανωλάκος, Δ.Ε., *Χύτευση υπό πίεση (die casting)*, ανέκδοτες σημειώσεις για τις παραδόσεις στο ΕΜΠ, 2001.
- Μανωλάκος, Δ.Ε., *Παρατηρούμενα φαινόμενα κατά τη στερεοποίηση τήγματος*, ανέκδοτες σημειώσεις για τις παραδόσεις στο ΕΜΠ, 2002.
- Χαϊδεμενόπουλος, Γ.Ν., *Φυσική Μεταλλουργία – Θεμελιώδεις αρχές*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος, 2000.
- *ASM Handbook*, Vol. 15: *Casting*, ASM International, 1988.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., and Knight, W.A., *Product Design for Manufacture and Assembly*, Marcel Dekker, N. York, 1994.
- Campbell, J., *Castings*, Butterworth-Heinemann, 2nd ed., 2003.
- Doyle, L.E., Keyser, C.A., Leach, J.L., Schrader, G.F. and Singer, M.B., *Manufacturing Processes and Materials for Engineers*, Prentice Hall, 3rd ed., N. Jersey, 1985.
- Dieter, G.E., *Engineering Design – A Materials and Processing Approach*, McGraw-Hill, 2nd ed., N. York, 1991.
- Farag, M.M., *Selection of Materials and Manufacturing Processes for Engineering Design*, Prentice-Hall, N. York, 1989.
- Flemings, M. C., *Solidification Processing*, McGraw-Hill, N. York, 1974.
- Ghosh, A., Mallik, A.K., *Manufacturing Science*, EWP, N. Delhi, 1991.
- Kalpakjian, S. and Schmid, S.R., *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Prentice Hall, 4th ed., New Jersey, 2003.
- Kalpakjian, S. and Schmid, S.R., *Manufacturing Engineering and Technology*, Prentice Hall, 4th ed., New Jersey, 2001.

- Mietrach, D. (ed.), *AGARD Handbook on Advanced Casting*, AGARDograph No 299, 1991.
- Mikhailov, A.M. (ed.) *Metal Casting*, MIR Publications, Moscow, 1989.
- Rao, P.N., *Manufacturing Technology*, Tata Mc-Graw Hill, 2nd ed., N. Delhi, 1998.
- Rowley, M. T. (ed.), *International Atlas of Casting Defects*, American Foundrymen's Society, 1974.
- Schey, J.A., *Introduction to Manufacturing Processes*, Mc-Graw Hill, 3rd ed., N. York, 2000.
- Swift, K.G. and Booker, J.D., *Process Selection – from design to manufacture*, Arnold, London, 1997.

Προτεινόμενη (προαιρετική) βιβλιογραφία εμφάνισης

- *ASM Handbook*, Vol. 15: *Casting*, ASM International, 1988
- Mietrach, D. (ed.), *AGARD Handbook on Advanced Casting*, AGARDograph No 299, 1991.
- Rowley, M. T. (ed.), *International Atlas of Casting Defects*, American Foundrymen's Society, 1974.

Πηγές στο Διαδίκτυο (Internet)

Φορέας/ Εταιρεία	Δικτυακός τόπος
American Foundrymen's Society	http://www.afsinc.org
American Metal Casting Consortium	http://amc.scra.org/index.html
North American Die Casting Association	http://www.diecasting.org
Steel Founders of America	http://www.sfsa.org

Η ιστοσελίδα <http://www.sfsa.org> [STEEL FOUNDERS' SOCIETY of AMERICA] προσφέρει ιδιαίτερα χρήσιμες τεχνικές πληροφορίες για την χύτευση. ΣΥΝΙΣΤΑΤΑΙ επίσκεψη, πλοήγηση και download (PDF αρχεία)

Η ιστοσελίδα <http://www.sfsa.org/tutorials/index.html> περιέχει 12 case studies σχεδιομελέτης χυτών εξαρτημάτων.