

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΚΑΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2009

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στην τεχνολογία της χύτευσης εξαρτημάτων με απαιτήσεις ακρίβειας, την κατασκευή μεταλλικών χυτών με χύτευση ακριβείας και την χρήση διάφορων τεχνολογιών ταχείας κατασκευής πρωτότυπων και εργαλείων.

Για την εργασία αυτή ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γιαννόπουλο Ανδρέα, Αναπληρωτή Καθηγητή, που είχε την επίβλεψη καθόλη τη διάρκεια της πτυχιακής μου και βοήθησε καθοριστικά στην εξέλιξη και την διαμόρφωσή της με τις συμβουλές και τις παρατηρήσεις του.

Καδής Νικόλαος

Ιούνιος 2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	4
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
1.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ Η/Υ CAD/CAM/CAE	6
2. ΧΥΤΕΥΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ	11
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
2.2 ΧΥΤΕΥΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ (Precision Casting)	13
2.2.1 Γενικά στοιχεία	13
2.2.2 Περιγραφή μεθόδου	14
2.2.3 Υλικά	16
2.2.4 Προβλήματα	18
2.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	21
2.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΥΤΕΥΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ	24
2.4.1 Παραγωγή κέρινου αντιγράφου	24
2.4.2 Συναρμολόγηση σε δενδροειδή σχηματισμό	24
2.4.3 Μέθοδοι κατασκευής επένδυσης	25
2.4.4 Διαδικασία παραγωγής χυτών με την χύτευση ακριβείας με χρήση κεραμικού καλουπιού	27
2.4.5 Συνοπτική παρουσίαση της χύτευσης ακριβείας	32
2.4.6 Εφαρμογές νέων τεχνολογιών	32
2.5 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΝΟΧΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΤΗ ΧΥΤΕΥΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ	33
2.5.1 Εισαγωγή	33
2.5.2 Γραμμικές ανοχές	34

2.5.3	Αυλακώσεις - Αύλακες (Σφηναύλακες)	35
2.5.4	Δημιουργία Σπειρώματος	35
2.5.5	Τυφλές και διαμπερείς οπές	36
2.5.6	Παράλληλα Επίπεδα	38
2.5.7	Ποιότητα Επιφανείας (Surface Finish)	39
2.5.8	Συνήθειες εφαρμογές και χαρακτηριστικά	40
2.5.9	Ποσότητες Παραγωγής	41
2.5.10	Κλίση Χυτηρίου	41
2.5.11	Εργαλεία	41
2.6	ΤΑΧΕΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΩΤΟΤΥΠΩΝ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ	46
2.7	ΕΙΔΗ ΧΥΤΕΥΣΗΣ	47
2.7.1	Χύτευση μπιγιετών	47
2.7.2	Συνεχής χύτευση	48
3.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΟΣ ΧΥΤΟΥ	57
3.1	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	57
3.2	ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ	57
3.2.1	Γενική τεχνική της φασματοσκοπίας επιφανειών	57
3.2.2	Σαρωτικό ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM)	58
3.3	ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ	59
3.3.1	Ο νόμος του Bragg	60
3.3.2	Μονοχρωμάτορες ακτίνων Χ	61
4.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΤΕΡΩΤΗΣ ΥΠΟΒΡΥΧΙΑΣ	
ΑΝΤΛΙΑΣ	63
4.1	ΓΕΝΙΚΑ	63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	81

1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών αναφερόμαστε σε όλες εκείνες τις δραστηριότητες που αφορούν τη δημιουργία και εφαρμογή των τεχνοοικονομικών διαδικασιών που οδηγούν στη μετατροπή ακατέργαστων υλικών, ενέργειας και προμηθευμένων προϊόντων σε προϊόντα προς πώληση σε άλλους κατασκευαστές ή σε προϊόντα προς πώληση στο κοινό. Σύμφωνα με τον ορισμό αυτό, ο σχεδιασμός μηχανολογικών κατασκευών περιλαμβάνει τόσο τον σχεδιασμό του προϊόντος και των εργαλείων παραγωγής του όσο και τον σχεδιασμό ολόκληρης της παραγωγικής διαδικασίας. Πιο συγκεκριμένα ο σχεδιασμός μηχανολογικών κατασκευών περιλαμβάνει την ανάλυση και τροποποίηση των σχεδίων του προϊόντος ώστε να εξασφαλιστεί η κατασκευασσιμότητα του προϊόντος.

Αυτό συνιστάται στα εξής:

α) Σχεδιασμός, επιλογή και βελτιστοποίηση των απαιτούμενων εργαλείων, διαδικασιών και μηχανολογικών εξοπλισμών.

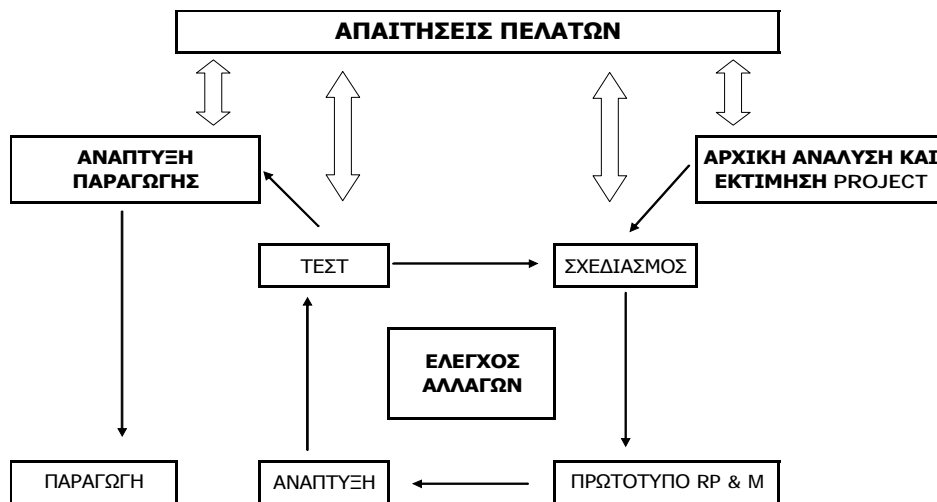
β) Καθορισμός όλων των τεχνικών συνιστωσών που οδηγούν στις απαιτούμενες τεχνικές προδιαγραφές.

Σχηματική απεικόνιση των σταδίων παραγωγής ενός νέου προϊόντος απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1.

Κατά την μελέτη, ανάπτυξη και κατασκευή ενός προϊόντος, είναι πολύ σημαντικός ο σωστός σχεδιασμός της παραγωγικής διαδικασίας, από την αρχική σύλληψη για την κατασκευή ενός προϊόντος μέχρι την τελική παραγωγή του, ώστε να οδηγεί στην βέλτιστη δυνατή λύση. Η λύση αυτή πρέπει να υπερέχει έναντι όλων των εναλλακτικών βάσει των κριτηρίων που έχουμε προκαθορίσει και να ικανοποιεί κατά το καλύτερο δυνατό τη σχέση κόστους – οφέλους.

Η τελική επιλογή της βέλτιστης λύσης είναι μία πολύ σύνθετη διαδικασία καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες. Πρέπει να τονιστεί ότι η

αξιολόγηση των λύσεων και η επιλογή της βέλτιστης λύσης είναι σημαντικό να επιτευχθεί στο συντομότερο δυνατό χρόνο με την μέγιστη ασφάλεια ως προς το αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες Μεθοδολογίες Εργασίας που βοηθούν στην επίτευξη του στόχου που αναφέρθηκε. Θετική συνεισφορά έχει και η χρήση υπολογιστικών μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια.



Σχήμα 1.1 Σχηματική απεικόνιση των σταδίων που απαιτούνται για την επιλογή της βέλτιστης δυνατής λύσης για την κατασκευή ενός νέου προϊόντος

Το αποτέλεσμα της δημιουργίας και της ανάπτυξης κάθε νέας μηχανολογικής κατασκευής αξιολογείται για την πλειοψηφία των εφαρμογών με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

1. Το κόστος παραγωγής της
2. Την ποιότητά της &
3. Τον χρόνο που χρειάζεται για να παραχθεί

Το κόστος, ο χρόνος και η ποιότητα είναι οι σημαντικότερες απαιτήσεις που λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό ενός προϊόντος, είτε αυτό πρόκειται για ολοκληρωμένο σύνολο είτε για ένα μεμονωμένο σύνολο. Έτσι κατά το σχεδιασμό ζητείται πάντα η μέγιστη ποιότητα στο συντομότερο χρόνο με το μικρότερο κόστος.

Όπως έχουν δείξει οι σχετικές έρευνες το 70–75% το κόστους του νέου προϊόντος εξαρτάται από τον σχεδιασμό του. Από αυτό συμπεραίνεται η σημασία του σχεδιασμού στην επιτυχία ενός προϊόντος. Πολύ περισσότερο μάλιστα αν αναλογιστεί κανείς ότι πρόκειται για ένα κόστος που δεν υπερβαίνει το 5–8% του συνολικού

κόστους. Ειδικότερα ο λεπτομερής Μηχανολογικός Σχεδιασμός παίζει πολύ μεγάλο και αποφασιστικό ρόλο στον καθορισμό του κόστους αυτούς.

Σήμερα για ένα επιτυχημένο τεχνολογικά, οικονομικά και ποιοτικά μηχανολογικό σχεδιασμό επιδιώκεται η εξαρχής ταυτόχρονη συμμετοχή περισσότερων εξειδικευμένων μηχανικών (κατασκευαστών, υλικών, μεθόδων παραγωγής, εργαλείων, προγραμματισμού και ελέγχου παραγωγής κ.α.) καθώς και εκπροσώπων άλλων σχετικών με το αντικείμενο κλάδων μέσα σε πλαίσιο Συγχρονισμένης, Συντονισμένης και Ολοκληρωμένης Συνεργασίας. Ο σύγχρονος αυτός τρόπος μηχανολογικού σχεδιασμού από κατάλληλα συγκροτημένη ομάδα εργασίας έχει επικρατήσει διεθνών με τον χαρακτηρισμό του ως CONCURRENT or SIMULTANEOUS ENGINEERING DESIGN και υποστηρίζεται πλέον σημαντικά από τα συστήματα CAD/CAM/CAE. Για γρήγορη και επιτυχή ανάπτυξη νέων και ανταγωνιστικών προϊόντων που είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές τους αμέσως με την πρώτη παραγωγή (Time – compression και στην Ανάπτυξη – Σχεδιασμού παράλληλα με την αντίστοιχη προσπάθεια Time – compression για τις λοιπές φάσεις προετοιμασίας μέχρι την έναρξη της παραγωγής).

1.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ Η/Υ CAD/CAM/CAE

Κατά την κατασκευαστική διαμόρφωση ενός προϊόντος συγκρότησης του σε υποσύνολα και επιμέρους στοιχεία καθώς και η απόδοση μορφής και μεγέθους στα τελευταία, γίνεται καταρχήν από μία σειρά σκαριφημάτων και σε δεύτερη φάση πιο συγκεκριμένα ως προς τις γεωμετρικές τους διαστάσεις και τα πρότυπα (π.χ. ISO) σε σχέδια 2D. Η σχεδίαση υλοποιείται με χρήση συμβατικών μέσων ή, σήμερα πλέον, με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή και λογισμικού CAD. Σε πολλές περιπτώσεις για καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας ή και για μετέπειτα υποστήριξη υπολογιστικού έργου της παραγωγής, σχεδιάζονται αξονομετρικά 3D – CAD σχέδια με ιδιότητες πλήρων στέρεων σωμάτων. Τα γραφικά μοντέλα που προκύπτουν συνιστούν την βάση της επακόλουθης διαδικασίας βελτιστοποίησης σε περιβάλλον CAD/CAE/CAM, της λειτουργίας, της αντοχής, της ποιότητας, της μεθόδου παραγωγής, του κόστους και του χρόνου παραγωγής (κινηματική προσομοίωση, ανάλυση πεπερασμένων

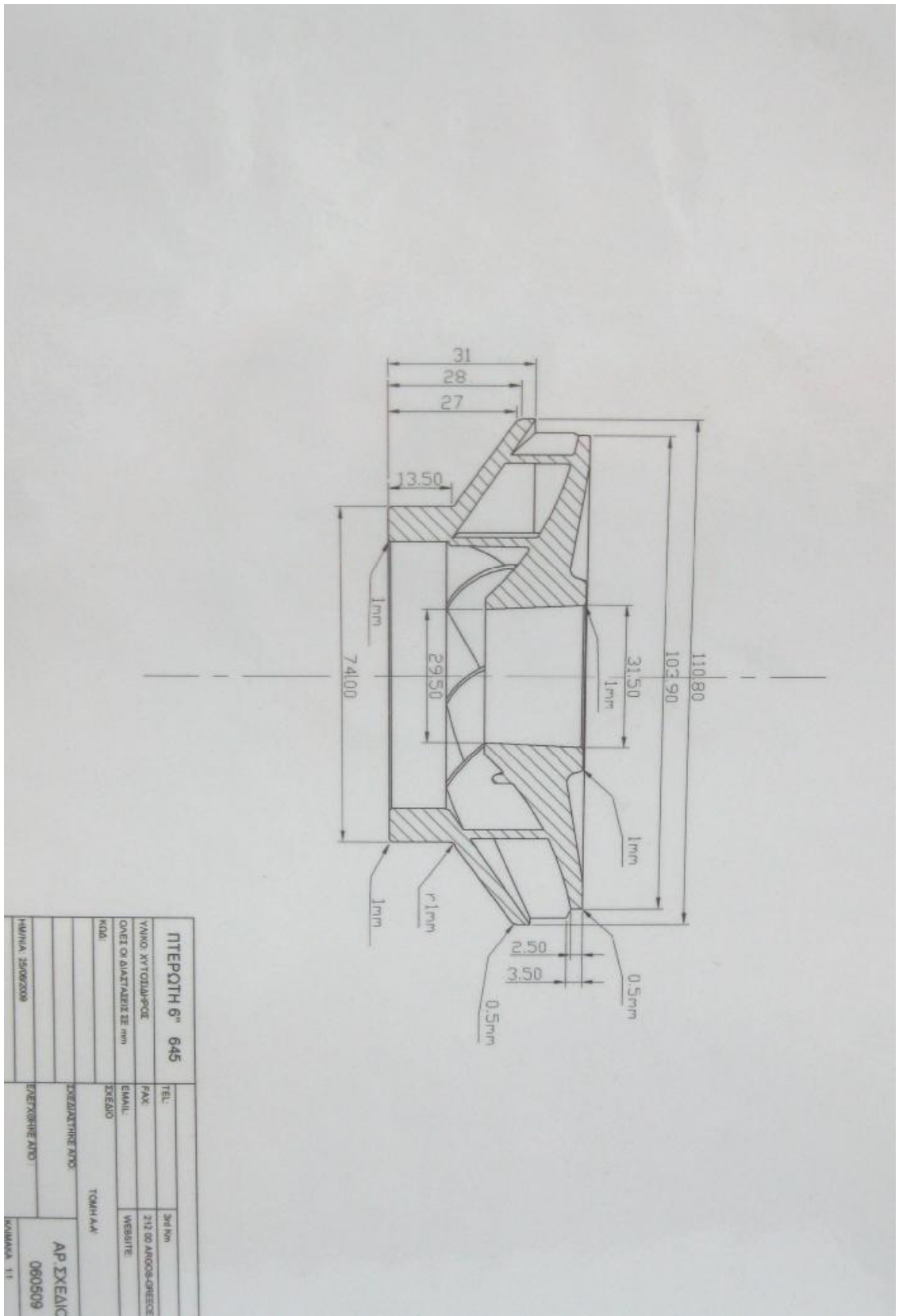
στοιχείων, κατεργασίας κοπής – διαμόρφωσης, χύτευσης κ.λ.π.). Πολύ πιο σύντομα από τον συμβατικό χρόνο με μικρότερη προσπάθεια και με πολύ καλύτερη ποιότητα απόδοσης. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται αποφασιστικά η δημιουργία εναλλακτικών κατασκευαστικών λύσεων.

Στο περιβάλλον CAD/CAM/CAE έχουν πολύ πρόσφατα προστεθεί και τα συστήματα ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων που χρησιμοποιούν 3D – CAD μοντελοποίηση στερεών και τις τεχνολογίες Laser και CNC. Παράλληλα βασιζόμενα στα συστήματα αυτά αναπτύσσονται και συστήματα ταχείας κατασκευής εργαλείων παραγωγής ΤΚΕ που έμμεσα συμβάλλουν επίσης στην παραγωγικά βέλτιστη κατασκευαστική διαμόρφωση των υπό ανάπτυξη νέων προϊόντων (εφαρμογές κυρίως ψυχρής και θερμής διαμόρφωσης, χύτευσης, έγχυσης).

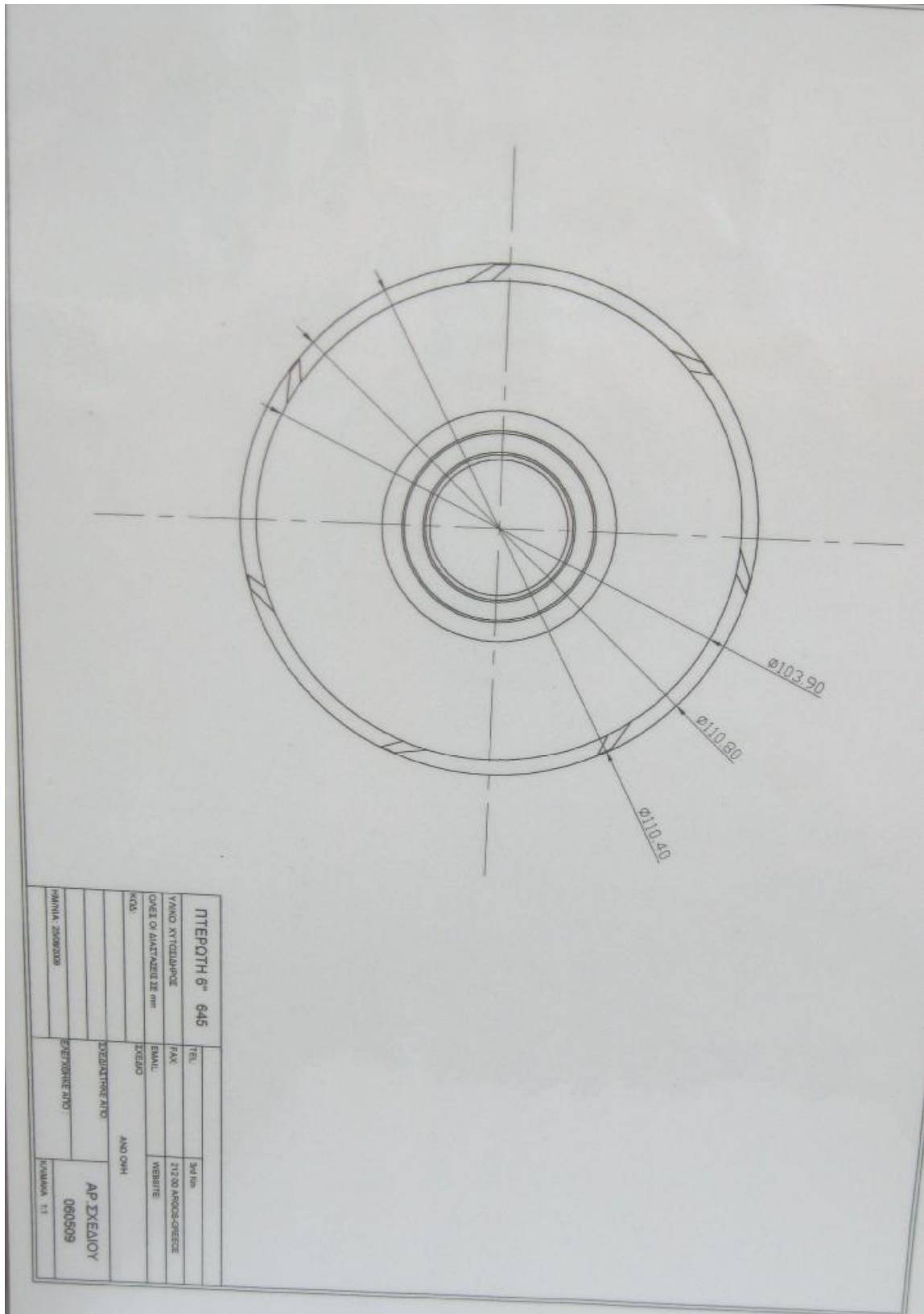
Τα συστήματα CAD/CAM/CAE απαιτούν σαφώς ακριβότερο εξοπλισμό από την συμβατική κατασκευαστική βιομηχανική πρακτική και ακόμα πιο κατάλληλα εκπαιδευμένο εργατικό δυναμικό. Παρόλα αυτά η σωστή εφαρμογή τους μπορεί να βελτιώσει δραστικά τους χρόνους και τα κόστη ανάπτυξης και σχεδιασμού, την παραγωγικότητα, την τελική ποιότητα των προϊόντων, την αποδοτικότητα των εργαζομένων και του εξοπλισμού. Στη σημερινή εποχή, εξάλλου που οι ψηφιακοί υπολογιστές είναι ταχύτεροι και με περισσότερες δυνατότητες, που είναι μικρότεροι στο μέγεθος και φθηνότεροι, σε συνδυασμό με τα βελτιωμένα προγράμματα και τεχνικές, τα συστήματα CAD/CAM/CAE είναι προσιτά και αποδοτικά ακόμα και για μικρές εταιρίες. Επίσης δεν πρέπει να ξεχνά κανείς ότι ο διεθνής ανταγωνισμός κάνει επιτακτικότερη την ανάγκη εφαρμογής νέων αποδοτικότερων τεχνολογιών.

Αυτοί οι λόγοι κάνουν τη σωστή χρήση των συστημάτων CAD/CAM/CAE βασικό εργαλείο τόσο για την βιωσιμότητα όσο και για την κερδοφορία μίας επιχείρησης.

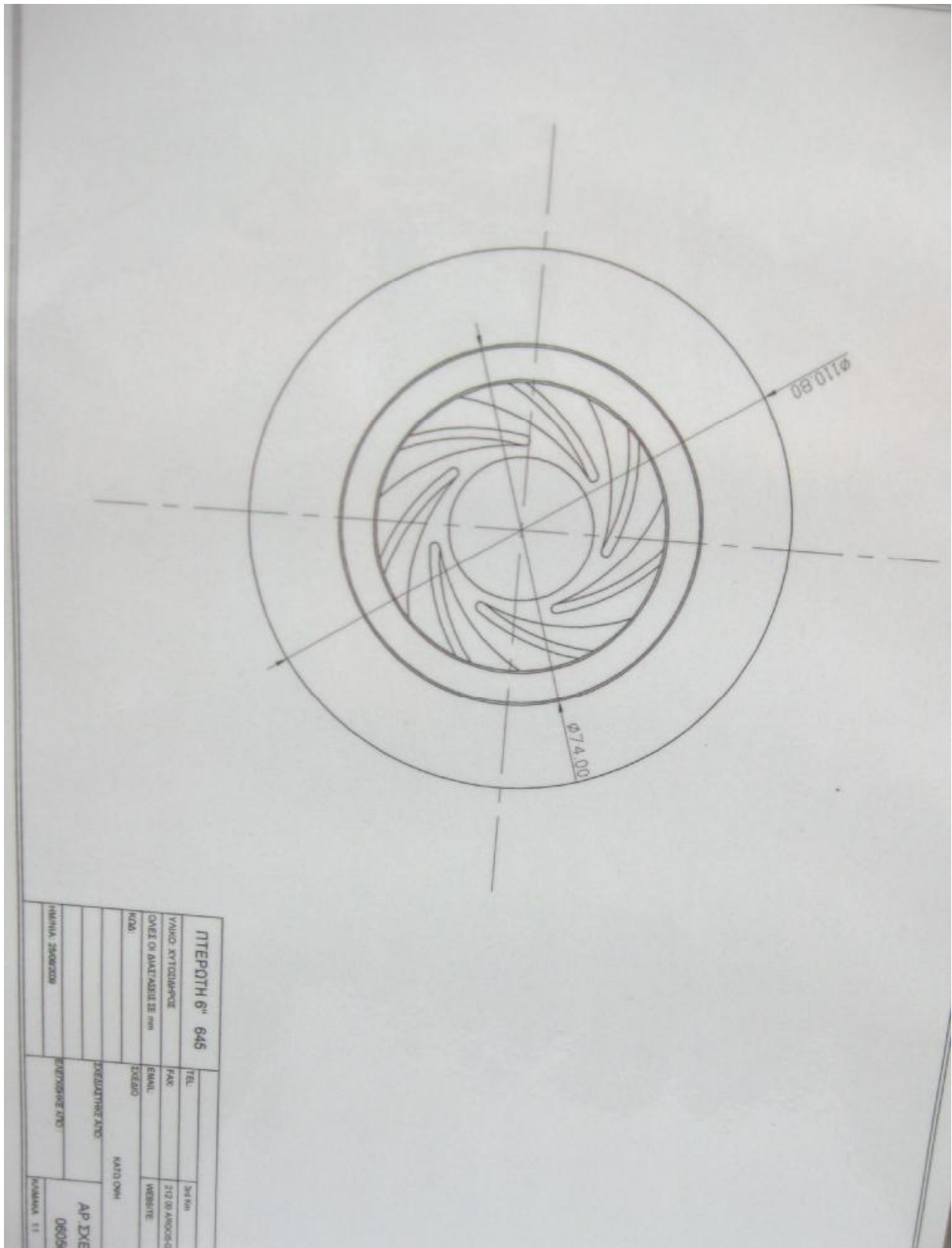
Στα κάτωθι Σχήματα 1.2, 1.3 και 1.4 ακολουθούν δείγματα εργασίας (σχέδια) σε περιβάλλον προγράμματος AUTOCAD για τον σχεδιασμό της πτερωτής (όλα τα σχέδια είναι σε κλίμακα 1:1).



Σχήμα 1.2 Τομή Α-Α' της πτερωτής



Σχήμα 1.3 Άνω όψη πτερωτής



Σχήμα 1.4 Κάτω όψη πτερωτής

2. ΧΥΤΕΥΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ – PRECISION CASTING

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χύτευση είναι μία από τις πολλές μεθόδους μορφοποίησης μεταλλικών υλικών και μία από τις φθηνότερες για τη δημιουργία εξαρτημάτων ολοκληρωμένου σχήματος. Στην περίπτωση της χρήσης των μετάλλων σε μηχανολογικές συσκευές και εφαρμογές, η μέθοδος της χύτευσης αποτελεί έναν εξαιρετικό τρόπο μετατροπής ενός ρευστού μετάλλου ή κράματος μετάλλου σε στερεό καθορισμένου σχήματος με μια ολοκληρωμένη διαδικασία με τις λιγότερες δυνατές απώλειες σε υλικό αλλά και σε ενέργεια.

Με τον όρο χύτευση περιγράφεται γενικά η διεργασία κατά την οποία ένα τήγμα μετάλλου εισέρχεται σε ένα καλούπι, αφήνεται να στερεοποιηθεί εντός του καλουπιού και στη συνέχεια εξέρχεται από αυτό με τη μορφή του τελικού προϊόντος. Για τη δημιουργία του καλουπιού απαιτείται ένα πρότυπο με το επιθυμητό σχήμα και μέγεθος του τελικού προϊόντος. Ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του καλουπιού και του προτύπου, η χύτευση διακρίνεται σε διάφορα είδη (die casting, permanent mold, plaster mold, resin shell mold, sand casting, precision investment casting κ.α.).

Κατά τη διεργασία της χύτευσης για την παρασκευή μεταλλικών αντικειμένων με καθορισμένο σχήμα, το ρευστό μέταλλο ή κράμα μετάλλων εγχέεται απευθείας σε ένα καλούπι του αντίστοιχου σχήματος ώστε να δημιουργηθεί το τελικό προϊόν. Το πλεονέκτημα της χύτευσης έναντι των υπολοίπων μεθόδων μορφοποίησης μεταλλικών υλικών (μηχανουργική κατεργασία, κονιομεταλλουργία-sintering) έγκειται καταρχήν στο γεγονός ότι αποτελείται από ένα τελικό στάδιο και δεν απαιτεί δαπανηρές επεξεργασίες για την τελική μορφοποίηση του προϊόντος. Για σύγκριση, προκειμένου να παρασκευασθεί τελικό προϊόν με μηχανουργική επεξεργασία

(forging), απαιτείται αρχικά μία ποσότητα χυτού μετάλλου στην οποία δίδεται τελικό σχήμα μέσω κατεργασίας εν θερμώ ή εν ψυχρώ. Η κατεργασία αυτή περιλαμβάνει αποκοπή με μηχανικό τρόπο τμημάτων της επιφάνειας του υλικού ώστε αυτό να αποκτήσει το επιθυμητό σχήμα, συνεπώς η μέθοδος αυτή είναι πολυέξοδη όσον αφορά στην ποσότητα της πρώτης ύλης που απαιτείται για την παρασκευή τελικού

7πρωϊόντος. Η μέθοδος της κονιομεταλλουργικής επεξεργασίας (powder metallurgy process) περιλαμβάνει συμπύεση σε καλούπια και πυροσυσσωμάτωση κόνεων μετάλλων και κραμάτων μετάλλων η παρασκευή των οποίων είναι ιδιαίτερα δαπανηρή, ενώ επιπλέον εφαρμόζεται μόνο για μεγάλο αριθμό κομματιών χωρίς περίπλοκο σχήμα.

Η χύτευση, ως διεργασία παρασκευής μεταλλικών εξαρτημάτων καθορισμένου σχήματος, αποτελεί μία μέθοδο με πολλαπλές εφαρμογές καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μαζική παραγωγή αντικειμένων με περίπλοκα σχήματα και ευρύ φάσμα μεγεθών και ιδιοτήτων που δεν μπορούν να επιτευχθούν με την εφαρμογή άλλων μεθόδων.

Στον Πίνακα 2.1 (Hitchiner Manufacturing Co., Inc.) αναγράφονται συγκριτικά οι σημαντικότερες μέθοδοι μορφοποίησης μεταλλικών εξαρτημάτων.

Πίνακας 2.1 Σύγκριση μεθόδων μορφοποίησης μεταλλικών εξαρτημάτων.

<u>Process</u>	<u>Tool Cost</u>	<u>Unit Cost</u>	<u>Metal Options</u>	<u>Design Freedom</u>	<u>Volume Capability</u>	<u>Draft Required</u>	<u>Tolerance Control</u>	<u>Size Range</u>	<u>Surface Finish</u>
<u>Investment Casting</u>	Avg.	High	Most	Most	All	No	Avg.	Avg.	Avg.
<u>Die Casting</u>	High	Low	Few	Least	High	Yes	Avg.	Avg.	Avg.
<u>Permanent Mold</u>	Avg.	Avg.	Avg.	Avg.	All	Yes	Avg.	Avg.	Avg.
<u>Plaster Mold</u>	Low	High	Few	Avg.	Low	Yes	Avg.	Avg.	Avg.
<u>Resin Shell Mold</u>	Avg.	Avg.	Avg.	Avg.	All	Yes	Avg.	Avg.	Poor
<u>Sand Casting</u>	Low	Avg.	Most	Avg.	All	Yes	Poor	Large	Poor
<u>Forging</u>	High	Avg.	Avg.	Least	High	Yes	Poor	Avg.	Poor
<u>Powder Metallurgy</u>	Avg.	Low	Avg.	Least	High	No	Best	Small	Best

2.2 ΧΥΤΕΥΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ (Precision Casting)

2.2.1 Γενικά στοιχεία

Η χύτευση ακριβείας (precision casting) είναι μία από τις αρχαιότερες και ταυτόχρονα πιο εξελιγμένες μεταλλουργικές διεργασίες. Η εμφάνιση της μεθόδου χρονολογείται γύρω στο 4000 π.Χ. και συνδέεται με όλα τα στάδια ανάπτυξης πολιτισμών. Η εφαρμογή της σε βιομηχανικό επίπεδο, όπως είναι γνωστή μέχρι σήμερα, έγινε στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής το 1940 και αποτέλεσε την αρχή για τη χρήση της μεθόδου στην παρασκευή εξαρτημάτων με πολύπλοκα σχήματα από δύσκολα επεξεργαζόμενα μεταλλικά υλικά.

Τις τελευταίες δεκαετίες η χύτευση ακριβείας αναπτύσσεται συνεχώς και έχει εξελιχθεί σε μία από τις πιο ευέλικτες μεθόδους παρασκευής μεταλλικών αντικειμένων με πολλαπλές εφαρμογές στη βιομηχανία αεροσκαφών, την αυτοκινητοβιομηχανία, την ιατρική, την κοσμηματοποιία, τον τομέα των ηλεκτρονικών, της δόμησης κ.ά.

Το χαρακτηριστικό της χύτευσης ακριβείας είναι η χρήση αναλώσιμων (κέρινων ή πλαστικών) ομοιωμάτων του σχήματος και των διαστάσεων του τελικού προϊόντος. Στην περίπτωση κέρινων ομοιωμάτων η διεργασία ονομάζεται και διεργασία χαμένου κεριού (lost wax process). Κατά τη μέθοδο της χύτευσης ακριβείας, τα ομοιώματα αρχικά συναρμολογούνται σε έναν κορμό σχηματίζοντας ένα δένδρο. Το δένδρο εμβαπτίζεται διαδοχικά σε μίγμα πυρίμαχων κεραμικών υλικών για τη δημιουργία του καλουπιού στο οποίο, μετά από απομάκρυνση των ομοιωμάτων και έψηση, γίνεται η χύτευση του ρευστού μετάλλου ή μεταλλικού κράματος. Τα τελικά προϊόντα λαμβάνονται μετά την απομάκρυνση του καλουπιού, το οποίο είναι επίσης αναλώσιμο, και την αποκοπή τους από τον κεντρικό κορμό.

Η εφαρμογή της μεθόδου χύτευσης ακριβείας ενδείκνυται για την οικονομική κατασκευή μεγάλου αριθμού και μικρού μεγέθους μεταλλικών εξαρτημάτων (βάρους ~ 1kg για πολύπλοκα σχήματα και έως 30kg για απλούστερα σχήματα) από δύσκολα μηχανικά επεξεργαζόμενους χάλυβες (π.χ. ταχυχάλυβες, εργαλειοχάλυβες, ανοξείδωτους χάλυβες), κράματα νικελίου, χαλκού, κοβαλτίου και αλουμινίου.

Η υπεροχή της χύτευσης ακριβείας έναντι όλων των υπολοίπων μεθόδων χύτευσης για μορφοποίηση μεταλλικών εξαρτημάτων, έγκειται στα εξής χαρακτηριστικά:

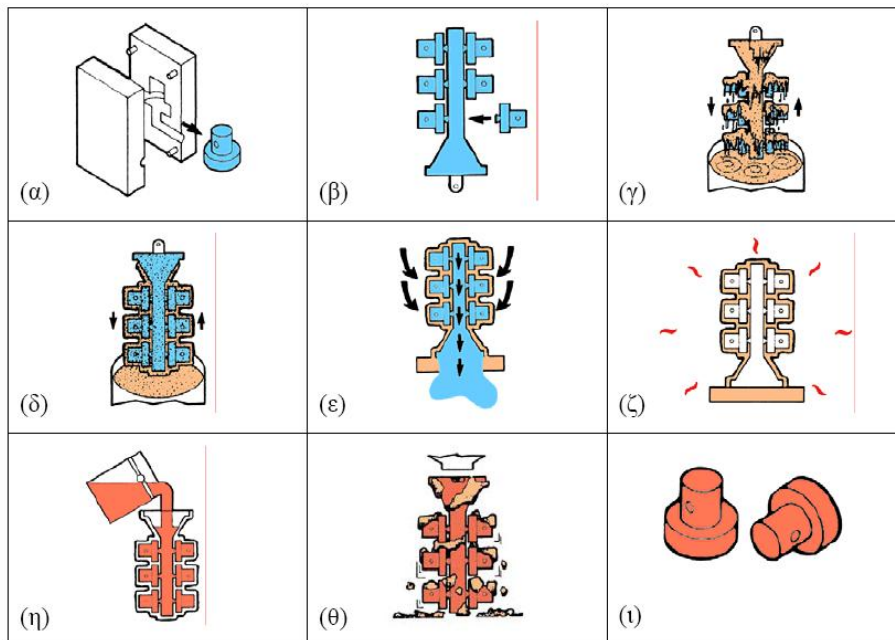
- Υψηλός ρυθμός παραγωγής, ιδιαίτερα στην περίπτωση μικρών εξαρτημάτων.
- Μεγάλη ακρίβεια των διαστάσεων των παρασκευαζόμενων χυτών, με επιτρεπτά όρια διακύμανσης, σύμφωνα με το DIN 406, στην περιοχή $\pm 0.08\text{mm}$ έως $\pm 0.9\text{mm}$ για εξαρτήματα μήκους 6mm έως 200mm αντίστοιχα.
- Εξαιρετική ποιότητα της επιφάνειας των χυτευμάτων με τραχύτητα 6 - 23 μm (DIN ISO 1302), χωρίς να απαιτούνται επιπλέον πολύπλοκες μηχανουργικές επεξεργασίες (π.χ. σφυρηλάτηση, συγκόλληση). Υψηλή πιστότητα και μηχανική αντοχή προϊόντων.
- Δυνατότητα παρασκευής εξαρτημάτων με ιδιαίτερα περίπλοκα σχήματα και μεγέθη. Στην περίπτωση χαλύβων και αλουμινίου, το βάρος των χυτών μπορεί να υπερβεί τα 300kg.
- Εφαρμογή σε ευρύ φάσμα υλικών, συμπεριλαμβανομένων μετάλλων υψηλού σημείου τήξεως και δύσκολα μηχανικά επεξεργαζόμενων μεταλλικών υλικών, τα οποία δεν είναι δυνατόν να μορφοποιηθούν με άλλες μεθόδους.
- Παρασκευή χυτευμάτων πολύτιμων μετάλλων με ελάχιστες απώλειες σε υλικό.

2.2.2 Περιγραφή μεθόδου

Αρχικά σε ειδικά μεταλλικά καλούπια (brass, duralumin) παρασκευάζονται με πίεση εν θερμώ πυρήνες (κέρινα ομοιώματα), με το ακριβές σχήμα και μέγεθος του αντίστοιχου εξαρτήματος (Σχήμα 2.1α). Στη συνέχεια οι πυρήνες αυτοί συναρμολογούνται σε ένα κορμό (κέρινο) σχηματίζοντας ένα δένδρο (Σχήμα 2.1β). Το δένδρο εμβαπτίζεται αρχικά σε αιώρημα (slurry) μίγματος συνδετικού (π.χ. πυριτικός αιθυλεστέρας) και λεπτοαλεσμένου (~ 200 mesh) πυρίμαχου κεραμικού (συνήθως πυριτικές ενώσεις αλουμίνας ή ζirkονίας) (Σχήμα 2.1γ) και εν συνεχεία οδηγείται σε ρευστοστερεά κλίνη άμμου του αντίστοιχου κεραμικού, κοκκομετρίας ~

60 mesh, στην οποία επίσης εμβαπτίζεται (Σχήμα 2.1δ). Με τον τρόπο αυτό σχηματίζεται με εναπόθεση η πρώτη στρώση κεραμικού στην επιφάνεια του ομοιώματος. Αμέσως μετά ακολουθεί η ξήρανση του κεραμικού αποθέματος σε ειδικούς θαλάμους με ρυθμιζόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Όλη η διαδικασία επαναλαμβάνεται με εναπόθεση 5 έως 9 στρώσεων κεραμικού, ανάλογα με το αναμενόμενο βάρος του χυτού, για τη δημιουργία του κεραμικού κελύφους. Η κοκκομετρική σύσταση της κεραμικής άμμου αυξάνεται σταδιακά (έως ~ 20 mesh) με τον αριθμό των στρώσεων. Μετά την πρώτη στρώση το πυρίμαχο υλικό που συνήθως χρησιμοποιείται είναι μολοχίτης (μίγμα μουλίτη και χαλαζία).

Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζονται συνοπτικά οι διαδικασίες που ακολουθούνται για την κατασκευή μεταλλικών εξαρτημάτων με τη μέθοδο της χύτευσης ακριβείας.



Σχήμα 2.1 Διάγραμμα ροής παραγωγικής διαδικασίας χύτευσης

Στη συνέχεια το αποξηραμένο δένδρο οδηγείται σε αυτόκλειστο υψηλής πίεσης, όπου με διοχέτευση υπέρθερμου ατμού (1400C – 1600C) και πίεση ~ 6-8 bar επιτυγχάνεται η ταχεία τήξη του κέρινου ομοιώματος (Σχήμα 2.1ε). Το λιωμένο κεριά ανακτάται και ανακυκλώνεται, ενώ το κεραμικό κέλυφος οδηγείται σε κλίβανο σήραγγας όπου ακολουθεί η έψησή του για περίπου 5h με ρυθμιζόμενη ταχύτητα ανόδου της θερμοκρασίας μέχρι ~ 1000C έτσι ώστε να αποκτηθούν οι επιθυμητές αντοχές (Σχήμα 2.1ζ). Στα καλούπια που εξέρχονται από τον κλίβανο

πραγματοποιείται η χύτευση του ρευστού μετάλλου ή κράματος μετάλλου (Σχ. 2.1η), το οποίο στη συνέχεια αφήνεται να ψυχθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Τα τελευταία στάδια της διεργασίας περιλαμβάνουν τον κερματισμό του κεραμικού (Σχήμα 2.1θ) και τον αποχωρισμό των μεταλλικών εξαρτημάτων (Σχήμα 2.1ι) τα οποία οδηγούνται, μετά από αμμοβολή και καθαρισμό της επιφάνειάς τους, για βαφή (χάλυβες), στίλβωση και ποιοτικό έλεγχο.

2.2.3 Υλικά

Η ποιότητα των μεταλλικών προϊόντων που παρασκευάζονται με τη μέθοδο της χύτευσης ακριβείας καθώς και το συνολικό κόστος της διεργασίας εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται στα διάφορα στάδια.

Η επιλογή των κατάλληλων υλικών γίνεται βάσει των ιδιοτήτων τους, με σκοπό κυρίως την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας αστοχίας του κεραμικού κελύφους και τη διατήρηση των διαστάσεων των επιμέρους τμημάτων (ομοιώματα, κεραμικό κέλυφος) καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι απαιτήσεις για τα υλικά από τα οποία παρασκευάζονται τα ομοιώματα του τελικού προϊόντος και το κεραμικό κέλυφος.

Ομοιώματα (πυρήνες)

Τα ομοιώματα του τελικού προϊόντος παρασκευάζονται κυρίως από κεριά (στην περίπτωση αυτή η μέθοδος ονομάζεται και lost wax process). Τα κεριά που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως μίγματα φυσικών και συνθετικών κεριών και ρητινών, έτσι ώστε να παρουσιάζουν τον απαιτούμενο συνδυασμό αντοχής, σταθερότητας των διαστάσεών τους και ιξώδους. Τα κέρια ομοιώματα παρασκευάζονται με συμπίεση εν θερμώ μέσα στα ειδικά διαμορφωμένα μεταλλικά καλούπια σε θερμοκρασία 70-100⁰ C και πίεση ~ 3 MN/m².

Τα ομοιώματα μπορούν επίσης να παρασκευασθούν από πολυμερή. Στην περίπτωση χρήσης αφρού πολυστυρενίου η μέθοδος ονομάζεται και διεργασία χαμένου αφρού (lost foam process). Τα πλαστικά ομοιώματα είναι γενικά λιγότερο εύθραυστα από τα αντίστοιχα κέρια, ενώ επιπλέον παρουσιάζουν μικρότερους

συντελεστές θερμικής διαστολής και έχουν χαμηλότερο κόστος. Ωστόσο, κατά τη συμπίεση απαιτούν μεγαλύτερη θερμοκρασία και πίεση ($150-350^{\circ}\text{C}$ και $\sim 140\text{ MN/m}^2$, αντίστοιχα) και κατά την απομάκρυνσή τους τείνουν να αποσταθεροποιούν περισσότερο το κεραμικό κέλυφος.

Ένα άλλο υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή των ομοιωμάτων είναι ο υδράργυρος (mercast process). Η χρήση υδραργύρου παρουσιάζει μεγάλα πλεονεκτήματα όμως είναι ιδιαίτερα δαπανηρή και επιπλέον απαιτούνται χαμηλές θερμοκρασίες ($< -40^{\circ}\text{C}$).

Κεραμικό κέλυφος

Τα κεραμικά υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για τις διαδοχικές επικαλύψεις του ομοιώματος επιλέγονται ώστε το κεραμικό κέλυφος να παρουσιάζει τα εξής χαρακτηριστικά :

- Επαρκή αντοχή πριν και μετά την έψηση, ώστε να είναι ανθεκτικό κατά την απομάκρυνση των ομοιωμάτων και κατά τη χύτευση του ρευστού μετάλλου, αντίστοιχα.
- Αντοχή σε θερμοκρασιακά σοκ για αποφυγή θραύσης κατά τη χύτευση του ρευστού μετάλλου.
- Επαρκή διαπερατότητα (πορώδες) και θερμική αγωγιμότητα, ώστε να υπάρχει μεταφορά θερμότητας μέσω των τοιχωμάτων του κελύφους κατά τη στερεοποίηση του μετάλλου.
- Χημική σταθερότητα και χαμηλή δραστικότητα ώστε να αποφεύγονται οι αντιδράσεις με τα ρευστά μέταλλα κατά τη χύτευση.
- Μικρή θερμική διαστολή ώστε να διατηρούνται οι διαστάσεις και το τελικό σχήμα του χυτού.

Για την παρασκευή του κεραμικού κελύφους χρησιμοποιούνται συνήθως οξειδία όπως αλουμίνα, σίλικα, κάλσια, ζirkόν, μουλίτης και βωξίτης, ενώ υλικά όπως η ζirkονία και η ύτρια ενδείκνυνται στην περίπτωση χύτευσης δραστικών μετάλλων και κραμάτων μετάλλων.

Συνδετικά υλικά (binders)

Τα συνδεδετικά υλικά προστίθενται στις κεραμικές σκόνες για την ενίσχυση των δεσμών του κεραμικού κελύφους και την αύξηση της μηχανικής του αντοχής. Η επιλογή τους εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη θερμοκρασία χύτευσης και τη σύσταση του ρευστού μετάλλου ή μεταλλικού κράματος. Συνήθως ως συνδεδετικά υλικά χρησιμοποιούνται πυριτικές ενώσεις αιθυλικής ή υδατικής βάσης, όπως π.χ. πυριτικός αιθυλεστερας, καθώς έχει βρεθεί ότι αυξανόμενου του ποσοστού σίλικας στο συνδεδετικό, αυξάνει η μηχανική αντοχή του κελύφους, τόσο πριν όσο και μετά την έψηση. Στην περίπτωση χύτευσης δραστικών μετάλλων έχει διατυπωθεί από διάφορους ερευνητές ότι η επιλογή του συνδεδετικού υλικού είναι δυνατόν να μεταβάλλει το βαθμό της διεπιφανειακής αντίδρασης μεταξύ του ρευστού μετάλλου και του κεραμικού κελύφους. Επιπλέον, η αεροδιαπερατότητα του κεραμικού κελύφους σχετίζεται και με το συνδεδετικό υλικό.

Τις τελευταίες δεκαετίες στα πλαίσια της προσπάθειας για προστασία του περιβάλλοντος με μείωση των εκπομπών ρύπων από τις διάφορες μεταλλουργικές διεργασίες, προτιμάται η χρήση αιωρημάτων υδατικής βάσης. Η πλειοψηφία πλέον των χυτηρίων χρησιμοποιεί ως συνδεδετικό υλικό αιωρήματα σίλικας υδατικής βάσης, τα οποία μετατρέπονται σε πηκτώματα (τζελ) με απομάκρυνση της υγρασίας. Οι μειωμένες αντοχές των κεραμικών κελυφών με τη χρήση συνδεδετικών αυτού του τύπου αποφεύγονται με την προσθήκη διαφόρων πολυμερών τα οποία αφενός αυξάνουν την αρχική αντοχή του κελύφους και αφετέρου μειώνουν την κατακράτηση υγρασίας ανάμεσα στις διάφορες στρώσεις του κεραμικού. Πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι η προσθήκη στο συνδεδετικό υλικό οργανικών ινών (π.χ. νάϋλον) αντί των πολυμερών οδηγεί στο ίδιο πάχος κεραμικού κελύφους για λιγότερες στρώσεις, ενώ επιπλέον αυξάνει την αεροδιαπερατότητα του κελύφους .

2.2.4 Προβλήματα

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα ροής της χύτευσης ακριβείας (Σχήμα 2.1), η παρασκευή των χυτών εξαρτημάτων είναι μία αρκετά χρονοβόρα και ενεργοβόρα διεργασία όπου πιθανές αστοχίες επιβαρύνουν σημαντικά το κόστος και την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Μικρότερης έκτασης αστοχία μπορεί να εμφανισθεί στα κεραμικά καλούπια στα στάδια που προηγούνται της έψησης. Ιδιαίτερα κρίσιμο είναι το στάδιο της

αποκέρωσης όπου, εάν δεν γίνει πιστή τήρηση της διαδικασίας, οι μηχανικές τάσεις που αναπτύσσονται στο κεραμικό κέλυφος λόγω της σημαντικής διαστολής του κέρνιου ομοιώματος (έως 10% μέχρι την τήξη του), μπορεί να το οδηγήσουν σε θραύση.

Το πιο ευαίσθητο όμως στάδιο, με το μεγαλύτερο ποσοστό αστοχίας, είναι αυτό της χύτευσης. Η αστοχία μπορεί να είναι άμεση, π.χ. θραύση κεραμικού και διαρροή του ρευστού μετάλλου, ή να γίνει οπτικά εμφανής στα επόμενα στάδια της διεργασίας κατά τον καθαρισμό ή μετά τη βαφή του χυτού (π.χ. ελλίπες σχήμα, τραχύτητα επιφάνειας, εγκλείσματα, φυσαλίδες, ρωγμές) καθώς και αργότερα κατά τη λειτουργία του εξαρτήματος σε συσκευές που δέχονται εναλλασσόμενα φορτία (θραύση κόπωσης). Η αστοχία του χυτού, με άμεσες ή μακροπρόθεσμες συνέπειες, οφείλεται κατά κύριο λόγο στη μειωμένη μηχανική αντοχή των κεραμικών καλουπιών, στις αλληλεπιδράσεις στη διεπιφάνεια κεραμικού / ρευστού μετάλλου και στη μη βέλτιστη επιλογή συνθηκών χύτευσης (π.χ. θερμοκρασία καλουπιού). Η ευστάθεια των κεραμικών καλουπιών στο στάδιο της χύτευσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις διεργασίες που συντελούνται στο προηγούμενο στάδιο, αυτό της έψησης. Σημαντικές διαφορές στον τρόπο πυροσυσσωμάτωσης (sintering) και στο συντελεστή θερμικής διαστολής μεταξύ των κεραμικών στρώσεων καθώς και πιθανοί μετασχηματισμοί φάσεων (με αλλαγές στον όγκο), μπορεί να οδηγήσουν στη δημιουργία ρωγμών στο κεραμικό. Κάτω από την υδροστατική πίεση που εξασκεί το ρευστό μέταλλο κατά τη χύτευση, οι ρωγμές αυτές μπορεί να αναπτυχθούν ταχύτατα και να οδηγήσουν σε θραύση του κεραμικού και διαρροή του ρευστού μετάλλου. Επίσης, η παρουσία σε υψηλό ποσοστό ρευστών ή ημίρρευστων κεραμικών φάσεων στο στάδιο της έψησης, διευκολύνει μεν την διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης, οδηγεί όμως, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στο στάδιο της χύτευσης, σε παραμόρφωση του καλουπιού, με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν να μην ικανοποιεί διαστασιολογικά τις απαιτήσεις. Αύξηση των μηχανικών αντοχών με αύξηση του πάχους (περισσότερες στρώσεις) του τοιχώματος των καλουπιών απορρίπτεται λόγω της σημαντικής αύξησης του κόστους που προκύπτει από την επιμήκυνση του χρόνου παρασκευής και την αύξηση της ποσότητας των απαιτούμενων πρώτων υλών (κεραμικού και συνδετικού).

Οι αλληλεπιδράσεις στη διεπιφάνεια κεραμικού / ρευστού μετάλλου (διαβρεξιμότητα, διεπιφανειακές αντιδράσεις) και η θερμοκρασιακή τους εξάρτηση στο στάδιο της χύτευσης επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις συνθήκες ροής του ρευστού μετάλλου στο κεραμικό καλούπι, την επίτευξη του σχήματος και διαστάσεων του χυτού, την ποιότητα της επιφάνειάς του καθώς και την μακροχρόνια αντοχή του σε κόπωση. Στην περίπτωση κακής διαβροχής του κεραμικού από το ρευστό μέταλλο (γωνία διαβροχής $\theta \gg 90^\circ$), το κεραμικό δεν έχει την τάση να σχηματίσει κοινή διεπιφάνεια με το μέταλλο και το απωθεί. Το πρόβλημα εμφανίζεται ιδιαίτερα στις γωνίες και ακμές του καλουπιού, όπου λόγω της κακής συνάφειας, δεν μπορεί να διεισδύσει το ρευστό μέταλλο με αποτέλεσμα τη μη πιστή απόδοση του σχήματος του εξαρτήματος. Αντίθετα, στην περίπτωση πολύ καλής διαβροχής (γωνία διαβροχής $\theta \ll 90^\circ$) υπάρχει ισχυρή κινητήριος δύναμη για τη δημιουργία κοινής διεπιφάνειας μεταξύ του κεραμικού και του ρευστού μετάλλου με αποτέλεσμα το ρευστό μέταλλο να διεισδύει στο κεραμικό και να το αποσταθεροποιεί. Η αποσταθεροποίηση αυτή μπορεί να οδηγήσει α) για λεπτά τοιχώματα του κεραμικού κελύφους, σε καταστροφή του κεραμικού και διαρροή του ρευστού μετάλλου β) στην παγίδευση κεραμικών εγκλεισμάτων στην επιφάνεια του μετάλλου γ) στη δημιουργία ρωγμών στην επιφάνεια του μετάλλου κατά την απόψυξη λόγω του διαφορετικού συντελεστή θερμικής διαστολής σε σχέση με το κεραμικό και δ) στο σχηματισμό ενώσεων οξειδίου στην επιφάνεια του μεταλλικού χυτεύματος. Στις δύο τελευταίες περιπτώσεις απαιτούνται ειδικές μηχανουργικές επεξεργασίες για την εξάλειψη των επιφανειακών ατελειών με επιπτώσεις στις διαστάσεις του χυτού. Εάν οι επιφανειακές ατέλειες δεν εξαλειφθούν πλήρως μπορεί κατά τη λειτουργία του εξαρτήματος να δράσουν σαν συγκεντρωτές τάσεων με αποτέλεσμα την αστοχία του (θραύση κόπωσης). Επίσης, για χυτά αντικείμενα με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα (χυτοσίδηροι), στη διεπιφάνεια κεραμικού / ρευστού μετάλλου λαμβάνουν χώρα μεταλλουργικές αντιδράσεις αναγωγής των οξειδίων του κεραμικού με ταυτόχρονο σχηματισμό CO₂ και διαλυτοποίηση του μεταλλικού στοιχείου του οξειδίου στο ρευστό μέταλλο. Οι αντιδράσεις αυτές οδηγούν σε υψηλή τραχύτητα και απανθράκωση της επιφάνειας του χυτού (μέχρι ~ 1mm) καθώς και σε δημιουργία φυσαλίδων. Τα φαινόμενα αυτά ελαττώνουν σημαντικά τα όρια κόπωσης του εξαρτήματος.

2.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Χύτευση ακριβείας ονομάζεται σήμερα η χρησιμοποιούμενη κατά την αρχαιότητα μέθοδος που είναι κυρίως γνωστή ως χύτευση με την μέθοδο του χαμένου κεριού (lost wax). Η διαδικασία αυτή τα παλαιότερα χρόνια χρησιμοποιούταν για την παραγωγή περίπλοκων κοσμημάτων. Η χύτευση ακριβείας είναι η πιο ευέλικτη από τις μεθόδους ακριβείας και έχουν περίπλοκες μορφές. Εφαρμόζεται για ένα μεγάλο αριθμό κραμάτων μετάλλων.

Για την χύτευση ακριβείας έχουμε δύο ιστορικές αναδρομές. Η πρόσφατη ιστορική αναδρομή αναφέρεται στην βιομηχανική χρήση της μεθόδου η οποία αναπτύχθηκε κατά την διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου και εστιάστηκε μετά στην παραγωγή πτερυγίων στροβιλομηχανών και στοιχείων της αεροναυπηγικής. Η δεύτερη αναφέρεται στην ιστορία της μεθόδου όπου είναι στα αρχαία χρόνια που την χρησιμοποιούσαν για την παραγωγή κοσμημάτων, αγαλμάτων και άλλων περίπλοκων αντικειμένων των αρχαίων πολιτισμών.

Για την χύτευση ακριβείας τα νεότερα χρόνια δημιουργήθηκαν υπερβολικές προσδοκίες ως προς τις ιδιότητες των παραγόμενων αντικειμένων. Αυτές οι προσδοκίες οδήγησαν πολλούς μηχανικούς να πιστεύουν ότι η χύτευση ακριβείας θα αντικαταστήσει τις μεθόδους μηχανουργικής κατεργασίας. Πολλά τεχνικά άρθρα δίνουν ανοχές διαστάσεως της τάξεως 0,0001 mm. Στην πραγματικότητα ανοχές της τάξεως 0,0023-0,005 mm είναι δύσκολο να επιτευχθούν. Σαν αποτέλεσμα η μέθοδος καθ' υπερβολή θεωρείται ανταγωνιστική των μοντέρνων μεθόδων μηχανουργικής κατεργασίας.

Η χύτευση ακριβείας ήρθε για να δώσει οικονομικές λύσεις σε δύσκολα υλικά κατασκευάσιμα, με τις άλλες μεθόδους παραγωγής.

Ιστορική περίοδος από 1897 έως 1932

Το κέρινο μοντέλο υιοθετήθηκε από την οδοντιατρική και την χειρουργική ιατρική στην διάρκεια του περασμένου αιώνα για την παραγωγή με την χύτευση ακριβείας περίπλοκων μορφών. Ο B. F. PHIBOOK από την Iowa ήταν ο πρώτος που χρησιμοποίησε την μέθοδο χαμένου κεριού για την παραγωγή των χρυσών γεμισμάτων και σφραγισμάτων.

Ιστορική περίοδος από 1932 έως 1949

Οι τεχνικές για μαζική παραγωγή όμοιων κέρινων αντικειμένων ήταν απαραίτητες για να γίνει η μέθοδος χρήσιμη και για άλλες πρακτικές εφαρμογές. Στην Αμερική ο Charles H. Prange ανακάλυψε ότι μπορούσε να παράγει εκατοντάδες όμοιων αντικειμένων. Αυτό μπορούσε να το πετύχει με την δημιουργία εκατοντάδων όμοιων κέρινων αντικειμένων τα οποία παράγονταν χύνοντας κεριά μέσα σε καλούπι το οποίο έδινε την επιθυμητή μορφή στο ρευστό κεριά.

Διάφορα υλικά είχαν χρησιμοποιηθεί για το καλούπι του κεριού. Ένα από αυτά ήταν και το καουτσούκ, το οποίο ήταν φθηνό και εύκολο να παραχθεί. Αυτό χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα για την παραγωγή μικρών κέρινων ποσοτήτων, αντιγράφων όταν το επιτρέπουν οι διαστάσεις των κομματιών. Μία άλλη τεχνική ήταν η κατασκευή από μαλακά μέταλλα τα οποία είχαν καλύτερες ανοχές και αντοχές. Και οι δύο τεχνικές απαιτούν την ύπαρξη ενός κυρίου πρωτοτύπου από το οποίο θα παραχθεί η επιθυμητή κοιλότητα στο καλούπι.

Η Austenal Laboratories ανέπτυξε ακόμα ένα κράμα κοβαλτίου το οποίο ήταν αδρανές όταν εμφυτευόταν στο ανθρώπινο σώμα. Αυτό το κράμα ονομαζόταν «*vitallium*» και σύντομα θα γινόταν το κράμα από το οποίο θα φτιάχνονταν πολλά χειρουργικά επιδιορθωτικά μέρη του ανθρώπινου σώματος. Σύντομα θα έβρισκε εφαρμογή και σε οδοντιατρικά εργαλεία και αντικατάσταση οστών. Επίσης έχουν γίνει έρευνες για την κατασκευή κεριού από ειδικά μείγματα για τον έλεγχο των διαστάσεων και των ανοχών.

Με την αρχή του Β' Παγκοσμίου Πολέμου υπήρξε έντονο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη κινητήρων με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ώστε να είναι ικανά τα αεροπλάνα να πετούν σε μεγαλύτερα ύψη. Υπήρξαν πολλές δοκιμές σε νέα κράματα με υψηλή μηχανική αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες. Τα κράματα αυτά όμως δεν ήταν δυνατόν να υποστούν μηχανουργική κατεργασία και σφυρηλάτηση.

Αυτό έστρεψε το ενδιαφέρον στην μέθοδο της χύτευσης ακριβείας και ιδιαίτερος στην ανάπτυξη της για την δημιουργία των πτερυγίων των στροβιλομηχανών. Το 1940 υπήρξε συνεργασία μεταξύ του Austenal Laboratories και της General Electric. Σημαντικές εταιρίες όπως η Ford Motor, Allis – Chalmers, International Nickel, πήραν άδεια από την Austenal Laboratories και την General Electric για μαζική παραγωγή με την μέθοδο αυτή. Εκατομμύρια πτερύγια για

στροβίλους παρήχθησαν με τη μέθοδο αυτή. Πριν το τέλος του πολέμου ένα σχέδιο για την παραγωγή πτερυγίων έφτασε σε αριθμό ρεκόρ της τάξεως των 2.100.000 χυτών.

Ιστορική περίοδος από 1949 έως 1957

Κατά την διάρκεια της δεκαετίας του '50 η χύτευση ακριβείας πήρε νέα κατεύθυνση. Το κεραμικό καλούπι αντικατέστησε τα στερεά καλούπια που χρησιμοποιούνταν για τη μέθοδο. Το 1957 η Coming Glass Works ανακάλυψε και διέθεσε στην αγορά μία νέα τεχνική που ονομαζόταν «*Glascast*». Συγχρόνως η Wert Own Arsenal ανέπτυξε μία που ονομαζόταν «*Sintered Alumina Mold*». Και οι δύο μέθοδοι αναγνωρίστηκαν σαν γνήσια κεραμικά καλούπια για την χύτευση ακριβείας.

Για την χύτευση ακριβείας υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές τεχνικές όσον αφορά στην επένδυση με το κεραμικό καλούπι. Αυτές οι τέσσερις διαδικασίες χρησιμοποιούνται και σήμερα.

Η πρώτη διαδικασία χαρακτηρίζεται από το υλικό του κυρίου επικαλύμματος το οποίο στεγνώνει στον αέρα και βρίσκεται σε δύο στρώσεις. Το υλικό αυτό ονομάζεται *colloidal – silica – sol*. Μετά από την πρώτη στρώση ακολουθεί η δεύτερη η οποία στεγνώνει στον αέρα από *ethyl – silicate*.

Η δεύτερη διαδικασία διαφοροποιείται στο ότι όλη η επένδυση αποτελείται από *colloidal – silica – sol*, και στεγνώνει στον αέρα.

Η τρίτη τεχνική χαρακτηρίζεται από τη χρήση μίας εναλλασσόμενης εμβάπτισης σε διάλυμα από όξινη και αλκαλική ουσία. Παραλλαγή αυτής της τεχνικής χρησιμοποιείται και σήμερα.

Η τέταρτη διαδικασία περιλαμβάνει την επένδυση που αποτελείται ολόκληρη από *ethyl – silicate* και επίσης στεγνώνει στον αέρα.

Η μέθοδος με το στερεό καλούπι χρησιμοποιείται ακόμα για την παραγωγή κοσμημάτων και χειρουργικών οργάνων, αλλά χρησιμοποιείται λιγότερο στην αεροναυπηγική και στην παραγωγή εμπορικών εφαρμογών.

2.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΥΤΕΥΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

2.4.1 Παραγωγή κέρινου αντιγράφου

Η διαδικασία κατασκευής ενός προϊόντος με τη μέθοδο της χύτευσης ακριβείας ξεκινάει με την παραγωγή ενός αναλώσιμου (συνήθως από κεριά). Το κέρινο αντίγραφο κατασκευάζεται με ψεκασμό του ρευστού κεριού στο «καλούπι αντιγράφου». Συνήθως το καλούπι αυτό κατασκευάζεται με μηχανουργική κατεργασία από αλουμίνιο ή χάλυβα. Όσο πιο περίπλοκο είναι το αντικείμενο κατασκευής, τόσο πολύπλοκο είναι και το καλούπι. Τα μεγάλα και περίπλοκα αντικείμενα διαιρούνται σε τμήματα, φτιάχνονται ξεχωριστά τα αντίγραφα των τμημάτων αυτών και στη συνέχεια γίνεται η συναρμολόγηση αυτών για να αποτελέσουν το ενιαίο κομμάτι. Το ενιαίο αυτό μοντέλο αποτελεί το αναλώσιμο αντίγραφο που θα χρησιμοποιηθεί στην μέθοδο της χύτευσης ακριβείας.

Όταν η κατασκευή του καλουπιού ολοκληρωθεί, μπορούν να παραχθούν από αυτό πολλά αναλώσιμα αντίγραφα. Το κέρι τροφοδοτείται στο καλούπι σε μορφή πάστας ή σε υγρή μορφή. Το είδος της μηχανής τροφοδοσίας εξαρτάται από τη μορφή που θα τροφοδοτηθεί το κέρι. Μερικές μηχανές είναι πλήρως αυτοματοποιημένες και πολύπλοκα κομμάτια είναι εύκολο να κατασκευαστούν χωρίς καμία δυσκολία. Ενώ η πλειοψηφία των μηχανών λειτουργεί χειροκίνητα.

Για την παραγωγή των αντιγράφων μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα υλικά όπως το πλαστικό, η συνθετική ρητίνη ή πολυστυρένιο, όμως η πλειοψηφία των υλικών που χρησιμοποιούνται στην χύτευση ακριβείας είναι μείγμα κεριού. Το μείγμα είναι το συνθετικό κέρι, κέρι ζώων, φυτών και πρόσθετα ρητίνης.

2.4.2 Συναρμολόγηση σε δένδροειδή σχηματισμό

Τα περισσότερα αναλώσιμα αντίγραφα παράγονται με σχηματισμένο ένα είδος προβόλου σε κατάλληλο σημείο της δομής τους. Ο πρόβολος αυτός χρησιμοποιείται για να γίνει η στερέωση των αντικειμένων γύρω από τον κεντρικό κορμό. Ο κορμός αυτός και οι πρόβολοι στα αντικείμενα θα χρησιμοποιηθούν ως δίοδοι για την

μεταφορά του χυτού μετάλλου στο κυρίως τμήμα του αντιγράφου. Η προσαρμογή του κέρινου αντιγράφου στον κορμό πραγματοποιείται με τοπικό λιώσιμο του κεριού στα σημεία επαφής.

Με την συναρμολόγηση αυτή δημιουργείται ένα είδος δενδροειδούς συμπλέγματος. Υπάρχουν πολλά είδη τέτοιων σχηματισμών. Τα μεγαλύτερα αντικείμενα συναρμολογούνται σε τέτοιου είδους σχηματισμούς, ένα ή δύο ανάλογα με το μέγεθός τους. Σε αντίθεση με τα μικρότερα που μπορούν να συναρμολογηθούν κατά εκατοντάδες σε κάθε ένα τέτοιο σύμπλεγμα.



Σχήμα 2.2 Συναρμολόγηση κέρινων αντιγράφων σε δενδροειδή σχηματισμό

Στα περισσότερα χυτήρια η συναρμολόγηση είναι η λιγότερη αυτοματοποιημένη εργασία κάνοντας έτσι την χύτευση ακριβείας μια εφαρμογή με χαμηλό επίπεδο χρήσης νέων τεχνολογιών. Πρόσφατα έχουν γίνει σε εργαστήρια προσπάθειες για την εφαρμογή αυτοματοποιημένων μεθόδων με τη χρήση λέιζερ για την κόλληση αντιγράφων στον κορμό, καθώς και αυτόματη μεταφορά του σχηματισμού με χρήση ρομπότ.

2.4.3 Μέθοδοι κατασκευής επένδυσης

2.4.3.1 Επένδυση με στερεό μπλοκ (*Block Solid Mold*)

Η αρχέτυπη χύτευση ακριβείας χρησιμοποιεί ένα καλούπι σε μορφή μπλοκ. Σε αυτήν την διαδικασία τα συναρμολογημένα αναλώσιμα αντίγραφα τοποθετούνται μέσα σε ένα μεταλλικό δοχείο. Στη συνέχεια ρίχνεται γύρω από αυτό ένα ειδικό

δύστηκτο κολλητικό διάλυμα. Το όλο σύστημα στη συνέχεια δονείται κατάλληλα ώστε το υλικό επένδυσης να καλύψει πλήρως όλο το σχηματισμό των αντιγράφων έτσι ώστε να μην υπάρχουν καθόλου κενά με αέρα.

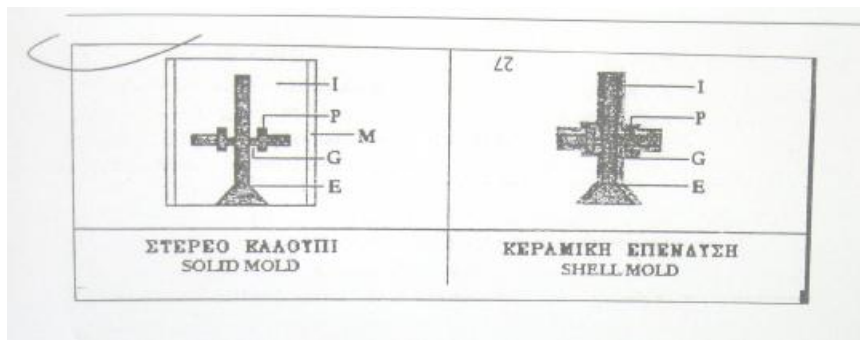
Στη συνέχεια το όλο σύστημα οδηγείται σε ένα φούρνο χαμηλής θερμοκρασίας για να λιώσει το κερί και να αφαιρεθεί πλήρως από το καλούπι, ενώ το καλούπι ψήνεται σε χαμηλή θερμοκρασία. Με το ψήσιμο αυτό αφαιρείται πλήρως το κερί αλλά και προθερμαίνεται το καλούπι για να εισέλθει στη συνέχεια το ρευστό μέταλλο. Συχνά το καλούπι γεμίζει με το ρευστό μέταλλο σε ένα τραπέζι κενού. Αυτό επιτρέπει και στις λεπτές διατομές να γεμίζουν πλήρως με το ρευστό μέταλλο.



Σχήμα 2.3 Πλήρωση καλουπιού σε τραπέζι κενού

2.4.3.2 *Επένδυση με κεραμικό καλούπι (Ceramic Shell Process)*

Η διαδικασία με το κεραμικό καλούπι είναι η πιο καινούργια μέθοδος και η περισσότερη χρησιμοποιούμενη για την παραγωγή προϊόντων με την μέθοδο της χύτευσης ακριβείας. Με τη μέθοδο αυτή έχουμε την επικάλυψη του σχηματισμού των αντιγράφων με κεραμική επένδυση πάχους μερικών χιλιοστών, συνήθως 6-8 χιλιοστά. Οι σχηματικές παραστάσεις των δύο μεθόδων παρατηρούνται στο Σχήμα 2.2.3.2.1. Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία παραγωγής χυτών προϊόντων με τη μέθοδο με το κεραμικό καλούπι.

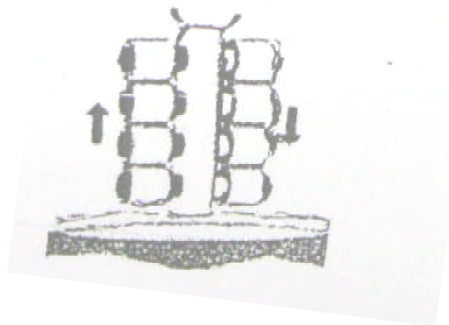


Σχήμα 2.4 Σχηματική παρατήρηση των μεθόδων για το στερεό καλούπι: I επένδυση καλουπιού, P κέρινο αντίγραφο, M χαλύβδινο δοχείο, G εισαγωγή χυτού στο αντίγραφο, E εισαγωγή μετάλλου στον κορμό. Για την κεραμική επένδυση: I κεραμική λεπτότοιχη επένδυση, P κέρινο αντίγραφο, G εισαγωγή χυτού στο αντίγραφο, E εισαγωγή μετάλλου στον κορμό

2.4.4 Διαδικασία παραγωγής χυτών με την χύτευση ακριβείας με χρήση κεραμικού καλουπιού

Δημιουργία κεραμικής επένδυσης

Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής της κεραμικής επένδυσης του καλουπιού.



Σχήμα 2.5 Βύθιση του σχηματισμού στο κεραμικό διάλυμα

Ο δένδροειδής σχηματισμός των αντιγράφων βυθίζεται σε κεραμικό υδατοδιαλυτό διάλυμα το οποίο περιέχει συνθετικά από ένα κολλητικό σιλικόνης (κολοειδικό διοξείδιο του πυριτίου) και από ένα δύστηκτο υλικό. Το διάλυμα παραμένει σε καλή κατάσταση με συνεχείς αναδεύσεις με ένα περιστρεφόμενο μοχλό που βρίσκεται μέσα στο δοχείο. Η βύθιση μέσα στο διάλυμα γίνεται δύο με τρεις

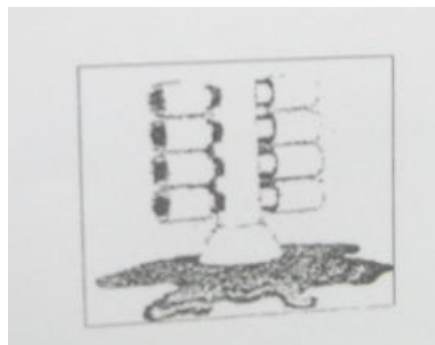
φορές, στη συνέχεια στραγγίζεται και παρατηρείται αν υπάρχουν τυχόν σφάλματα στην επικάλυψη. Η επικάλυψη με το υδατοδιαλυτό διάλειμμα είναι μεγάλης σημασίας γιατί αυτή δίνει στο κέλυφος την καλή εσωτερική επιφάνεια και τις λεπτομέρειες.

Τα τυχόν σφάλματα επιδιορθώνονται και στην συνέχεια ακολουθεί επικάλυψη με υλικό αυξανόμενης κοκκομετρίας για αυξανόμενη αντοχή και συνοχή του κελύφους. Η επικάλυψη αυτή μπορεί να γίνει σε ένα ή δύο στάδια, ανάλογα με το υλικό επένδυσης που επιλέγεται. Δηλαδή στο πρώτο στάδιο γίνεται επικάλυψη με το υλικό **κοκκόμετρίας** περίπου 0,8 – 1,0 mm ενώ στο δεύτερο στάδιο γίνεται με υλικό **κοκκόμετρίας** περίπου 1,2 – 1,4 mm. Ακολουθεί στέγνωμα σε συνθήκες υγρασίας 50% και θερμοκρασίας 25 βαθμών Κελσίου διάρκειας 3 ωρών.

Μετά το στέγνωμα η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για 7 με 8 φορές, ανάλογα με το πάχος που θέλουμε να δώσουμε στο κέλυφος. Μετά το τέλος της επικάλυψης η επένδυση αφήνεται να στεγνώσει σε συνθήκες που αναφέραμε πιο πάνω για 2 με 3 μέρες.

Αφαίρεση κεριού

Όταν η κατασκευή του κεραμικού καλουπιού έχει ολοκληρωθεί, το κεριό λιώνει και αφαιρείται. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος για την αφαίρεση του κεριού είναι με την χρήση κλίμανου ατμών. Ο κλίβανος δημιουργεί πίεση της τάξεως 4,2–8,4 bar, η όλη διαδικασία γίνεται με την θερμοκρασία να είναι στους 180 βαθμούς Κελσίου. Η διαδικασία αυτή διαρκεί 1-2 ώρες. Σε όλη αυτή την διαδικασία ο ατμός που ψεκάζεται μέσα στον κλίβανο θερμαίνει το κεριό μέχρι αυτό να λιώσει και να απομακρυνθεί μέσα από το κεραμικό καλούπι.



Σχήμα 2.6 Σχηματική παράσταση της αφαίρεσης του κεριού

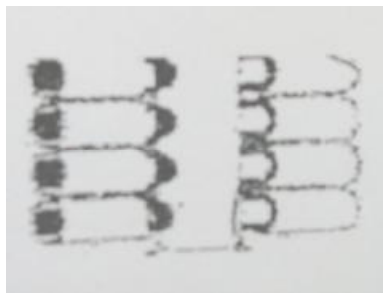
Μία άλλη μέθοδος είναι η Flash Fire Dewaxing. Ο στεγνός σχηματισμός τοποθετείται μέσα στο φούρνο στους 650 – 980 βαθμούς Κελσίου. Καθώς το κερί λιώνει πέφτει δια μέσο του κυρίου κορμού στον πάτο του φούρνου.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μία μέθοδος για την απομάκρυνση του κεριού με την χρήση μικροκυμάτων. Το υψηλό κόστος απόκτησης του εξοπλισμού εμποδίζει την ανάπτυξη και την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου.

Ψήσιμο κελύφους

Το κεραμικό καλούπι ψήνεται για την απόκτηση μεγαλύτερης αντοχής, έχουν προθέρμανση και μετακίνηση των παραμένων οργανικών υπολειμμάτων μέσα στο καλούπι κατά την απομάκρυνση του κεριού. Το ψήσιμο του γίνεται συνήθως σε θερμοκρασία 1000 βαθμών Κελσίου για ελάχιστη διάρκεια 45 λεπτών.

Το ψήσιμο και η προθέρμανση εξαρτάται από το υλικό του καλουπιού καθώς και από τον τύπο του μετάλλου που θα χύσουμε μέσα σε αυτό. Το αλουμίνιο συνήθως χύνεται στους 600 – 700 βαθμούς Κελσίου, ενώ για χάλυβα η θερμοκρασία καλουπιού είναι 900 – 1000 βαθμούς Κελσίου. Η θέρμανση και η προθέρμανση πραγματοποιούνται σε φούρνο. Τα χυτήρια με υψηλές απαιτήσεις χρησιμοποιούν φούρνο αυτοματοποιημένο και συνεχόμενο ψήσιμο και χύτευση.



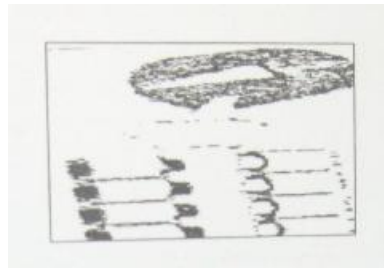
Σχήμα 2.7 Καύση κελύφους σε φούρνο

Τήξη μετάλλου και χύτευση

Κάθε μέταλλο που μπορεί να λιώσει μπορεί και να χυτευθεί μέσα σε ένα κεραμικό καλούπι. Συνήθως χρησιμοποιείται λιώσιμο με επαγωγή διότι αυτή είναι γρήγορη και αποδοτική, ενώ επιτρέπει την μέγιστη ευελιξία στην αλλαγή των μετάλλων. Τα μέταλλα και η συμπεριφορά τους στην χύτευση ακριβείας

παρουσιάζονται σε παρακάτω κεφάλαιο. Για την εισαγωγή του ρευστού στο καλούπι χρησιμοποιούνται τέσσερις τεχνικές: το στατικό χύσιμο, roll – over, inter atmosphere και vacuum melting.

Ο αυτοματισμός όλων αυτών των διαδικασιών του λιώσιματος και της εισόδου του ρευστού από τα χυτήρια, αναπτύσσονται και είναι πιθανόν η μελλοντική εντονότερη εφαρμογή τους.

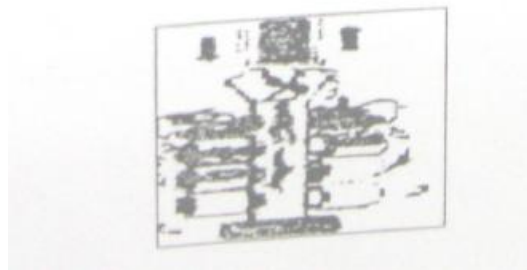


Σχήμα 2.8 Σχηματική παράσταση της χύτευσης

Σπάσιμο κελύφους

Αφού το κέλυφος έχει κρυώσει και το μέταλλο έχει στερεοποιηθεί αφαιρείται κατάλληλα η κεραμική επένδυση από τον σχηματισμό των κομματιών.

Στις περισσότερες περιπτώσεις ένα πνευματικό σφυρί χρησιμοποιείται για να σπάσει το κέλυφος.



Σχήμα 2.9 Σχηματική παράσταση του σπάσιμου του κελύφους

Τελική μηχανουργική κατεργασία

Μετά το σπάσιμο του κεραμικού καλουπιού αφαιρούνται τα μεταλλικά προϊόντα από τον σχηματισμό. Η αφαίρεση γίνεται με κόψιμο αυτών από τον κορμό του σχηματισμού. Μετά την αφαίρεσή τους ακολουθεί η μηχανουργική κατεργασία όπου είναι και αναγκαία για την τελειοποίησή τους. Μετά το κόψιμο ακολουθεί η λείανση όπου χρειάζεται και στο τέλος επιθεώρηση του κομματιού για τυχόν ατέλειες στην δομή του. Τα μέσα που χρησιμοποιούμε για τις κατεργασίες αυτές είναι όμοια όπως και στις άλλες μεθόδους.



Σχήμα 2.10 Σχηματική παράσταση της αφαίρεσης των κομματιών από το σχηματισμό και το τελειώμά τους

2.4.5 Συνοπτική παρουσίαση της χύτευσης ακριβείας

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά μερικά από τα αντικείμενα που πραγματοποιούνται με την χύτευση ακριβείας.



Σχήμα 2.11

Όπως και μερικά τεχνικά χαρακτηριστικά για διάφορα είδη χαλύβων.

2.4.6 Εφαρμογές νέων τεχνολογιών

Ο ανταγωνισμός της σύγχρονης βιομηχανικής πραγματικότητας επιβάλλει την χρήση νέων τεχνολογιών σε όλο και περισσότερες εφαρμογές. Στόχος όλων των προσπαθειών είναι η μείωση του κόστους ανάπτυξης και παραγωγής των νέων προϊόντων.

Η χύτευση ακριβείας ή αλλιώς χύτευση χαμένου κεριού είναι μία εργασία με ιδιαίτερα χαμηλό δείκτη χρήσης τέτοιων καινοτόμων τεχνολογιών. Τα τελευταία όμως χρόνια μία σειρά νέων τεχνολογικών εφαρμογών λαμβάνει ιδιαίτερη θέση κατά την διάρκεια παραγωγής ενός προϊόντος με την χύτευση ακριβείας. Αυτές οι τεχνολογίες βοηθούν το μηχανικό τόσο κατά την ανάπτυξη του προϊόντος, όσο και κατά την παραγωγή του.

Σε αυτήν περιλαμβάνονται μέθοδοι ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων για την ταχύτερη, οικονομικότερη και καλύτερη ανάπτυξη νέων προϊόντων. Επίσης η χρήση ρομπότ σε ορισμένα στάδια της παραγωγής



Σχήμα 2.12 Διάγραμμα χρήσης νέων τεχνολογιών στην εξέλιξη και παραγωγή νέων προϊόντων με την μέθοδο της χύτευσης ακριβείας

2.5 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΝΟΧΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΤΗ ΧΥΤΕΥΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

2.5.1 Εισαγωγή

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της χύτευσης ακριβείας είναι ο υψηλός βαθμός σχεδιαστικής ελευθερίας που προσφέρει η μέθοδος. Αντικείμενα με περίπλοκα σχήματα των οποίων η κατασκευή με μηχανουργική κατεργασία θα απαιτούσε υψηλό κόστος, αντίθετα τώρα μπορούν να κατασκευαστούν σύντομα και οικονομικά με την

χύτευση ακριβείας. Επίσης σε πολλές περιπτώσεις αντικείμενα που θα μπορούσαν να κατασκευασθούν με άλλες μεθόδους σε δύο ή περισσότερα τμήματα, με την χύτευση ακριβείας μπορούν να σχεδιαστούν και να παραχθούν σαν ένα προϊόν.

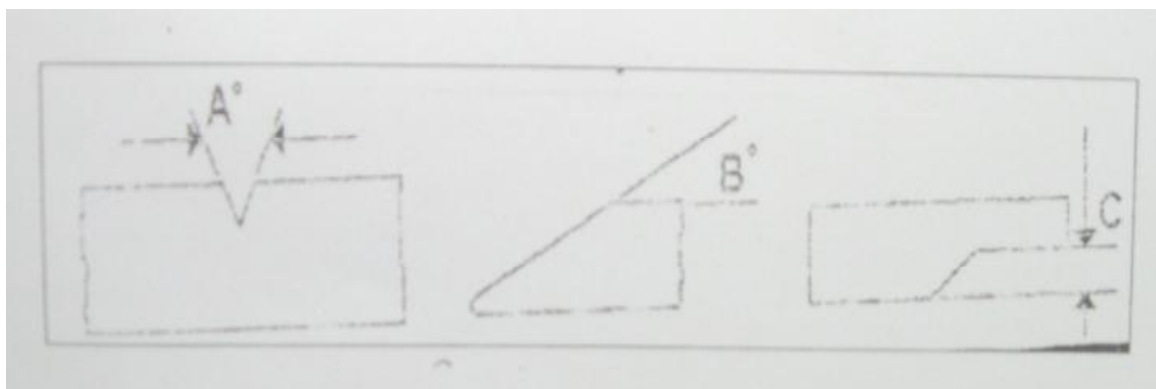
Επίσης με την μέθοδο αυτή κατασκευάζονται αντικείμενα από μία ευρεία περιοχή μεταλλικών κραμάτων.

Πολλές μεταβλητές όπως το βάρος, το μέγεθος, το υλικό χύτευσης, η πολυπλοκότητα της μορφής του επηρεάζουν τις ανοχές του υπό κατασκευή προϊόντος.

Ο πλέον σημαντικός παράγοντας που παίζει ρόλο στην ακρίβεια των διαστάσεων είναι η συστολή του μετάλλου από την ρευστή κατάσταση της χύτευσης στην στερεή κατάσταση του αντικειμένου και την απόψυξη του σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το κέρινο ή το πλαστικό αντίγραφο, το υλικό της επένδυσης είναι παράγοντες που επηρεάζουν επίσης την ακρίβεια της κατασκευής. Πιο κάτω αναφέρονται οι κυριότεροι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό ενός αντικειμένου το οποίο θα παραχθεί με την χύτευση ακριβείας.

2.5.2 Γραμμικές ανοχές

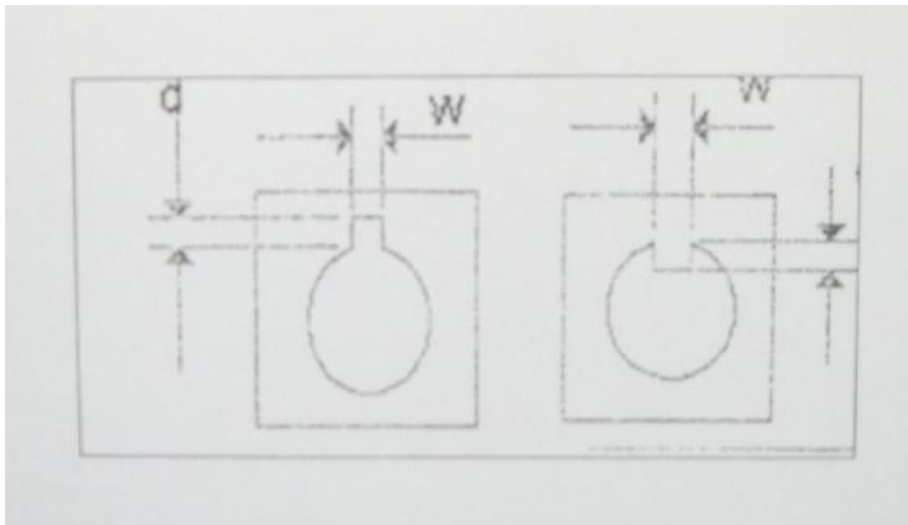
Οι ανοχές για τις γωνίες, οι γενικές διαστάσεις και άλλες δεικνύονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.13 Ανοχές για την γωνία A ($\pm 1,5^\circ$), για την γωνία B ($\pm 0,5^\circ$) και για τις παράλληλες μία απόκλιση της παραλληλότητας ($\pm 2^\circ$)

2.5.3 Αυλακώσεις - Αύλακες (Σφηναύλακες)

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η μορφή των αντικειμένων που ονομάζουμε αυλακώσεις και αύλακες καθώς και τα μεγέθη αναφοράς κατά το σχεδιασμό τους για την κατασκευή αυτών με την χύτευση ακριβείας.



Σχήμα 2.14 Τα μεγέθη που παρουσιάζονται θα πρέπει να έχουν λόγο w/d ίσο με 1 ή και περισσότερο. Για τα σιδηρούχα μέταλλα ο οδηγός δεν μπορεί να είναι στενότερος από 2,3 mm (0.090 in) και για τα μη σιδηρούχα από 105 mm (0.060 in)

2.5.4 Δημιουργία Σπειρώματος

Με την χύτευση ακριβείας είναι δυνατή η παραγωγή ενός κομματιού με σπείρωμα εσωτερικό ή εξωτερικό. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως αυτή η μέθοδος αποφεύγεται και τα σπειρώματα δημιουργούνται με μηχανουργικό τρόπο μετά την παραγωγή του κομματιού. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται κυρίως για δύο λόγους:

1. Κατά την δημιουργία σπειρώματος με την χύτευση ακριβείας μετά την κατασκευή του προϊόντος απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία του σπειρώματος για να τελειοποιηθεί η επιφάνειά του και να αυξηθεί η ακρίβεια των διαστάσεων.

2. Επίσης η παραγωγή του κέρινου αντιγράφου με σπείρωμα είναι μία περίπλοκη διαδικασία και γίνεται μετά την κατασκευή του αντιγράφου του αντικειμένου.

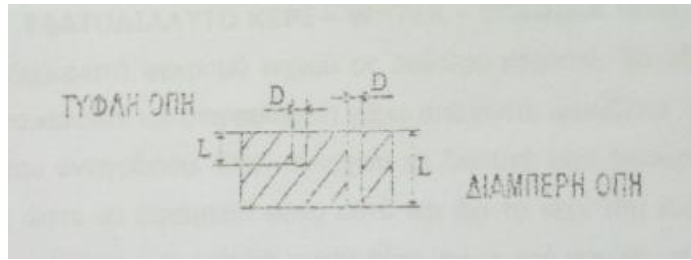
2.5.5 Τυφλές και διαμπερείς οπές

Η ύπαρξη τυφλών οπών στα κομμάτια που θα κατασκευασθούν με την μέθοδο της χύτευσης ακριβείας δεν συνιστάται. Η παρουσία αυτών δημιουργεί προβλήματα κατά την διαδικασία της επένδυσης του αντιγράφου με το κεραμικό.

Κατά την διαδικασία αυτή θα πρέπει το υλικό της επένδυσης να μπει μέσα στην οπή και να την καλύψει κατάλληλα. Η μη σωστή κάλυψη της οπής με το υλικό της επένδυσης έχει σαν αποτέλεσμα το τοίχωμα της επένδυσης σε αυτό το σημείο να είναι αδύνατο και να καταρρέει.

Ωστόσο αν οι οπές είναι απαραίτητες τότε θα πρέπει να προσέξουμε ότι το βάθος αυτών δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από την διάμετρο αυτών. Μία ένδειξη των μεγεθών αυτών για την κατασκευή των τυφλών οπών έχουμε στον παρακάτω Πίνακα 2.3.5.1

Ανάλογες είναι και οι προϋποθέσεις για την κατασκευή κατά την κατασκευή διαμπερών οπών. Σε πολλές περιπτώσεις η χύτευση διαμπερών οπών είναι πιο οικονομική από την έπειτα κατεργασία αυτών με μηχανουργικούς τρόπους. Οι δυσκολίες που παρουσιάζονται κατά την κατασκευή των τυφλών οπών τις συναντάμε και στις διαμπερές οπές. Υπάρχει μία σχέση μεταξύ της διαμέτρου αυτής και του μήκους της που προτείνεται για την καλύτερη κατασκευή της. Ο λόγος μήκους της προς την διάμετρο L/D δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από 4/1 για τα σιδηρούχα μέταλλα και 5/1 για το αλουμίνιο και το χαλκό, Σχήμα 2.15. Μία ένδειξη των σχεδιαστικών απαιτήσεων έχουμε στον Πίνακα 2.2



Σχήμα 2.15 Παρουσίαση του προϊόντος με τα μεγέθη των οπών

ΤΥΦΛΗ ΟΠΗ ΣΙΔΗΡΟΥΧΑ ΜΜ-(IN) MAX	ΤΥΦΛΗ ΟΠΗ ΜΗ ΣΙΔΗΡΟΥΧΑ ΜΜ- (IN) MAX	ΔΙΑΜΠΕΡΗΣ ΣΙΔΗΡΟΥΧΑ ΜΜ-(IN) MAX	ΔΙΑΜΠΕΡΗΣ ΜΗ ΣΙΔΗΡΟΥΧΑ ΜΜ- (IN)MAX
-	-	-	0.80 - (0.030)
-	0.80 - (0.030)	1.50 - (0.060)	2.30 - (0.090)
0.80 - (0.30)	2.30 - (0.090)	6.40 - (0.250)	9.50 - (0.375)
1.50 - (0.060)	6.40 - (0.250)	12.70 - (0.500)	16.00 - (0.625)
6.40 - (0.250)	9.50 - (0.375)	19.00 - (0.750)	22.30 - (0.875)
12.70 - (0.500)	12.70 - (0.500)	25.50 - (1.000)	32.00 - (1.250)
16.00 - (0.625)	25.50 - (1.000)	38.00 - (1.500)	51.00 - (2.000)
19.00 - (0.750)	38.00 - (1.500)	64.00 - (2.500)	64.00 - (2.500)

Πίνακας 2.2 Πίνακας με τα μήκη των διαμέτρων και του βάθους των τυφλών και διαμπερών οπών

Με βάση της τυφλής οπής προτιμάται ένας σφαιρικός σχηματισμός ο οποίος βοηθάει στην καλύτερη κάλυψη από το υλικό επένδυσης. Για την χύτευση οπών ακολουθείται μία από τις παρακάτω μεθόδους:

1. **ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΕΝΘΕΤΟ – DIE INSERT (METAL)**. Με την μέθοδο αυτή γίνεται εισαγωγή στο κέρινο αντίγραφο μεταλλικού ένθετου στοιχείου. Το αντικείμενο αυτό αποτελεί τη βάση, με την οποία θα δημιουργηθεί η οπή στο μεταλλικό προϊόν της χύτευσης.

2. **ΥΔΑΤΟΔΙΑΛΥΤΟ ΚΕΡΙ – WATER – SOLUBLE WAX.** Αυτή η μέθοδος απαιτεί ένα ξεχωριστό ψεκασμό κεριού σε δεύτερο καλούπι. Το υδατοδιαλυτό κεριό ψεκάζεται στο καλούπι και στη συνέχεια γύρω από αυτό, ψεκάζεται το κυρίως κεριό με την μορφή του αντιγράφου. Στην συνέχεια το διαλυτό κεριό αφαιρείται με διήθηση. Ένας τρόπος ώστε να αφαιρεθεί μόνο αυτό και όχι το κεριό του κυρίως αντιγράφου είναι κατά την αφαίρεση του να μένει στη θέση του η οπή που θα κατασκευασθεί στο προϊόν της χύτευσης. Και σε αυτήν την μέθοδο θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί για την διάμετρο και το βάθος της οπής.

3. **ΚΕΡΑΜΙΚΟΙ ΠΥΡΗΝΕΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ – PREFORMENT CERAMIC CORES.** Με την μέθοδο αυτή προσχηματισμένοι κεραμικοί πυρήνες εισάγονται σε κέρινο αντίγραφο. Η εισαγωγή γίνεται με την τοποθέτηση των πυρήνων στο καλούπι κατασκευής του κέρινου αντιγράφου. Στη συνέχεια ψεκάζεται το κεριό για την δημιουργία του αντιγράφου. Σε αντίθεση με το διαλυτό κεριό οι πυρήνες δεν αφαιρούνται και μένουν εκεί και μετά την αφαίρεση του κέρινου αντιγράφου, δίνοντας έτσι την τελική μορφή του αντιγράφου μετά το σπάσιμο της επένδυσης.

2.5.6 Παράλληλα Επίπεδα

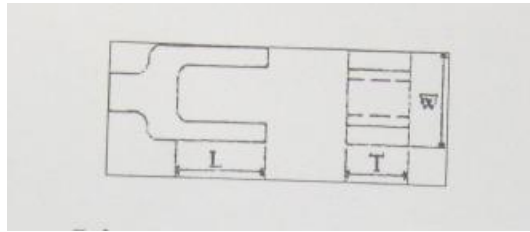
Η παραλληλότητα των επιπέδων που παρουσιάζονται στο κομμάτι μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Οι δύο κατηγορίες είναι:

α) μορφή δίχαλου – Σχήμα 2.16 και

β) μορφή σφικτήρα – Σχήμα 2.17

στο Σχήμα 2.16 παρουσιάζεται η μορφή του κομματιού και τα μεγέθη αναφοράς L , W , T . Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζεται η εξάρτηση των παραπάνω μεγεθών.

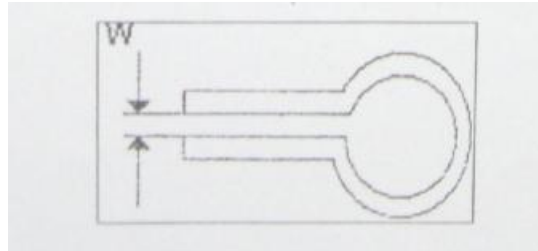
Για την μορφή του αντικειμένου που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.17 το μέγεθος αναφοράς είναι το W όπως αυτό σημειώνεται πάνω στο σχήμα. Το ελάχιστο W για σιδηρούχα μέταλλα είναι 1,5 mm ενώ για τα μη σιδηρούχα είναι 1,0 mm.



Σχήμα 2.16 Αντικείμενο με μορφή διχάλας

Πίνακας 2.3 Παρουσίαση της εξάρτησης μεταξύ των μεγεθών

Πάχος T (mm)	Ελάχιστο W (mm)
1,5	1,5
6	2,4
1	3
13	5
25	6



Σχήμα 2.17 Αντικείμενο με μορφή σφικτήρα. Το ελάχιστο άνοιγμα w για τα σιδηρούχα μέταλλα είναι 1,5 mm ή (0,060 in) και για τα μη σιδηρούχα 1,0 mm ή (0,040 in)

2.5.7 Ποιότητα Επιφανείας (Surface Finish)

Η ποιότητα της επιφανείας του τελικού προϊόντος της χύτευσης ακριβείας εξαρτάται από την τραχύτητα της κοιλότητας του κεραμικού καλουπιού. Αυτή με τη σειρά της εξαρτάται από τα υλικά κατασκευής του καλουπιού καθώς και το είδος του μετάλλου που χυτεύεται στο καλούπι.

Γενικά το κράμα με το χαμηλότερο σημείο τήξης θα παράγει προϊόν με καλύτερη επιφάνεια από ότι ένα κράμα με υψηλό σημείο τήξης. Τα μη σιδηρούχα κράματα έχουν ποιότητα επιφάνειας πολύ καλύτερη από τα σιδηρούχα κράματα.

Πίνακας 2.4 Ποιότητα τελικής επιφάνειας κατά την χύτευση ακριβείας

ΚΡΑΜΑΤΑ	RMS
Aluminium Alloys	60 – 100
Copper Alloys	60 – 100
Cobalt Chrome	80 – 100
300 Series Stainless	90 – 125
Carbon Steel	90 – 125
400 Series Stainless	100 - 125

2.5.8 Συνήθεις εφαρμογές και χαρακτηριστικά

Η διαδικασία της χύτευσης ακριβείας χρησιμοποιείται όταν τα κομμάτια που θέλουμε να κατασκευάσουμε έχουν τα εξής χαρακτηριστικά: περίπλοκες μορφές, κλειστές ανοχές, μικρό μέγεθος και κατασκευάζονται από κράματα υψηλής αντοχής. Τα μεγέθη των κομματιών που κατασκευάζονται έχουν μέγεθος από 1 gr έως 24 kgr. Η κατασκευή με την μέθοδο αυτή μεγάλων κομματιών είναι λιγότερο οικονομική διότι το κόστος των υλικών της επένδυσης είναι αρκετά υψηλό.

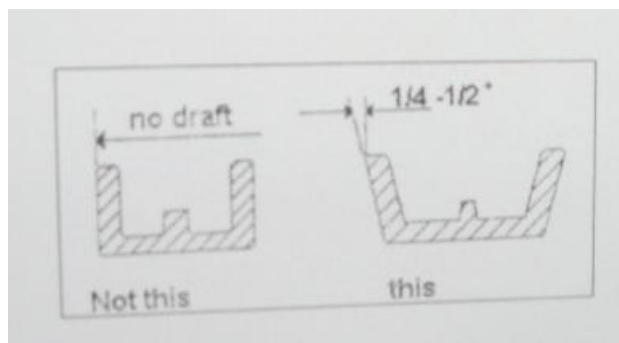
Η χύτευση ακριβείας χρησιμοποιείται όταν το κομμάτι περιλαμβάνει περίπλοκες λεπτομέρειες και η κατασκευή του με μηχανουργικό τρόπο είναι δύσκολη ή αδύνατη. Μερικά τυπικά παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδους είναι τα εξής: πτερύγια στροβιλομηχανών, βάνες, έκκεντρα, οδοντωτοί τροχοί αναστολής, φτερωτές, πολλαπλή εξάτμιση, ιατρικές προθέσεις, αεροναυπηγικό υλικό κ.λ.π.

2.5.9 Ποσότητες Παραγωγής

Η χύτευση ακριβείας χρησιμοποιείται περισσότερο για την κατασκευή μικρών, μεσαίων ποσοτήτων παραγόμενων προϊόντων. Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται και για μεγάλες παραγωγές όταν οι μηχανουργικές κατεργασίες που χρειάζονται για την κατασκευή ενός προϊόντος είναι εκτεταμένες.

2.5.10 Κλίση Χυτηρίου

Για την ευκολότερη και ομαλότερη έξοδο του αντιγράφου από το καλούπι παραγωγής του απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός του καλουπιού. Ο κατάλληλος σχεδιασμός επιτυγχάνεται με μία ελαφριά κλίση των πλευρών του κομματιού. Σαν παράδειγμα εφαρμογής της διαδικασίας έχουμε το παρακάτω Σχήμα 2.18



Σχήμα 2.18 Οι σχεδιαστικές οδηγίες για την καλύτερη έξοδο του κέρινου ή πλαστικού αντιγράφου από το καλούπι

2.5.11 Εργαλεία

Για την παραγωγή του κέρινου αντιγράφου που χρησιμοποιούμε στην χύτευση ακριβείας χρειαζόμαστε ένα καλούπι μέσα στο οποίο θα τροφοδοτηθεί το κερί. Ανάλογα με τους επιδιωκόμενους αριθμούς παραγωγής και με το στάδιο ανάπτυξης του προϊόντος αυτά χωρίζονται σε «Πρωτότυπα Εργαλεία – Prototype Tooling» και «Παραγωγικά Εργαλεία – Production Tooling».

2.5.11.1 Πρωτότυπα Εργαλεία – Prototype Tooling

Τα εργαλεία που παράγονται με αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μικρών ποσοτήτων, συνήθως μερικές εκατοντάδες. Αυτές είναι μέθοδοι χαμηλού κόστους και συνήθως απαιτούν μεγάλο χρόνο. Οι μέθοδοι και τα υλικά ποικίλουν. Παρακάτω παρουσιάζουμε τα πιο κοινά.

Καλούπι από εποξειδικά υλικά (epoxy / epoxy-aluminium molds)

Για την δημιουργία καλουπιού *epoxy* χρειάζεται ένα αλουμινένιο ή πλαστικό αντίγραφο του προϊόντος που θα κατασκευαστεί με την χύτευση ακριβείας.

Το αντίγραφο αυτό κρέμεται μέσα σε ένα δοχείο και αφού στερεωθεί κατάλληλα χύνεται μέσα σε αυτό το υλικό κατασκευής του καλουπιού *epoxy*. Το υλικό περικλείει το αντίγραφο δημιουργώντας ένα στερεό μπλοκ γύρω από αυτό.

Στη συνέχεια και αφού στερεοποιηθεί το υλικό του καλουπιού κόβουμε το καλούπι στην επιθυμητή γραμμή διαχωρισμού και αφαιρούμε από μέσα το αντίγραφο. Αποτέλεσμα είναι η δημιουργία μίας κοιλότητας μέσα στην οποία θα ψεκαστεί το κεριό. Με την μέθοδο αυτή είναι δύσκολη η κατασκευή του καλουπιού για προϊόν με περίπλοκο σχήμα. Επίσης το υλικό *epoxy* είναι καλός μονωτής της θερμότητας με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η γρήγορη πήξη του κεριού. Συνέπεια αυτού είναι ο αυξημένος χρόνος για την ολοκλήρωση της κατασκευής ενός μεγάλου αριθμού κέρινων αντιγράφων. Για να ελαττωθεί ο χρόνος παραγωγής κατασκευάζονται μέσα στο καλούπι δίοδοι, μέσα από τους οποίους περνά νερό το οποίο δρα σαν ψυκτικό απαγωγής της θερμότητας.

Καλούπι από μαλακά μέταλλα (soft metal mold)

Αυτά τα καλούπια παράγονται με τον ίδιο τρόπο που παράγονται και τα καλούπια *epoxy mold*. Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται έχουν χαμηλό σημείο τήξης. Τα πλεονεκτήματά τους είναι η καλύτερη απαγωγή θερμότητας και η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Το μειονέκτημα είναι ότι το κόστος κατασκευής τους είναι μεγαλύτερο από το κόστος κατασκευής καλουπιού *epoxy*.

Καλούπι από πλαστικό (latex metal rubber)

Αυτό του είδους τα καλούπια χρησιμοποιούνται περισσότερο στην χύτευση για την παραγωγή αντικειμένων τέχνης. Κατασκευάζεται ένα πλαστικό, κέρινο ή ξύλινο αντίγραφο του προϊόντος και στη συνέχεια καλύπτεται από *latex* το υλικό κατασκευής του καλουπιού. Όταν στεγνώσει το καλούπι αφαιρείται το αντίγραφο του προϊόντος. Στο καλούπι που έχει κατασκευαστεί τροφοδοτείται κερί για την παραγωγή κέρινων αντιγράφων. Το *latex* καλούπι χρησιμοποιείται για την τέλεια αποτύπωση των λεπτομερειών του αντικειμένου. Ωστόσο ο χρόνος που απαιτείται για την δημιουργία του είναι μεγάλος. Επίσης η διάρκεια ζωής του είναι αρκετά μικρή και διαρκεί για 10-20 χυτεύσεις περίπου.

Μηχανουργική παραγωγή κεριού

Με αυτή την μέθοδο δεν είναι απαραίτητη η δημιουργία καλουπιού. Το κέρινο αντίγραφο παράγεται με μηχανουργικό τρόπο. Με την μέθοδο αυτή έχουμε έναν γρήγορο τρόπο για την παραγωγή του αντιγράφου. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την παραγωγή μικρών ποσοτήτων κέρινων αντιγράφων.

Ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων (rapid prototyping designs)

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί νέες μέθοδοι για την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων και εργαλείων. Με τις μεθόδους αυτές μειώνεται ο χρόνος κατασκευής των αντικειμένων που θα παραχθούν με την μέθοδο της χύτευσης ακριβείας. Για την παραγωγή με αυτή τη μέθοδο είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός αρχείου 3D – CAD του τρισδιάστατου αντικειμένου που θα κατασκευαστεί. Τα χαρακτηριστικά των μεθόδων της ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων θα αναπτυχθούν παρακάτω.

2.5.11.2 Παραγωγικά Εργαλεία – Production Tooling

Για την κατηγορία των μεθόδων παραγωγής εργαλείων υπάρχουν δύο διαδικασίες οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

Μικρής – Μεσαίας παραγωγής εργαλεία (100 – 2.000 κομμάτια)

Για την παραγωγή μικρών ποσοτήτων κέρινων αντιγράφων δημιουργείται καλούπι με μηχανουργική κατεργασία το οποίο αποτελείται από διαιρετά τμήματα από αλουμίνιο ή χάλυβα. Αυτά τα καλούπια αποτελούνται από δύο τμήματα στα οποία έχουν δημιουργηθεί κατάλληλες κοιλότητες. Επιπλέον για την ταχύτερη ψύξη των κέρινων αντιγράφων μπορούν να περιλαμβάνουν και κάποιο είδος ψύξης μέσω σωληνώσεων με κυκλοφορία νερού. Η διαδικασία του ψεκασμού του κεριού είναι αυτοματοποιημένη με αρκετά μικρό χρόνο παραγωγής. Με τη μέθοδο αυτή παράγονται από 100 έως 2.000 κέρινα αντίγραφα.

Υψηλής απόδοσης εργαλεία (2.000 – 1.000.000 κομμάτια)

Για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων κέρινων αντιγράφων κατασκευάζονται καλούπια από ειδικά μέταλλα τα οποία είναι στερεά και αξιόπιστα.

Τα καλούπια είναι άκαμπτα και το κεριό ψεκάζεται μέσα στην κοιλότητα που έχει κατασκευαστεί κατάλληλα. Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται έχουν τις κατάλληλες ιδιότητες για να ανταπεξέλθουν στις συνθήκες λειτουργίας. Με την μέθοδο αυτή παράγονται από 2.000 έως 1.000.000 κέρινα αντίγραφα

2.5.11.3 Καλούπι Παραγωγής Αντιγράφου – Γραμμή Διαχωρισμού (Αρμός) – Parting Line

Το κέρινο αντίγραφο του προϊόντος που πρόκειται να κατασκευαστεί με την χύτευση ακριβείας παράγεται με την χρήση διαιρετού καλουπιού. Η γραμμή διαχωρισμού του καλουπιού (αρμός) σχηματίζεται εκεί που ενώνονται τα δύο κομμάτια του καλουπιού.

Η θέση της γραμμής διαχωρισμού είναι πολύ σημαντική για τον σωστό σχηματισμό και την σωστή κατασκευή του κέρινου αντιγράφου. Η επιλογή της κατάλληλης θέσης απαιτεί πολύ προσοχή. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι υπάρχει διαφορά στο προϊόν που θα δημιουργηθεί στο καλούπι σε διαμορφωμένα και τα δύο τμήματα και το ίδιο προϊόν αν αυτό μπορεί να παραχθεί από καλούπι με διαμορφωμένο το ένα τμήμα, όπως φαίνεται και στα παρακάτω σχήματα.

Κατά τον σχεδιασμό ενός κέρινου αντιγράφου όλες οι μη λειτουργικές γωνίες και πλευρές θα πρέπει να σημειώνονται στο σχέδιο σαν μέγιστες. Αυτό δίνει στο χυτήριο και σε αυτούς που φτιάχνουν τα εργαλεία να αποφασίσουν καλύτερα για την θέση της γραμμής διαχωρισμού του καλουπιού. Επίσης τους βοηθά ώστε επιλέγοντας την κατάλληλη θέση να διαμορφώνουν και τις κατάλληλες ιδιότητες για κάθε τμήμα του κομματιού.

Παρακάτω έχουμε παραδείγματα για την επιλογή της θέσης γραμμής διαχωρισμού.

Σχήμα 2.19 Παρουσίαση του αντιγράφου με τις καμπυλωμένες γωνίες

Στο Σχήμα 2.19 παριστάνεται ένα απλό αντικείμενο προς χύτευση με γωνίες και καμπύλες. Η κατασκευή μη απαραίτητων γωνιών ανεβάζει το κόστος του κομματιού.

Σχήμα 2.20 Με τη γραμμή διαχωρισμού στην κατάλληλη θέση

Στο Σχήμα 2.20 παριστάνεται το καλούπι για την παραγωγή του κομματιού με την γραμμή διαχωρισμού σε τέτοια θέση έτσι ώστε το κέρινο αντίγραφο να μην υποστεί καμία αλλαγή. Σημειώνεται εδώ ότι και τα δύο μέρη του καλουπιού για να λάβουν την επιθυμητή μορφή επιδέχονται μηχανουργική κατεργασία.

Σχήμα 2.21 Με τη γραμμή διαχωρισμού μετατοπισμένη

Στο Σχήμα 2.21 παρατηρούμε το καλούπι με την γραμμή διαχωρισμού μετατοπισμένη από την προηγούμενη θέση. Με αυτήν την μετατόπιση πετυχαίνεται μείωση των απαραίτητων κατεργασιών μόνο για το ένα μέρος του καλουπιού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του κόστους παραγωγής του καλουπιού. Με την διάταξη αυτή δεν δημιουργούνται οι γωνίες στη βάση του αντιγράφου. Αν οι γωνίες δεν είναι απαραίτητες επιλέγουμε αυτή τη μορφή για το καλούπι.

2.6 ΤΑΧΕΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΩΤΟΤΥΠΩΝ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

Κατά την διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας μία σειρά νέων τεχνολογιών έχουν αναπτυχθεί. Οι τεχνολογίες αυτές βοηθούν τους μηχανικούς στην ταχύτερη, καλύτερη και ευκολότερη εφαρμογή των ιδεών τους. Ο μέχρι πρότινος τρόπος εξέλιξης, σχεδίασης και παραγωγής προϊόντων έχει εγκαταλειφθεί. Ο σχεδιασμός του αντικειμένου γίνεται με ισχυρούς Η/Υ. Χρησιμοποιώντας τα αρχεία 3D – CAD (computer – aided design) των αντικειμένων που σχεδιάζονται. Οι καινοτόμες μηχανές ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων κατασκευάζουν το στερεό πρωτότυπο αυτού του αντικειμένου στις φυσικές του διαστάσεις. Πολλαπλά πρωτότυπα μπορούν να παραχθούν γρήγορα και οικονομικά, τα οποία βοηθούν σημαντικά την γρήγορη ανάπτυξη ενός νέου προϊόντος από το σχεδιασμό του στην παραγωγή. Έχει αποδειχθεί ότι ένα πολύ σημαντικό μέρος του χρόνου ανάπτυξης ενός προϊόντος, μερικές φορές και πάνω από το 25% αποτελεί η κατασκευή δειγμάτων και πρωτοτύπων.

Ειδικά τα τελευταία χρόνια που γίνεται μία αγωνιώδης προσπάθεια για ολοένα και μεγαλύτερη συμπίεση του χρόνου ανάπτυξης και παραγωγής νέων προϊόντων δημιουργήθηκε η ανάγκη ανάπτυξης τέτοιων τεχνολογιών.

Ο βασικός διαχωρισμός που γίνεται στις τεχνολογίες RPT δίνει:

- την ταχεία Κατασκευή Πρωτοτύπων / Rapid Prototyping
- την ταχεία Κατασκευή Εργαλείων / Rapid Tooling

Σημαντικά τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την εφαρμογή τεχνολογιών RP σε σχέση με τις συνήθως εφαρμοζόμενες διαδικασίες είναι: συμπίεση του χρόνου κατασκευής του πρωτοτύπου, καθώς επιτυγχάνεται η κατασκευή του πρωτοτύπου σε μέρες ή ακόμα και ώρες. Η μελέτη τους δίνει πολύ καλύτερη αντίληψη της κατασκευής. Τα πρωτότυπα μπορούν να μεταφερθούν και να παρουσιαστούν οπουδήποτε σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στην εφαρμογή οπτικής προβολής των πρωτοτύπων. Αποτελούν στην πλειοψηφία τους μεθόδους κατεργασίας που πραγματοποιούνται με πρόσθεση υλικού καθώς το πρωτότυπο κτίζεται.

2.7 ΕΙΔΗ ΧΥΤΕΥΣΗΣ

Χύτευση πρώτης ύλης

Χύτευση σε αναλώσιμο καλούπι

Χύτευση σε μόνιμο καλούπι

2.7.1 Χύτευση μπιγιετών

- Χύτευση - στερεοποίηση σε μεγάλα καλούπια 500 – 50000 kg.
- Τετραγωνική, παραλληλόγραμμη ή κυκλική διατομή.
- Ακολουθεί θέρμανση σε λουτρό για ομοιόμορφες ιδιότητες.
- Στο χάλυβα διαλυμένα αέρια πχ O₂ αποβάλλονται κατά τη στερεοποίηση πχ ως CO₂ και δημιουργούν διακενώσεις.
– Killed (ήρεμης στερεοποίησης).
- Πλήρως αποξειδωμένος – ελάχιστες διακενώσεις
- Χρήση Al, V, Ti που δημιουργούν οξειδία που επιπλέουν

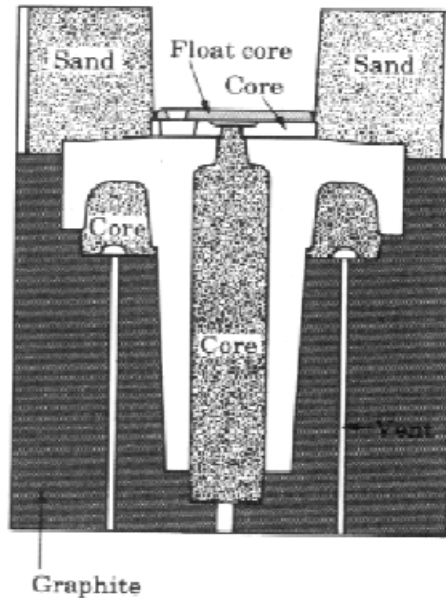
- Ιδιότητες ομοιογενείς – αλλά δημιουργία κενού συρρίκνωσης (πηγαδιού) που αχρηστεύει τμήμα της μπιγιέτας
 - Semi-killed
- Μερικά αποξειδωμένος- λίγες διακενώσεις – μικρό κενό συρρίκνωσης
 - Rimmed (rim=άκρο – εκεί δημιουργούνται ‘οπές’).
- $P(C) < 0.15\%$
- Προσθήκη Al για έλεγχο των αερίων και μικρό κενό συρρίκνωσης
- Επιφάνεια όλκιμη και καλής ποιότητας

2.7.2 Συνεχής χύτευση

- Αντικαθιστά τη χύτευση μπιγιετών (διακριτή – κατά μερίδες).
- Βελτιώνει προβλήματα ασυνεχειών υλικού, σύστασης και δομής.
- Ξεκίνησε το 1860 για μη σιδηρούχα υλικά
- Στάδια
 - Καθαρισμός τήγματος με ρεύμα N₂ για λιγότερο από 10 min
 - Χύτευση σε ενδιάμεση δοχείο τυπικά 3 tn με αφαίρεση ακαθαρσιών
 - Κατακόρυφη διακίνηση (25 mm/sec) μέσω ψυχόμενων καλουπιών με ταυτόχρονη στερεοποίηση και υποστήριξη από ράουλα
 - Χρήση αρχικά στερεοποιημένου τμήματος για έναρξη διαδικασίας
 - Επικάλυψη γραφίτη κλπ στερεών λιπαντικών στο εσωτερικό του καλουπιού και ταλαντώσεις για μείωση τριβής – προσκόλλησης
 - Πάχος τελικής μπιγιέτας 250 mm τυπικά. Πρόσφατα : πάχος μπιγιέτας 15 mm για μείωση επιπλέον κατεργασιών.
 - Ακολουθεί κοπή ή έλαση διατομής – συχνά σε σειρά
- Μειωμένο κόστος σε σχέση με χύτευση μπιγιετών

Χύτευση σε καλούπι

- Αναλώσιμο καλούπι
- Μόνιμο καλούπι
- Ημι-μόνιμο καλούπι



Σχήμα 2.22 Ημι-μόνιμο σύνθετο καλούπι

Χύτευση σε άμμο I

- Αναλώσιμο καλούπι - γενικά :
 - από 'πυρίμαχο' υλικό
 - καταστρέφεται για να αφαιρεθεί το χυτό
- Καλούπι από άμμο : βάρος χυτού 50 gr - πολλούς tn
- Απαιτήση πάχους διατομής σχετικά μεγάλου > 3 mm
- Μέσης ακρίβειας προϊόν
- Σχετικά μεγάλο πρόβλημα διακενώσεων
- Αρκετά υψηλή πολυπλοκότητα μορφής χυτού

Χύτευση σε άμμο II

- Η άμμος είναι στην απλή περίπτωση πυριτική

- Μικροί και σφαιρικοί κόκκοι δίνουν αυξημένη αντοχή, αλλά κακή διαπερατότητα από αέρια.

- Απαιτήση 'ελαστικότητας' όταν συρρικνώνεται το χυτό για την αποφυγή ρωγμών
- Παρασκευή σε μηχανές ανάμιξης άμμου-συνδετικού.

Είδη καλουπιών χύτευσης σε άμμο

- Υγρής άμμου (άμμος-πηλός-νερό)
- Επιφανειακής ξήρανσης (με φλόγα)
 - ισχυρότερα (διαστασιακή ακρίβεια) αλλά δεν υποχωρούν (ρωγμές)
- Ψυχρού κουτιού (χημική σύνδεση των κόκκων)
 - Ακριβέστερες διαστάσεις χυτού, αλλά ακριβότερα
- No bake (χωρίς έψηση) (το συνδετικό είναι υγρή ρητίνη στερεοποιούμενη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος).

Χύτευση σε άμμο – μοδέλλα

- Μοδέλλα
 - Υλικό : πλαστικό, ξύλο, μέταλλο, ή από ταχεία προτυποποίηση
 - Επικαλύψεις που διευκολύνουν τον αποχωρισμό από το καλούπι.
 - Είδη
 - Ενός τεμαχίου για απλή μορφή και μικρές ποσότητες (ξύλινα)
 - Διαιρετά για δυσκολότερες μορφές
 - Πλάκας συνεργασίας (matching plate)
 - Πυρήνες (καρδιές)
 - Για επίτευξη κοιλοτήτων στο χυτό
 - Αφαιρούνται μαζί με το καλούπι μετά τη στερεοποίηση του χυτού
 - Υλικό : άμμος ιδίων αιτήσεων με το καλούπι
 - Συγκράτηση από μεταλλικά 'πρέντια' (chaplets) ή core-prints που απάγουν και αέρια

Χύτευση σε άμμο – κατασκευή καλουπιού

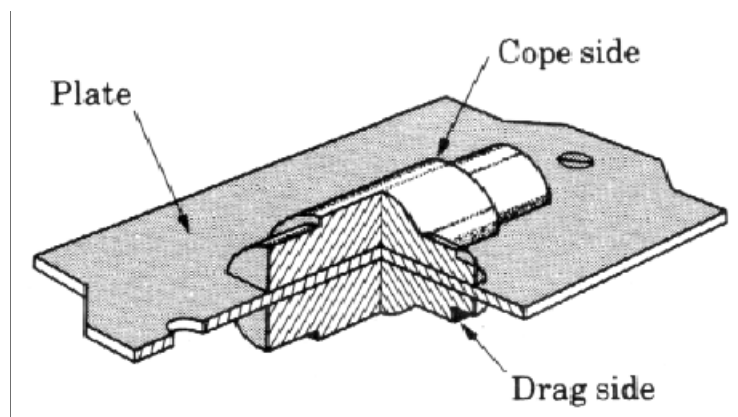
- Για λίγα τεμάχια, κατασκευή με το χέρι
- Για πολλά τεμάχια, αυτοματοποίηση.
- Μηχανές κατασκευής καλουπιών
 - Μηχανική συμπίεση της άμμου
 - που διοχετεύεται από σιλό με ελεγχόμενη ροή στα πλαίσια
 - που διακινούνται σε ταινιοδρόμους
 - όπου μπορεί να γίνει και η έκχυση-χύτευση για υψηλή παραγωγικότητα.

Χύτευση σε άμμο - διαδικασία

- Τύπωση = δημιουργία κοιλότητας στο καλούπι με χρήση μοδέλου
- Προσθήκη πυρήνων αφού αφαιρεθεί το μοδέλο
- Καλό κλείσιμο των δύο τμημάτων
- Αφαίρεση της άμμου μετά τη στερεοποίηση με ταλάντωση, αμμοβολή ή με το χέρι
 - Κοπή των προσεπιχωνευμάτων και αγωγών / οχετών με φλόγα, τροχό, πρέσσα, πριόνι
- Αμμοβολή για καθαρισμό και βελτίωση της ποιότητας επιφάνειας

Χύτευση Croning I

- Καλή διαστασιακή ακρίβεια -ποιότητα επιφάνειας αποδεκτό κόστος
- Μεταλλικό μοδέλο θερμαινόμενο στους 175-370 ο C
- Επικάλυψη με σιλικόνη για εύκολο διαχωρισμό
 - Απλώνεται στρώμα λεπτής άμμου με 2.5-4% συνδετικό θερμοσκληρυνόμενης ρητίνης πχ φαινολικής φορμαλδεύδης
- Συχνά θερμαίνεται σε φούρνο για σκλήρυνση της ρητίνης
- Αφαίρεση του κελύφους με χρήση εξολκέων



Σχήμα 2.22 Μοδέλο τύπου πλάκας

Χύτευση Croning - II

- Συναρμολόγηση των δύο 'μισών' του κελύφους και κόλληση τους
- Πάχος κελύφους : 5-10 mm
- Πλήρωση με τήγμα σε κατακόρυφη θέση και υποστήριξη πχ από σφαιρίδια χάλυβα, άμμο (?) κλπ
 - Επιτρέπει μικρότερες ακτίνες καμπυλότητας, πάχη διατομών λόγω λεπτότερου τοιχώματος καλουπιού και λείων εσωτερικών τοιχωμάτων.
- Οικονομική όταν αυτοματοποιείται.
- Βάρος χυτού croning : 50gr – 100 kg
- Πάχος διατομής > 2 mm
- Λίγοι πόροι και διακενώσεις.

Χύτευση Croning - III

- Σύνθετα καλούπια
 - Αποτελούνται από περισσότερα από δύο υλικά για
 - αυξημένη αντοχή τοιχωμάτων,
 - ακρίβεια διαστάσεων,
 - καλή τραχύτητα επιφάνειας κλπ
- Διεργασία CaSi
 - Το καλούπι είναι μίγμα άμμου και 1.5-6% CaSi ως συνδετικού που στερεοποιείται με ρεύμα αερίου CO₂
- Καλούπια συμπιεσμένου γραφίτη

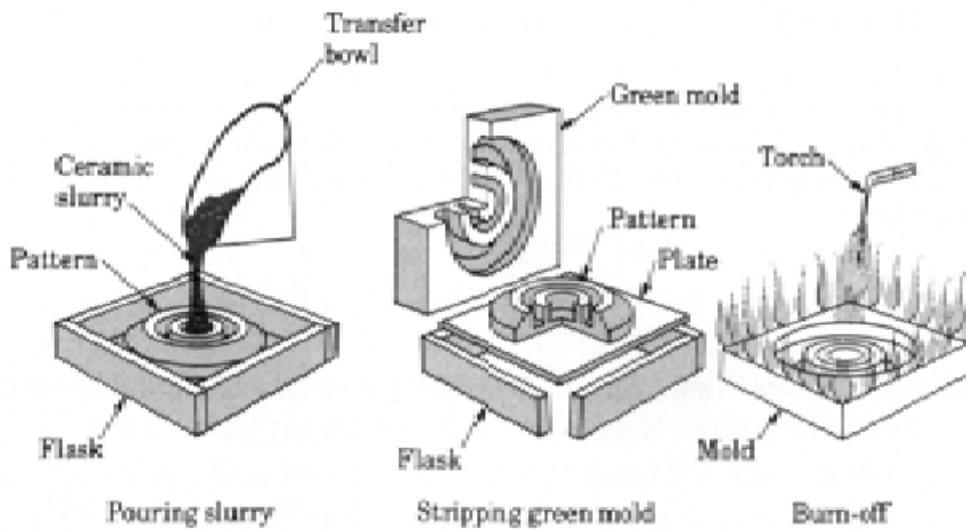
- Για αποφυγή αντίδρασης Ti με Si στην απλή άμμο
- Γραφίτης συμπιέζεται, ξηραίνεται σε 175 οC ,θερμαίνεται σε 870 οC, αποθηκεύεται σε ελεγχόμενες συνθήκες υγρασίας θερμοκρασίας,

Χύτευση σε καλούπι γύψου

- Επάλειψη του (όχι ξύλινου) μοδέλου με πάστα γύψου
- Στερεοποίηση σε 15 min
- Συναρμολόγηση καλουπιού - ξήρανση 16 hrs - 120 οC
- Η χαμηλή διαπερατότητα του καλουπιού αυξάνει με
 - ύγρανση για 14 hrs ή
 - χρήση αφρώδους γύψου με εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα
- Η γύψος αντέχει μέχρι 1200 οC – καλό για Al, Mg, Zn
- Ανήκει στις χυτεύσεις ακριβείας
 - πχ βαλβίδες, κλειδαριές, εργαλεία
- Λόγω σχετικά χαμηλής θερμικής διαπερατότητας – αργή απόψυξη - σχετικά ομοιόμορφη μικροδομή
 - Βάρος χυτού : 50 gr–50 kg – Πάχος : 1 mm

Χύτευση σε κεραμικό καλούπι

- Παρόμοια με τη χύτευση σε καλούπι γύψου, αλλά το υλικό αντέχει σε υψηλότερες θερμοκρασίες
 - Άρα είναι κατάλληλη και για σιδηρούχα κράματα
 - Η κεραμική πάστα αποτελείται από
 - ZrSiO₄ = ζirkονία
 - Al₂O₃
 - Si με συνδετικό υλικό
 - Η έκχυση στο μοδέλο ακολουθείται από θέρμανση για απομάκρυνση των πτητικών συστατικών
 - Το κόστος είναι σχετικά υψηλό



Σχήμα 2.23 Χύτευση σε κεραμικό καλούπι

Χύτευση χαμένου κεριού - I

- (lost wax, investment casting)
- Εφαρμόστηκε το 3000 πΧ
- Βάρος χυτού : 5 gr – 25 kg
- Πάχος τοιχώματος : 1-75 mm
- Μεγάλης ακρίβειας
- Μεγάλη πολυπλοκότητα μορφής
- Πολύ καλή ποιότητα επιφάνειας

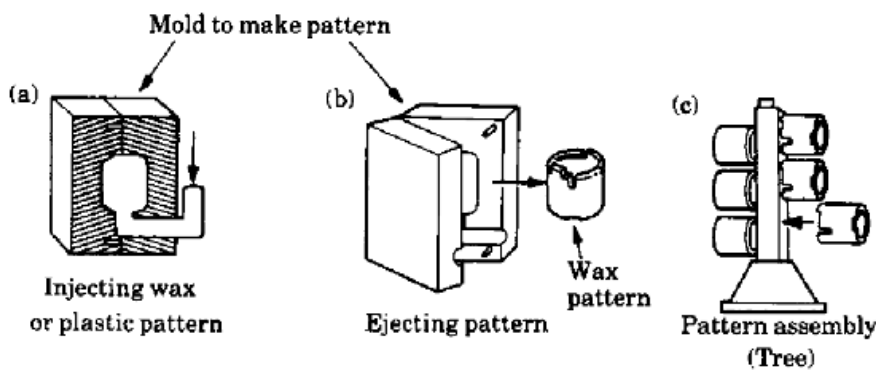
Χύτευση χαμένου κεριού - II

- Το μοντέλο είναι από κερι
- Το μοντέλο μπορεί να φτιάχνεται σε πρέσσα με τη βοήθεια μεταλλικού καλουπιού
 - Μοντέλο τύπου δένδρου για πολλαπλά τεμάχια – απαιτούνται αρκετά εργατικά χέρια
 - Το καλούπι είναι από πυρίμαχη πάστα εφαρμοσμένη με διαδοχικές εμβαπτίσεις
 - Ξηραίνεται στον αέρα και θερμαίνεται σε 90-175 C για 4 hrs για την απομάκρυνση του νερού κρυστάλλωσης.

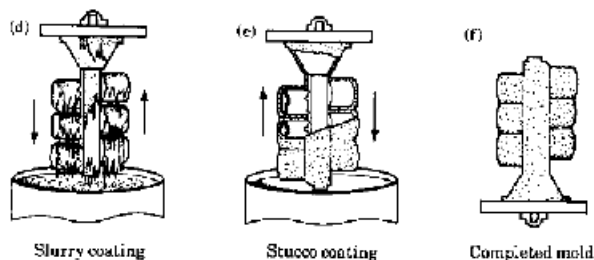
- Μετά τη χύτευση απαιτείται θέρμανση στη συνέχεια για αρκετές ώρες για την απομάκρυνση υπολειμμάτων κεριού

Χύτευση χαμένου κεριού - ΙΙΙ

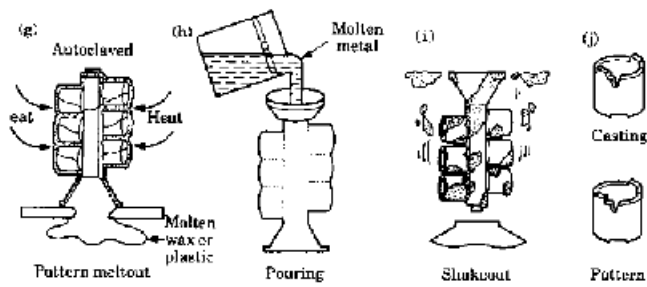
- Απαράμιλλη ακρίβεια και ποιότητα επιφάνειας (δεν απαιτείται αποπεράτωση).
- Εφαρμογή πχ σε πτερύγια τουρμπινών με υπερκράματα (Ni, Co)
 - Ειδικές μέθοδοι απομάκρυνσης εγκλεισμάτων - ακαθαρσιών γιατί η θερμοκρασία λειτουργίας είναι υψηλή, πχ TS-50 C
 - Το 45% των εξαρτημάτων αεροπορικών κινητήρων φτιάχνονται με χύτευση
 - παλαιότερα μόνο το 20%.



Σχήμα 2.24 Χύτευση χαμένου κεριού (Στάδια 1-3)



Σχήμα 2.25 Χύτευση χαμένου κεριού (Στάδια 4-6)



Σχήμα 2.26 Χύτευση χαμένου κεριού (Στάδια 7-9)

Χύτευση σε κενό

- Υλικό καλουπιού : ‘φιλή’ άμμος και ουρεθάνη
- Διαμορφώνεται από μεταλλική μήτρα
- Για τη χύτευση γίνεται μερική βύθιση του καλουπιού στο τήγμα
- Χρησιμοποιείται αυτόματη διάταξη ηχ ρομποτική
- Το τήγμα αναρροφάται
 - στα 2/3 της ατμοσφαιρικής πίεσης
 - Σε θερμοκρασία 50 C πάνω από τη liquidus
- Μετά την απομάκρυνση του καλουπιού από το τήγμα η στερεοποίηση είναι ταχεία
- Ελάχιστο πάχος τοιχωμάτων χυτού : 0.5 mm
- Βάρος χυτού έως 50 kg

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΟΣ ΧΥΤΟΥ

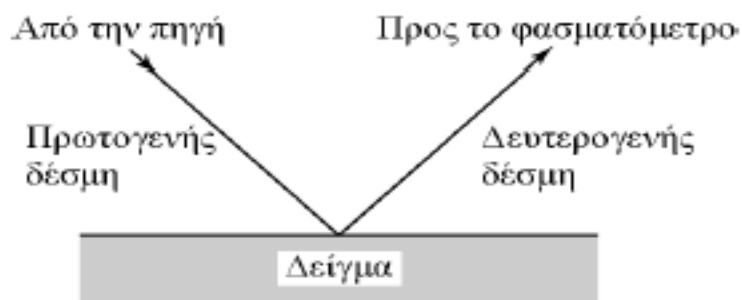
3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια σύντομη αναφορά στις πειραματικές τεχνικές χαρακτηρισμού που χρησιμοποιήθηκαν στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν την ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης, την περίθλαση ακτίνων Χ, XRD και την υπέρυθη φασματοσκοπία FTIR.

3.2 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ

3.2.1 Γενική τεχνική της φασματοσκοπίας επιφανειών

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται ο γενικός τρόπος φασματοσκοπικής εξέτασης μιας επιφάνειας. Το στερεό δείγμα ακτινοβολείται με μια πρωτογενή δέσμη φωτονίων, ηλεκτρονίων, ιόντων ή ουδέτερων μορίων. Η πρόσκρουση της δέσμης στην επιφάνεια έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας δευτερογενούς δέσμης από την επιφάνεια του στερεού, η οποία αποτελείται επίσης από φωτόνια, ηλεκτρόνια, μόρια ή ιόντα. Το είδος των σωματιδίων της δευτερογενούς δέσμης δεν είναι υποχρεωτικά το ίδιο με αυτό της πρωτογενούς δέσμης. Η δευτερογενής δέσμη, η οποία προκύπτει από σκέδαση, εκτίναξη ή εκπομπή, εξετάζεται στη συνέχεια με μια ποικιλία φασματοσκοπικών τεχνικών.



Σχήμα 4.1 Γενική αρχή της φασματομετρίας επιφανειών. Η δέσμη μπορεί να είναι φωτονίων, ηλεκτρονίων ή ιόντων

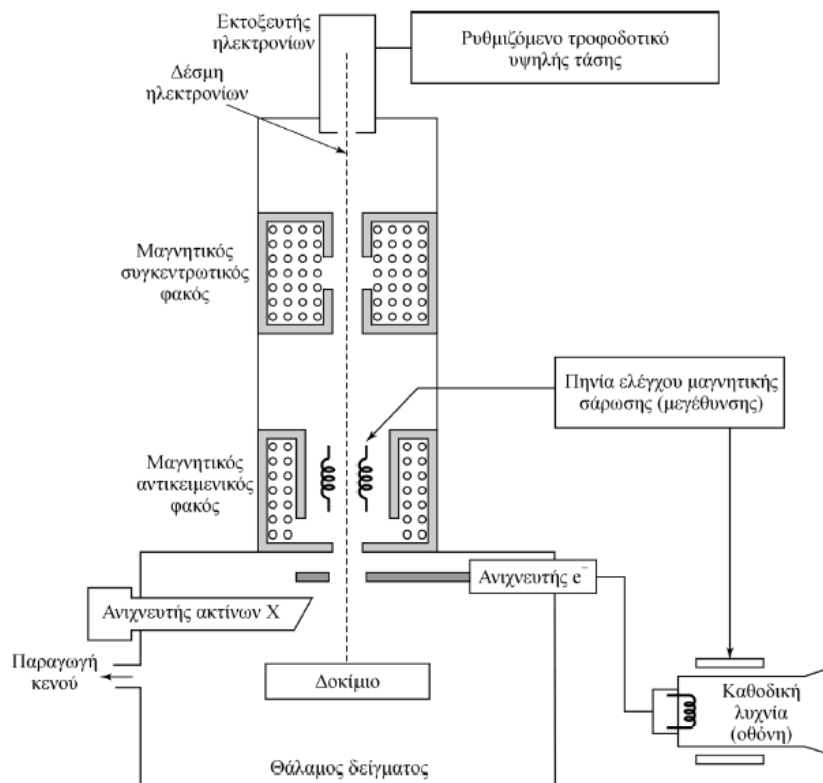
3.2.2 Σαρωτικό ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM)

Στο σαρωτικό ηλεκτρονικό μικροσκόπιο η επιφάνεια του στερεού δείγματος σαρώνεται παλινδρομικά με δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας. Με τη διαδικασία αυτή λαμβάνονται πολλά είδη σημάτων από την επιφάνεια, όπως οπισθοσκεδαζόμενα και δευτερογενή ηλεκτρόνια, ηλεκτρόνια Auger, φωτόνια φθορισμού ακτίνων Χ και άλλα φωτόνια διαφόρων ενεργειών. Όλα αυτά τα σήματα έχουν χρησιμοποιηθεί για μελέτες επιφανειών, όμως τα πιο συνηθισμένα είναι:

(1) τα οπισθοσκεδαζόμενα και τα δευτερογενή ηλεκτρόνια, τα οποία αποτελούν τη βάση της τεχνικής SEM και

(2) η εκπομπή ακτίνων Χ, η οποία χρησιμοποιείται στην ανάλυση με ηλεκτρονικό μικροδειγματολήπτη.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα ενός οργάνου, που συνδυάζει ένα σαρωτικό ηλεκτρονικό μικροσκόπιο και ένα σαρωτικό μικροσκόπιο μικροδειγματολήπτη. Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιείται η ίδια πηγή ηλεκτρονίων και το ίδιο σύστημα εστίασης ηλεκτρονίων, αλλά για το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο χρησιμοποιείται ανιχνευτής ηλεκτρονίων, ενώ για τον μικροδειγματολήπτη χρησιμοποιείται ανιχνευτής ακτίνων Χ.



Σχήμα 3.2 Σχηματικό διάγραμμα ενός σαρωτικού ηλεκτρονιοακού μικροσκοπίου (SEM)

3.3 ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

Όπως και στους άλλους τύπους ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η αλληλεπίδραση μεταξύ του ηλεκτρικού διανύσματος της ακτινοβολίας X και των ηλεκτρονίων της ύλης, μέσω της οποίας διέρχεται, προκαλεί σκέδαση. Όταν οι ακτίνες X σκεδάζονται στο οργανωμένο περιβάλλον του κρυστάλλου, συμβαίνει συμβολή (ενισχυτική ή καταστρεπτική) των σκεδαζόμενων ακτίνων, επειδή οι αποστάσεις μεταξύ των κέντρων σκέδασης είναι του ίδιου μεγέθους με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Αποτέλεσμα αυτού του τύπου σκέδασης είναι η περίθλαση της ακτινοβολίας.

Η περίθλαση ακτίνων X παρέχει μια απλή και πρακτική μέθοδο για την ποιοτική ταυτοποίηση κρυσταλλικών ανώσεων. Οι τεχνικές περίθλασης ακτίνων X βασίζονται στο ότι το φάσμα (ή σχηματόγραμμα) περίθλασης (diffraction pattern) των ακτίνων X είναι μοναδικό για κάθε κρυσταλλική ουσία. Επομένως, εάν υπάρχει πλήρης ταύτιση

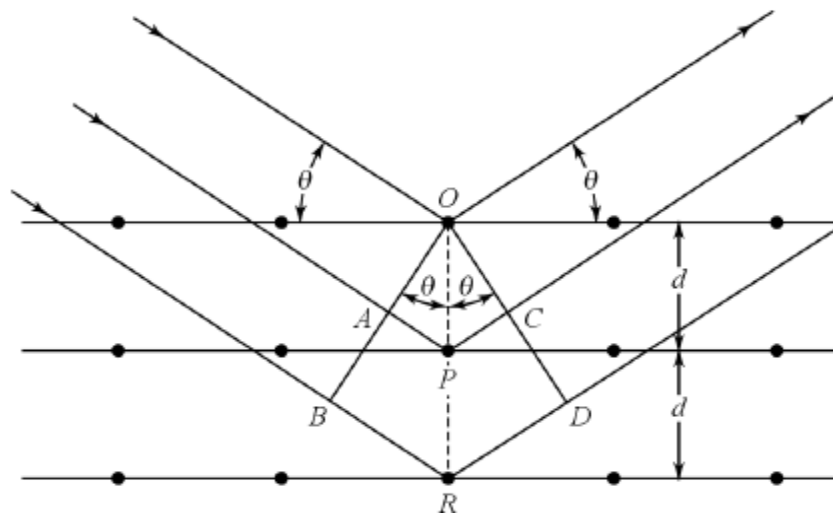
μεταξύ των φασμάτων περίθλασης του αγνώστου και του αυθεντικού δείγματος, η χημική ταυτοποίηση θεωρείται βέβαιη.

3.3.1 Ο νόμος του Bragg

Όταν μια δέσμη ακτίνων X προσκρούει στην επιφάνεια ενός κρυστάλλου με κάποια γωνία θ , ένα τμήμα της σκεδάζεται από το επιφανειακό στρώμα των ατόμων. Το μη σκεδαζόμενο τμήμα της δέσμης εισέρχεται στο δεύτερο στρώμα των ατόμων, όπου και πάλι ένα τμήμα σκεδάζεται και το υπόλοιπο εισέρχεται στο τρίτο στρώμα. Το αθροιστικό αποτέλεσμα της σκέδασης αυτής από τα τακτικά χωροθετημένα κέντρα του κρυστάλλου είναι η περίθλαση της δέσμης, όπως περίπου συμβαίνει κατά την πρόσπτωση ορατής ακτινοβολίας σε ένα περιθλαστικό φράγμα. Οι προϋποθέσεις για περίθλαση των ακτίνων X είναι:

(1) οι αποστάσεις μεταξύ των στρωμάτων των ατόμων πρέπει να είναι περίπου ίδιες με το μήκος κύματος ακτινοβολίας και

(2) τα κέντρα σκέδασης πρέπει να κατανέμονται στο χώρο με υψηλή κανονικότητα.



Σχήμα 3.3 Περίθλαση των ακτίνων X από έναν κρύσταλλο

Το 1912 ο W. L. Bragg παρουσίασε την περίθλαση των ακτίνων X από τους κρυστάλλους με τον τρόπο που δείχνεται στο Σχήμα 3.3. Εδώ, η στενή δέσμη της ακτινοβολίας προσπίπτει στην επιφάνεια του κρυστάλλου με γωνία θ . Η σκέδαση είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τα άτομα στα σημεία O, P και R. Εάν ισχύει ότι

$$AP + PC = n\lambda \quad (2.1)$$

όπου n είναι ένας ακέραιος, η σκεδαζόμενη ακτινοβολία θα βρίσκεται σε φάση στα σημεία OCD και ο κρύσταλλος θα φαίνεται ότι ανακλά την ακτινοβολία X. Ισχύει όμως η σχέση

$$AP + PC = d \sin \theta \quad (2.2)$$

όπου d είναι η απόσταση μεταξύ των επιπέδων (στρωμάτων) του κρυστάλλου. Έτσι, η συνθήκη για ενισχυτική συμβολή της δέσμης για τη γωνία θ δίνεται από τη σχέση

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.3)$$

Η Εξίσωση 2.3 είναι γνωστή ως *εξίσωση του Bragg* και είναι θεμελιώδους σημασίας. Να σημειωθεί ότι οι ακτίνες X εμφανίζονται σαν να ανακλώνται από τον κρύσταλλο, μόνο όταν η γωνία πρόσπτωσης ικανοποιεί τη σχέση 2.4

$$\sin \theta = n\lambda / 2d \quad (2.4)$$

Σε κάθε άλλη γωνία η συμβολή είναι καταστρεπτική.

3.3.2 Μονοχρωμάτορες ακτίνων X

Ο μονοχρωμάτορας αποτελείται από ένα ζεύγος κατευθυντήρων δέσμης, που δρουν όπως οι σχισμές ενός οπτικού οργάνου και ένα στοιχείο διασποράς. Το στοιχείο αυτό είναι ένας μονοκρύσταλλος προσαρμοσμένος σε ένα γωνιόμετρο ή μια περιστροφική τράπεζα, που επιτρέπει τη μεταβολή και την ακριβή μέτρηση ή ρύθμιση της γωνίας θ , μεταξύ της μετωπικής επιφάνειας του κρυστάλλου και της εισερχόμενης δέσμης. Από την Εξίσωση 2.3, είναι προφανές, ότι για δεδομένη γωνία, περιθλώνται μόνο μερικά μήκη κύματος (λ , $\lambda/2$, $\lambda/3$, ... λ/n , όπου $\lambda = 2d \sin \theta$). Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζονται τα βασικά τμήματα ενός φασματομέτρου ακτίνων X

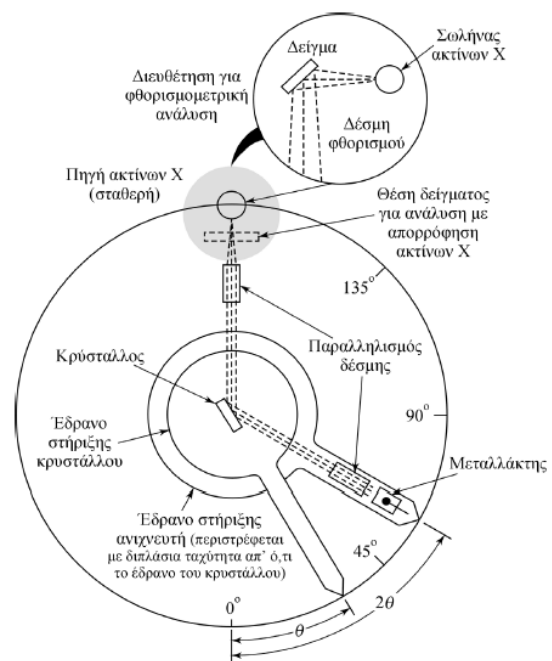
Για τη λήψη φάσματος είναι απαραίτητη η προσαρμογή του κατευθυντήρα εξόδου και του ανιχνευτή επάνω σε μια δεύτερη τράπεζα, που περιστρέφεται με

διπλάσια ταχύτητα από την πρώτη. Εάν δηλαδή ο κρύσταλλος περιστραφεί κατά γωνία θ , ο ανιχνευτής θα πρέπει να περιστραφεί κατά γωνία 2θ . Είναι προφανές ότι η τιμή του d του κρυστάλλου πρέπει να είναι γνωστή με ακρίβεια (Εξίσωση 2.3).

Οι κατευθυντήρες μονοχρωματόρων ακτίνων X αποτελούνται συνήθως από μια σειρά πυκνά τοποθετημένων μεταλλικών πλακών ή σωλήνων οι οποίοι απορροφούν όλη την εκτός παραλληλότητας ακτινοβολία της δέσμης.

Ακτινοβολία X με μήκος κύματος μεγαλύτερο από 2 \AA απορροφείται από τα συστατικά της ατμόσφαιρας. Για τον λόγο αυτό προβλέπεται συνεχής ροή ηλίου στο χώρο τοποθέτησης δείγματος και μονοχρωμάτορα, όταν χρησιμοποιείται ακτινοβολία της περιοχής αυτής. Εναλλακτικά μπορεί να προβλεφθεί η δυνατότητα δημιουργίας κενού με άντληση του αέρα.

Η απώλεια έντασης είναι πολύ μεγάλη σε μονοχρωμάτορα εφοδιασμένο με επίπεδο κρύσταλλο, επειδή περίπου το 99% της ακτινοβολίας αποκλίνει και απορροφείται σημαντικά από τους κατευθυντήρες. Με χρήση κρυστάλλου κοίλης επιφάνειας, οπότε εκτός από περίθλαση εξασφαλίζεται και εστίαση της αποκλίνουσας δέσμης από την πηγή προς τον κατευθυντήρα εξόδου, επιτυγχάνεται αύξηση της έντασης της δέσμης μέχρι και δέκα φορές.



Σχήμα 3.4 Μονοχρωμάτορας ακτίνων X με τον ανιχνευτή. Η γωνία του ανιχνευτή (2θ), ως προς τη δέσμη, είναι διπλάσια από αυτήν του κρυσταλλικού μετώπου. Για μέτρηση της απορρόφησης, η πηγής είναι ένας σωλήνας ακτίνων X και το δείγμα τοποθετείται στη διαδρομή της δέσμης, όπως απεικονίζεται στο σχήμα. Για μέτρηση της εκπομπής, το δείγμα καθίσταται φθορίζουσα πηγή ακτίνων X, όπως δείχνεται στο μεγεθυμένο τμήμα του σχήματος.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΤΕΡΩΤΗΣ ΥΠΟΒΡΥΧΙΑΣ ΑΝΤΛΙΑΣ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος χύτευσης είναι αυτή της κατασκευής του καλουπιού με Cropping. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να κατασκευάσουμε εξαρτήματα ακριβείας της τάξεως των 15-20 κιλών.

Ένα επίσης διαδεδομένο υλικό για την κατασκευή καλουπιών είναι η χαλαζιακή άμμος, η οποία ζυμώνεται μαζί με διάφορα άλλα ειδικά υλικά για να χρησιμοποιηθεί μετέπειτα στην κατασκευή καλουπιών. Η χαλαζιακή άμμος χρησιμοποιείται για δύσκολα και αρκετά εξειδικευμένα εξαρτήματα για το λόγο ότι έχει μεγαλύτερη ελαστικότητα σε σχέση με το υλικό Cropping.

Η βασική διαφορά των δύο αυτών υλικών είναι το μικρό κόστος παραγωγής που έχει η μέθοδος Cropping σε σχέση με αυτή της χαλαζιακής άμμου.



Εικ. 1. Cronic

Στην Εικ. 1 φαίνεται το υλικό Cronic, το οποίο και θα χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή των καλουπιών.



Εικ. 2. Χαλαζακή άμμος

Στην Εικ. 2 φαίνεται το υλικό Χαλαζακή άμμος στα δύο της στάδια:
α) Αρχική της μορφή – ΣΚΟΝΗ &

β) Ζυμωμένη με διάφορες προσμίξεις, έτοιμη προς διαμόρφωση καλουπιού
Τοποθετείται το υλικό σε ειδικά διαμορφωμένες μήτρες και θερμαίνεται σε μία θερμοκρασία της τάξεως των 150 βαθμών Κελσίου με ένα απλό φλόγιστρο και τα καλούπια πετρώνουν ακαριαία και είναι έτοιμα προς χύτευση σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Η κατασκευή ενός εσωτερικού καλουπιού – καρδιάς φαίνεται στις Εικ. 3 και 4.



Εικ. 3



Εικ. 4

Για τη μέθοδο της χαλαζιακής άμμου έχουμε πολλές κατεργασίες έτσι ώστε το καλούπι να φτάσει στην τελική του μορφή προς χύτευση. Πρέπει δηλαδή από την αρχική της μορφή να γίνει ένα μείγμα ζύμωσης όπως φαίνεται και στην Εικ. 2, μέσω ενός ειδικού μύλου και από εκεί στην ανάλογη μήτρα να πάρει την μορφή του εκάστοτε εξαρτήματος και στη συνέχεια να ψηθεί στο φούρνο ώστε να σκληροποιηθεί για να είναι έτοιμο να δεχθεί το χυτό.

Συνέπεια όλων των παραπάνω που προαναφέρθηκαν είναι ότι μέσω της μεθόδου Croning στατιστικά αποδεδειγμένα επιτυγχάνεται η διπλάσια και παραπάνω παραγωγή κομματιών (καλούπια) στον ίδιο χρόνο εργατών.

Άρα θεωρείται ορθή η επιλογή της μεθόδου Croning για λόγους χρόνου και οικονομικούς σε συνάρτηση και με τις απαιτήσεις ακριβείας της περωτής.

Για την κατασκευή της περωτής πρώτο μας μέλημα είναι ο σχεδιασμός ο οποίος γίνεται με ηλεκτρονικά μέσα Η/Υ και με την βοήθεια του προγράμματος AUTOCAD.

Μέσω του σχεδιασμού του εξαρτήματος θα προσδιοριστεί και η κατασκευή του καλουπιού το οποίο χωρίζεται σε δύο μορφές.:

- α) Εσωτερικά μορφή (ΚΑΡΔΙΑ)
- β) Εξωτερική μορφή (ΜΑΣΚΑ)

Για τη σωστή κατασκευή του καλουπιού είναι υποχρεωτικό και απαραίτητο να γνωρίζουμε το είδος του κράματος από όπου θα κατασκευαστεί το εξάρτημα (περωτή) για να δώσουμε με τη σειρά μας τα απαραίτητα στοιχεία στα καλούπια.

Για το συγκεκριμένο εξάρτημα – περωτή – το υλικό κατασκευής είναι ο ΜΠΡΟΥΝΤΖΟΣ.

Το εσωτερικό καλούπι (ΚΑΡΔΙΑ) αποτελείται από δύο συναρμολογούμενα μέρη τα οποία είναι ο πυρήνας, ο οποίος μας δίνει την αξονική οπή της περωτής και κατασκευάζεται πάντα και για όλα του ίδιου τύπου εξάρτηματα με την μέθοδο Croning, και το «πιάτο» το οποίο μας δίνει τη μία πλευρά της περωτής και τα φτερά.

Η συναρμολόγηση όπως φαίνεται και στην Εικ. 5 & 6 που ακολουθούν.



Εικ. 5



Εικ. 6

Κατασκευή εξωτερικού καλούπιού – ΜΑΣΚΑ

Ξεκινάμε την κατασκευή της ΜΑΣΚΑΣ επιλέγοντας την πρώτη ύλη, η οποία όπως και για τα προηγούμενα έτσι και για το εξωτερικό καλούπι ΜΑΣΚΑ θα είναι με τη μέθοδο Croning.

Αφού έχει σχηματιστεί το εξωτερικό καλούπι πηγαίνει σε ειδικό φούρνο (Εικ. 7 και 8) όπου ψήνεται στους 250°C και εν συνεχεία εξολκεύεται και είναι έτοιμο σταθεροποιημένο για την τελική συναρμολόγηση με την ΚΑΡΔΙΑ η οποία θα τοποθετηθεί μέσα στα δύο κομμάτια του εξωτερικού καλούπιού το οποίο όπως παραλείψαμε να αναφέρουμε παραπάνω χωρίζεται σε δύο μέρη: Άνω και Κάτω κομμάτι.



Εικ. 7

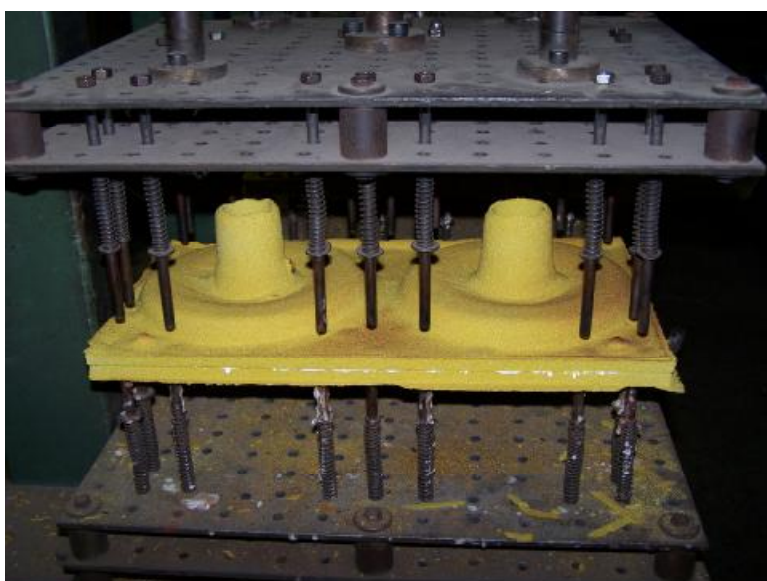


Εικ. 8

Στις παραπάνω εικόνες παρατηρείται το ψήσιμο του εξωτερικού καλουπιού ΜΑΣΚΑ και η εξόλκευσή του.

Εν συνεχεία το επόμενο στάδιο είναι η συναρμολόγηση του εσωτερικού καλουπιού «ΚΑΡΔΙΑ» με το εξωτερικό καλούπι «ΜΑΣΚΑ».

Εκεί τοποθετείται η ΚΑΡΔΙΑ μέσα στη ΜΑΣΚΑ όπου τα δύο μέρη της συγκολλούνται μεταξύ τους σε ένα ειδικό μηχάνημα (Εικ. 9) με μία κόλλα μεγάλων αντοχών.



Εικ. 9 Ειδικό μηχάνημα συγκόλλησης άνω και κάτω μέρος εξωτερικού καλουπιού (ΜΑΣΚΑΣ) όπου στο εσωτερικό τους βρίσκεται το εσωτερικό καλούπι (ΚΑΡΔΙΑ)

Μετά και το στάδιο αυτό έχουμε έτοιμο συναρμολογημένο το καλούπι έτσι ώστε να δεχτεί το χυτό (Εικ. 10).



Εικ. 10 Καλούπια έτοιμα προς χύτευση

Με την ολοκλήρωση της συναρμολόγησης του καλουπιού, το επόμενο στάδιο είναι η μεταφορά των καλουπιών και η τοποθέτηση – τακτοποίηση στο χώρο της χύτευσης.



Εικ. 11



Εικ. 12

Στις παραπάνω εικόνες 11 και 12 φαίνεται ο χώρος όπου γίνεται η χύτευση και παρατηρείται η λειτουργική τοποθέτηση των καλουπιών και ότι φαίνεται μόνο το μέρος του καλουπιού από όπου εισέρχεται το χυτό για το λόγο ότι τα καλούπια είναι θαμμένα.

Το θάψιμο των καλουπιών στο χώρο της χύτευσης (γίνεται από χρησιμοποιημένη χαλαζιακή άμμο) αποσκοπεί σε έναν πολύ σημαντικό λόγο.

Ο λόγος αυτός είναι ότι επιτυγχάνεται ομαλή επιβραδυνόμενη τήξη με αποτέλεσμα την καλύτερη μοριακή σύσφιξη, την αποφυγή της απότομης τήξης και των αρνητικών συνεπειών της στη μορφή και δομή του μετάλλου.

Λιώσιμο του μετάλλου

Για την κατασκευή του εξαρτήματός μας «Πτερωτή Υποβρύχιας Αντλίας» το μέταλλο που θα χρησιμοποιήσουμε είναι ο μπρούντζος.

Το λιώσιμο του μπρούντζου γίνεται πάντα και υποχρεωτικά σε χωνί όπως στην Εικ. 13



Εικ. 13



Εικ. 14 Μεταφορείς: είναι τα μικρότερα χωνιά στα οποία μεταγγίζεται το χυτό για την τελική χύτευση



Εικ. 15

Το μικρότερο αυτό χωνί – μεταφορέας όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην εικόνα 15, έως να δεχθεί το χυτό προθερμαίνεται μέσω ενός φλόγιστρου έτσι ώστε να αναπτυχθεί η κατάλληλη θερμοκρασία υποδοχής του χυτού.

Η θερμοκρασία που πρέπει να αναπτυχθεί για το λιώσιμο του μπρούντζου κυμαίνεται μεταξύ 1.000 °C – 1.100 °C.

Η θερμοκρασία που έλιωσε ο μπρούντζος για την κατασκευή της πτερωτής ήταν στους 1.060 °C

Η μέτρηση και ο έλεγχος της θερμοκρασίας έγινε με βαπτιζόμενο πυρόμετρο.

Υπάρχει επίσης ο εναλλακτικός τρόπος μέτρησης ο οποίος γίνεται με μία συσκευή λείζερ.

Για την τελική χύτευση στα καλούπια, τα οποία όπως προαναφέραμε παρευρίσκονται στο χώρο χύτευσης (Εικ. 11 & 12) το χυτό μεταγγίζεται σε πολύ μικρότερα χωνιά (Εικ. 14 & 15) και μέσω αυτών χύνεται στα καλούπια (Εικ. 16 & 17) ως κάτωθι:



Εικ. 16



Εικ. 17 Μετάγγιση χυτού σε μικρότερα χωνιά

Στις εικόνες 16 & 17, φαίνεται καθαρά η τελική χύτευση από τα μικρότερα χωνιά στα καλούπια.



Εικ. 18



Εικ. 19

Κάτι επίσης πολύ σημαντικό που χαιρεί μεγάλης προσοχής είναι ότι κατά τη διάρκεια της τελικής χύτευσης μειώνεται η θερμοκρασία του χυτού και αλλοιώνονται τα επιθυμητά επίπεδα ρευστοποίησης και δεν έχουμε σωστή χύτευση.

Αυτό αντιμετωπίζεται εύκολα, διοχετεύοντας στα μικρότερα χωνιά – μεταφορείς μικρές ποσότητες φωσφόρου (Εικ. 20 & 21), επιτυγχάνοντας έτσι τη καλύτερη ρευστοποίηση και την τέλεια χύτευση.



Εικ. 20 Αριστερά διακρίνουμε διάφορα αντισκωριακά υλικά και δεξιά τον φώσφορο



Εικ. 21 Φώσφορος

Κάτι εξίσου σημαντικό είναι ότι κατά το λιώσιμο του χυτού και φτάνοντας στην τελική θερμοκρασία χύτευσης γίνεται ο καθαρισμός του μετάλλου χρησιμοποιώντας αντισκωριακά υλικά και συλιπάσματα σε αμμώδης μορφή.

Με την μέθοδο αυτή όλα τα ελαφρά σωματίδια και η σκουριά που παράγεται κατά το λιώσιμο ανεβαίνουν στην επιφάνεια του χυτού.

Τα αντισκωριακά υλικά και συλιπάσματα φαίνονται στην Εικ. 18

Καθαρισμός χυτού

Μετά από 24 ώρες που είναι ο απαιτούμενος χρόνος για την ομαλή τήξη γίνεται ο καθαρισμός του χυτού εξαρτήματος μας, της πτερωτής.

Ο καθαρισμός είναι η κατεργασία που γίνεται και μέσω αυτής κόβονται οι μπουκαδούρες – εξαεριστικά, τα τυχόν φλασαρίσματα (γρέζια) του εξαρτήματος όπως φαίνεται στις Εικ. 22 & 23.



Εικ. 22



Εικ. 23 Καθαρισμός χυτού

Αφού το χυτό έχει περάσει από την πρώτη κατεργασία καθαρισμού, όπως φαίνεται και από την Εικ. 24, συγκεντρώνονται όλα μαζί για την επόμενη κατεργασία.



Εικ. 24

Η αμέσως επόμενη κατεργασία της πτερωτής είναι η ατσαλοβολή.

Η ατσαλοβολή είναι ένα ειδικό μηχάνημα (Εικ. 25), όπου υποδέχεται μέσα σε ένα κλίβανο στο εσωτερικό του το πτερύγιο και εκεί γίνεται ο καθαρισμός του με ειδικά σφαιρίδια για να μην πληγώνουν το εκάστοτε εξάρτημα, το οποίο δέχεται τον καθαρισμό αυτό.



Εικ. 25 Ατσαλοβολή

Μετά και την κατεργασία της ατσαλοβολής, το εξάρτημα – πτερωτή είναι έτοιμο προς μηχανική κατεργασία, δηλαδή π.χ. τριβή για να πάρει τις όποιες άλλες λεπτομερείς διεργασίες επιθυμούμε.



Εικ. 26

Στην Εικ. 26 φαίνονται ολοκάθαρα μία πτερωτή αμέσως μετά την χύτευση σε πρώτο στάδιο και μία πτερωτή μετά τις κατεργασίες καθαρισμού και ατσαλοβολής.

Μετά και τις μηχανικές κατεργασίες η πτερωτή περνά από ελέγχους ποιότητας. Οι έλεγχοι που γίνονται είναι οι παρακάτω:

1. Έλεγχος με σκληρόμετρο
2. Έλεγχος με φασματογράφο για ποιότητα κράματος
3. Έλεγχος με υπέρηχο για εσωτερικά σπασίματα και για εσωτερικές φυσαλίδες

Στην πτερωτή που κατασκευάστηκε οι έλεγχοι που έγιναν είναι:

1. Σκληρόμετρο
2. Φασματογράφος

Ο έλεγχος με υπέρηχο δεν έγινε διότι στο χώρο κατασκευής της πτερωτής (χυτήριο) δεν υπήρχε διαθέσιμος έλεγχος υπερήχου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μ. Μ. Σφραντζικόπουλος, «Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2000
2. Α. Κανάραχος, «Κατασκευαστική Μελέτη στη Μηχανολογία», Εκδόσεις 1997
3. Πολίτης Γεράσιμος, «Ανάπτυξη Μεθοδολογίας ταχείας κατασκευής εργαλείων για την παραγωγή μικρής σειράς πρωτοτύπων κατασκευών», Εκδόσεις 1998
4. *Internet*
5. «*Handbook of the Investment Casting Process*»
6. Paul F. Jacobs, «*Rapid Prototyping & Manufacturing – Fundamentals of Stereolithography*», SME 1999
7. Robert J. Spinosa, «*Investment Castings*»
8. Steve Ashley, «*Rapid Prototyping is coming of Age*», Mechanical Engineering, vol. 117, No 7, July 1995, p. 62-68
9. Terry T. Wohlers, «*CAD meets Rapid Prototyping*», Published in vol. 11, No 4, April 1992 issue of Computer – Aided Engineering