

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ EN AC-42000

Ι. Κάλυμνος⁴, Μ.Βλαχογιάννης¹, Ν. Συμινής⁴, Χ.Παρασκευά¹, Β.Συγγούνη¹, Ρ. Χατζηκιοσεγιάν¹, Γ. Σταματιάδης², Δ.Γεωργακόπουλος³, Αθ. Γεωργακόπουλος¹

¹Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Παν. Πατρών, Πάτρα, Ελλάδα

²Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Παν. Πατρών, Πάτρα, Ελλάδα

³Τμήμα Επιστήμης Υλικών, Παν. Πατρών, Πάτρα, Ελλάδα

⁴ΚΑΛΥΜΝΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΕΠΕ, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

(*marios.vlaxogiannis1998@gmail.com)

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρακάτω έρευνα αναφέρεται στην βελτιστοποίηση της διαδικασίας χύτευσης σε μόνιμη μήτρα (permanent mold casting) κράματος αλουμινίου (EN AC-42000) για το εξάρτημα βυτιοφόρου οχήματος με ονομασία πυθμενοβαλβίδα SK3'' με κεντρικό σκοπό τη μείωση του μικροπορώδους στα παραγόμενα χυτά.

Για την ανάλυση όλων των δυνατών παραμέτρων της διαδικασίας, διεξήχθησαν δύο κύκλοι παραγωγής. Κατά τον πρώτο κύκλο, παρήχθησαν 23 χυτά και δημιουργήθηκαν πέντε σειρές δειγμάτων με διαφορετικές μεθόδους παραγωγής με μέσο όρο στο ποσοστό επιτυχίας 87,0%. Ο δεύτερος κύκλος, που περιλάμβανε την παραγωγή 40 τεμαχίων, επικεντρώθηκε στην βελτιστοποίηση των κρισιμότερων παραγόντων που προέκυψαν από την πρώτη. Αποδείχθηκε ότι ο πιο καθοριστικός παράγοντας που βελτιστοποιεί τη διαδικασία είναι η χύτευση υπό κλίση. Παράλληλα, βρέθηκε το βέλτιστο θερμοκρασιακό εύρος του τήγματος να είναι $T_{pouring}=760-800^{\circ}C$ και της μήτρας $T_{mold}=350-360^{\circ}C$. Το ποσοστό επιτυχίας για τη δεύτερη παραγωγή ανήλθε στο 97,5%.

Σε συνέχεια αυτής της μελέτης ακολούθησε η ανάλυση της διαδικασίας χύτευσης του εξαρτήματος "Κεφαλή Πυθμενοβαλβίδας", στην οποία εφαρμόζοντας τις βέλτιστες μεθόδους από τις προηγούμενες παραγωγές περιορίστηκε περαιτέρω το βέλτιστο θερμοκρασιακό εύρος για την χύτευση του τήγματος στους $770-790^{\circ}C$. Κατά την παραγωγική διαδικασία παρατηρήθηκε σε περιοχές με πιο παχιές επιφάνειες μια έντονη επιφανειακή συρρίκνωση. Για την στερεοποίηση των κραμάτων, την επίδραση του ρυθμού ψύξης και τις αιτίες εμφάνισης πορώδους στις περιοχές αυτές, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική μελέτη.

Η βελτιωμένη απόδοση της παραγωγικής διαδικασίας επιβεβαιώθηκε και μέσω οπτικής παρατήρησης, με μικροσκόπιο, ενδεικτικών δειγμάτων, καθώς σε όλα τα δείγματα, εκτός από ένα, μειώθηκε η παρουσία πορώδους και ταυτόχρονα διαπιστώθηκε ευτηκτική σύσταση στα όρια των κόκκων.

Συνοπτικά, η βελτιστοποίηση της διαδικασίας χύτευσης επιτυγχάνεται μέσω της απαερίωσης της μήτρας, της προθέρμανσης της καρδιάς και της χύτευσης υπό κλίση με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση του μικροπορώδους και την αύξηση της απόδοσης της παραγωγής.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαδικασία χύτευσης δια βαρύτητα είναι μια διαδικασία κατασκευής κατά την οποία λιωμένο μέταλλο ή άλλο υλικό ρέει μέσα σε ένα καλούπι, που έχει το σχήμα του τελικού προϊόντος, και αφού κρυώσει, αποκτά το επιθυμητό σχήμα. Η διαδικασία αυτή εξαρτάται από τους εξής παράγοντες: (1) Χύτευση υπό κλίση, (2) Θερμοκρασία λουτρού & μήτρας, (3) Απαερίωση μήτρας, πριν την χύτευση (4), Απαερίωση λουτρού και (5) Καρδιά μήτρας.

Λόγω μη αποδοτικής παραγωγής του συγκεκριμένου εξάρτηματος οι προαναφερθέντες παράγοντες έρχιζαν βελτίωσης. Η βελτιστοποίηση, γενικότερα, παραγωγικών μεθόδων αποτελεί κύριο μέλημα του μηχανικού στον χώρο της βιομηχανίας και ειδικά στον τομέα μεταφοράς καυσίμων. Η πυθμενοβαλβίδα αποτελεί κύριο λειτουργικό εξάρτημα ενός βυτιοφόρου οχήματος για αυτό και κρίθηκε απαραίτητη η βελτιστοποίηση της παραγωγικής της διαδικασίας.

Ορισμένοι άλλοι χώροι εφαρμογής της μεθόδου αυτής περιλαμβάνουν την αυτοκινητοβιομηχανία, την βιομηχανία κατασκευής μετάλλων, εργαλείων, κατασκευαστικών υλικών, σιδηρουργίας, κοσμημάτων και ηλεκτρονικών. Συχνά αντιμετωπίζονται προβλήματα στα χυτά όπως ρωγμές από τη συρρίκνωση του υλικού λόγω συστολής κατά την απόψυξη του χυτού, εγκλείσματα από οξειδία που παραμένουν στο χυτό, σπηλαιώσεις που οφείλονται στη παρουσία αερίων στο μέταλλο κατά τη στερεοποίηση καθώς και ασυνέχειες στο χυτό[1].

Η χύτευση υπό κλίση είναι μια προηγμένη μορφή της χυτευτικής διαδικασίας που χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας και αποτελεί μια συνήθης πρακτική αντιμετώπισης των παραπάνω προβλημάτων. Παρέχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους χυτεύσεων, συγκεκριμένα προσφέροντας ομαλή ροή του χυτού και τη δημιουργία μικρότερης επιφάνειας εναλλαγής μειώνοντας αισθητά το μικροπορώδες και τις ρωγμές.

Αξιοσημείωτα σημαντική παράμετρο αποτελεί και η θερμοκρασία του λουτρού & της μήτρας διότι οι υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της χύτευσης μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα του υλικού και να οδηγήσουν σε αστοχία. Επίσης, η απαερίωση της μήτρας πριν την χύτευση είναι κρίσιμη για την αποφυγή ανεπιθύμητων αερίων που μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα του εξαρτήματος. Τέλος, η σωστή σχεδίαση της καρδιάς της μήτρας επηρεάζει τη ροή του υλικού και την ομοιογένεια του πορώδους.

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν βασισμένα σε βιβλιογραφική μελέτη με έμφαση στην στερεοποίηση μετάλλων, την επίδραση ρυθμού ψύξης και την εμφάνιση πορώδους στα χυτά^[2].

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Με βάση τα συμπεράσματα της βιβλιογραφικής μελέτης καταστρώθηκε πρόγραμμα για 2 παρτίδες (χυτήρια) συνολικά. Ο σκοπός του προγράμματος εκτός από την επίτευξη της καλύτερης δυνατής ποιότητας του χυτού ήταν και η ευκολία εφαρμογής της διαδικασίας από τους χειριστές.

Συγκεκριμένα, στην 1^η παρτίδα παραγωγής πυθμενοβαλβίδας SK3[™] σχηματίστηκαν 5 σειρές δοκιμών (Πίνακας 1) και παρήχθησαν 23 τεμάχια προκειμένου να εξεταστούν όλοι οι παράμετροι που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Επιπλέον, κατασκευάστηκε ένα χείλος εισόδου για την ομαλότερη ροή του χυτού στη μήτρα. Σε κάθε δείγμα έγινε και η αντίστοιχη καταγραφή της θερμοκρασίας λουτρού ($T_{pouring}$) και μήτρας (T_{mold}). Από αυτά, μόνο σε 13 καταγράφηκαν οι θερμοκρασίες λόγω βλάβης του θερμομέτρου.

Πίνακας 1. Παράμετροι που εξετάστηκαν στην πρώτη παρτίδα παραγωγής

ΔΕΙΓΜΑΤΑ	ΚΛΙΣΗ	ΣΥΝΕΧΗΣ ΑΠΑΕΡΙΩΣΗ ΛΟΥΤΡΟΥ	ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΡΔΙΑΣ	ΑΠΑΕΡΙΩΣΗ ΜΗΤΡΑΣ
A (1-6)	✓	✗	✗	✗
B (1-5)	✓	✓	✗	✗
C (1-5)	✓	✓	✓	✗
D (1-5)	✓	✗	✓	✓
E (1-3)	✗	✗	✗	✓

Για τη 2^η παρτίδα παρήχθησαν 40 τεμάχια (Πίνακας 2). Ενώ, ομοίως με τη 1^η, έγινε και η αντίστοιχη καταγραφή της θερμοκρασίας λουτρού και μήτρας.

Πίνακας 2. Παράμετροι που εξετάστηκαν στην δεύτερη παρτίδα παραγωγής

ΔΕΙΓΜΑΤΑ	ΚΛΙΣΗ	ΑΠΑΕΡΙΩΣΗ ΛΟΥΤΡΟΥ	ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΡΔΙΑΣ	ΑΠΑΕΡΙΩΣΗ ΜΗΤΡΑΣ
K1-K20	✓	✗	✓	✓
K21-K26	✓	✗	✓	✗
K26-K40	✓	✗	✓	✓

Στην συνέχεια η έρευνα επικεντρώθηκε στην παρασκευή του εξαρτήματος “κεφαλή πυθμενοβαλβίδας”. Για να επαληθευθούν οι ίδιες παράμετροι με πριν καταστρώθηκε ξανά πρόγραμμα για μία παρτίδα. Σε αυτήν παρήχθησαν 34 τεμάχια (Πίνακας 3), ενώ ξανά κατασκευάστηκε νέο χείλος εισόδου προσαρμοσμένο για τη μήτρα ‘κεφαλή πυθμενοβαλβίδας’.

Πίνακας 3. Παράμετροι που εξετάστηκαν στην πρώτη παρτίδα παραγωγής

ΔΕΙΓΜΑΤΑ	ΚΛΙΣΗ	ΑΠΑΕΡΙΩΣΗ ΜΗΤΡΑΣ	ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΡΔΙΑΣ
1-34	✓	✓	✓

Για κάθε σειρά πειραμάτων ακολουθήθηκε η έως τώρα παραγωγική διαδικασία της βιομηχανίας Σ.ΚΑΛΥΜΝΟΣ ΑΒΕΕ που περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα και εξετάζει τους πέντε παράγοντες που προαναφέρθηκαν στην ‘ΕΙΣΑΓΩΓΗ’:

Στο **1ο βήμα** της παραγωγικής διαδικασίας, πραγματοποιείται η προετοιμασία του υλικού. Αυτό περιλαμβάνει την τήξη ράβδων κράματος αλουμινίου και υπολειμμάτων αυτού από τα προηγούμενα τεμάχια παραγωγής στο χωνευτήριο, μέσω θέρμανσης με μη αυτόματο καυστήρα, για ένα χρονικό διάστημα 3 ωρών. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, επεξεργάζονται συνολικά 200kg υλικό ανά χυτήριο. Ακολούθως, πραγματοποιείται η απαερίωση στους 700 °C, με

την προσθήκη 4 ταμπλετών αζώτου. Μετά από αυτήν τη διαδικασία, αναμένεται ένα διάστημα 10 λεπτών πριν από τη μηχανική απομάκρυνση της σκωρίας.

Το **2ο βήμα** της διαδικασίας επικεντρώνεται στην προετοιμασία της μήτρας. Αρχικά, η μήτρα καθαρίζεται με αμμοβολή, προετοιμάζοντάς την για την επόμενη χύτευση. Έπειτα, η μήτρα θερμαίνεται με φλόγιστρο στους 350 °C και ακολουθεί η βαφή της με μονωτική επικάλυψη, η οποία ενισχύει την προστασία της μήτρας. Στη συνέχεια, και έπειτα αφήνεται σε αναμονή για 10 λεπτά.

Στο **3ο βήμα**, προετοιμάζονται τα εργαλεία και τα όργανα που θα χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία. Καταρχάς, πραγματοποιείται η βαφή με μονωτική επικάλυψη του δοχείου μεταφοράς του τήγματος από το λουτρό στη μήτρα. Μετά, συνεχίζεται η βαφή με μονωτική επικάλυψη του θερμομέτρου, προετοιμάζοντάς το για τη χρήση του κατά τη διαδικασία.

Στο **4ο βήμα** της διαδικασίας πραγματοποιείται η χύτευση του υλικού στη μήτρα. Η διάρκεια της χύτευσης είναι 10 δευτερόλεπτα, ενώ ακολουθεί ο χρόνος στερεοποίησης του υλικού για 350 δευτερόλεπτα. Τέλος, γίνεται το άνοιγμα της μήτρας και η αφαίρεση του χυτού, με διάρκεια που κυμαίνεται από 10 έως 18 δευτερόλεπτα. Καταστρώθηκε πρόγραμμα για 2 παρτίδες (χυτήρια) συνολικά. Ο σκοπός του προγράμματος εκτός από την επίτευξη της καλύτερης δυνατής ποιότητας του χυτού ήταν και η ευκολία εφαρμογής της διαδικασίας από τους χειριστές.

Στο **5ο βήμα** και τελευταίο της διαδικασίας, πραγματοποιούνται οι ενέργειες προετοιμασίας για την επόμενη χύτευση. Αρχικά, γίνεται το κλείσιμο της μήτρας, με διάρκεια που κυμαίνεται από 8 έως 10 δευτερόλεπτα. Έπειτα, ακολουθεί το άνοιγμα της μήτρας μέχρι τη μέση, με διάρκεια 4 δευτερολέπτων, και ο αερισμός της μήτρας και η τοποθέτηση της επόμενης καρδιάς, με συνολική διάρκεια 17 δευτερολέπτων. Τέλος, γίνεται το κλείσιμο της μήτρας, με διάρκεια 6 δευτερολέπτων.



Εικόνα 1: πειραματική διάταξη

Για να διασφαλιστεί η ακεραιότητα των πειραμάτων πρέπει να δοθεί προσοχή στην διαρροή από το χείλος της εισόδου, στην υπερθέρμανση του κράματος αλουμινίου, στην επιτρεπτή ανακύκλωση του μετάλλου που περισσεύει από την κατεργασία του χυτού (μπουκαδούρα) σε ποσοστά έως 40% του συνολικού βάρους του φορτίου στις σταθερές θερμοκρασίες λουτρού και μήτρας, στις αναταράξεις κατά την μεταφορά. Παράλληλα τα σιδερένια εργαλεία που μπορούν να έρθουν σε επαφή με το μέταλλο πρέπει να είναι κατάλληλα βαμμένα για να αποφευχθεί η μόλυνση του κράματος.

Τα **υλικά** που χρησιμοποιήθηκαν: κράμα αλουμινίου EN AC-42000 (AlSi7Mg) από την εταιρία από τη Pegasus, ράβδοι βορίου-Τιτανίου STICKLOY, ταμπλέτες απαερίωσης αζώτου ELDIRON 201, καρδιές Cronik ίδιας παραγωγής από χαλαζιακή άμμο από την εταιρία Comieco

(προϊόν codice socio n.017,Cod 111) εμποτισμένη με ρητίνη. Τα **όργανα**, οι συσκευές και τα μηχανήματα που ήταν απαραίτητα για την διεξαγωγή των πειραμάτων είναι: καμίνι (Gasparini Srl), θερμόμετρο (Uteco ABEE, Code: 4003839), φλόγιστρο, μήτρα (Κάλυμνος Σάββας) , κλειστικό μηχανήμα (UTAS). Σημαντικό ρόλο στη διαδικασία είχαν και τα **μέτρα ασφαλείας** καθώς, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων τηρούνταν όλα τα μέτρα ατομικής προστασίας (πυρίμαχα γάντια, στολές και παπούτσια) σύμφωνα με τους κανονισμούς υγιεινής και ασφάλειας της εταιρείας και των ευρωπαϊκών κανονισμών.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Για την αποτελεσματική παρατήρηση των δειγμάτων από τα πειράματα κρίθηκε απαραίτητη η μακροσκοπική αλλά και η μικροσκοπική παρατήρησή τους σε οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο με κατάλληλη προεργασία, ενώ επίσης σημαντική ήταν και η υδραυλική δοκιμή που υπέστησαν.

Καταρχάς, για την προετοιμασία του υλικού προς μικροσκοπική παρατήρηση, το δείγμα κόβεται σε συγκεκριμένη διεύθυνση χρησιμοποιώντας ειδική εργαλειομηχανή. Τα δείγματα ενσωματώνονται ολόκληρα σε ρητίνη προκειμένου να αποκτήσουν επίπεδη επιφάνεια. Ακολουθεί η επιφανειακή λείανση του δείγματος, χρησιμοποιώντας ειδικά ντουκόχαρτα με διάφορες τιμές σκληρότητας (800, 1200, 2400, 4000). Έπειτα, αφαιρούνται τυχόν υπολείμματα και πραγματοποιείται η τελική λείανση με χρήση διαμαντόπαστας. Το δείγμα υποβάλλεται σε τελικό καθαρισμό με χρήση αλκοολικού υδατικού διαλύματος, προτού παρατεθεί για παρατήρηση στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο. Αυτά τα βήματα είναι κρίσιμα για την επίτευξη ακριβών και αξιόπιστων αποτελεσμάτων στην ανάλυση του μεταλλικού δείγματος. Ταυτόχρονα, στο κομμάτι της υδραυλικής δοκιμής ελέγχονται οι διαρροές ύδατος, σε πίεση 7,5 bar, του SK3”.

Πίνακας 4. Σειρές δοκιμών που εξετάστηκαν στην οπτική παρατήρηση (Πυθμενοβαλβίδα SK3”)

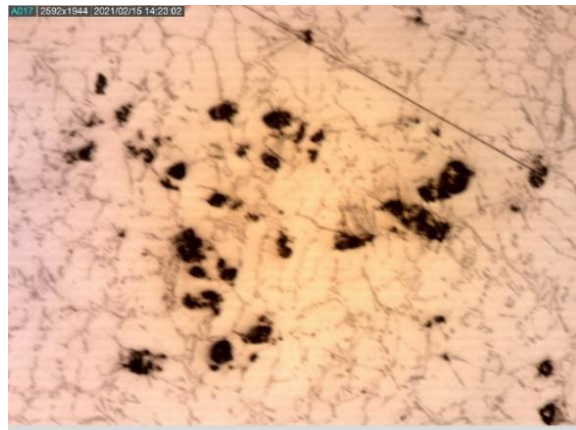
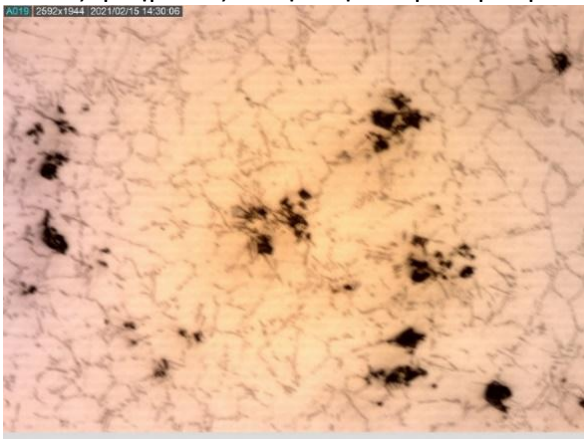
Δοκίμιο	Κλίση	Συνεχή απαερίωση λουτρού	Προθέρμανση καρδιάς	Απαερίωση μήτρας	ΔΤ °C
A5	✓	✗	✗	✗	465
B2	✓	✓	✗	✗	430
C1	✓	✓	✓	✗	460
D4	✓	✗	✓	✓	423
E2	✓	✗	✓	✓	417
K: 2, 6, 7, 9, 15, 19, 20, 21, 26, 28, 34, 40	✓	✗	✓	✓	430

Πίνακας 5. Σειρές δοκιμών που εξετάστηκαν στην οπτική παρατήρηση (Κεφαλή Πυθμενοβαλβίδας)

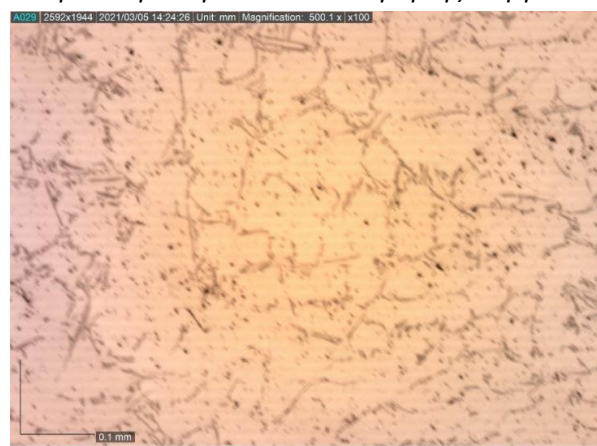
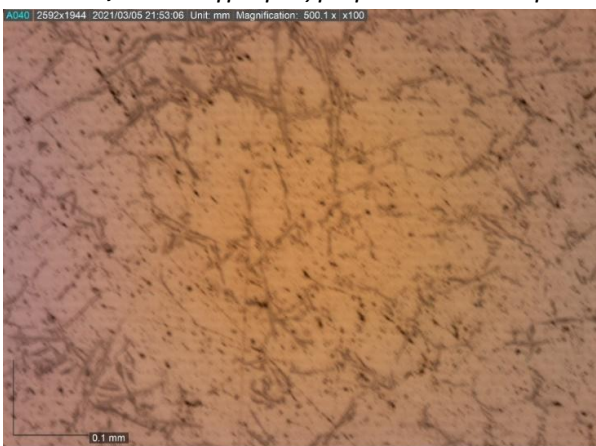
Δοκίμιο	Κλίση	Απαερίωση μήτρας	Προθέρμανση καρδιάς	Tpouring	T mold
1	✓	✓	✓	782	307

2	✓	✓	✓	770	360
7	✓	✓	✓	779	329
8	✓	✓	✓	780	325
10	✓	✓	✓	781	269
11	✓	✓	✓	771	332
12	✓	✓	✓	757	336
15	✓	✓	✓	784	336
17	✓	✓	✓	758	333
23	✓	✓	✓	784	319
29	✓	✓	✓	784	311
34	✓	✓	✓	-	-

Μέτρα που ελήφθησαν για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία της μεθόδου ελέγχθηκαν τουλάχιστον δυο περιοχές επιφανειών στα δοκίμια που παρατηρήθηκαν με μεταλλογραφικό μικροσκόπιο, ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι δεν πραγματοποιήθηκε υδραυλική δοκιμή στα δείγματα του εξαρτήματος «Κεφαλή Πυθμενοβαλβίδας».



Εικόνα 1,2. Φωτογραφίες μικροσκοπίου επιφάνειας δοκίμων πριν την βελτιστοποίηση της διεργασίας.



Εικόνα 3,4. Φωτογραφίες μικροσκοπίου επιφάνειας δοκιμίων μετά την βελτιστοποίηση της διεργασίας.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Αποτελέσματα Οπτικής Παρατήρησης Δειγμάτων

Από την οπτική παρατήρηση στα δείγματα του εξαρτήματος ‘Πυθμενοβαλβίδα SK3’ προέκυψαν τα εξής:

Όλες οι επιφάνειες των δειγμάτων, εξαιρουμένων των δοκιμίων E2 (από την πρώτη παρτίδα) και των K2, K20 και K26 (από την δεύτερη παρτίδα), εμφανίζουν πολύ καθαρές περιοχές και μικρή πυκνότητα πόρων. Επιπλέον, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των σειρών A - D, και στα δοκίμια της σειράς K. Αυτό επιβεβαιώνει για ακόμη μία φορά πως η χύτευση υπό κλίση έπαιξε τον καθοριστικότερο ρόλο καθώς ήταν ο κοινός παράγοντας για όλα.

Όσο για τα δοκίμια E2, K2, K26 παρατηρήθηκε μικρή ποσότητα πορώδους με τη μορφή φυσαλίδας. Τέλος το δοκίμιο K20 (δοκίμιο που αστόχησε) χαρακτηρίστηκε από μεγάλη πυκνότητα πορώδους.

Από την οπτική παρατήρηση στα δείγματα του εξαρτήματος ‘Κεφαλή Πυθμενοβαλβίδας’ προέκυψαν τα εξής:

Όλες οι επιφάνειες των δειγμάτων, εξαιρουμένου του δοκιμίου 7, εμφανίζουν πολύ καθαρές περιοχές και μικρή πυκνότητα πόρων. Επιπλέον, παρατηρήθηκε πως το μέγεθος των πόρων λόγω συρρίκνωσης του υλικού (πόροι σχισμές) έχουν αντίστοιχο μέγεθος (200-300μm) με αυτών που παρατηρήθηκαν στην προηγούμενη μελέτη για το εξάρτημα της πυθμενοβαλβίδας SK3’. Όσον αφορά το δοκίμιο 7 φαίνεται πως οι πόροι οφείλονται σε εγκλωβισμό αερίου στο χυτό.

5.2 Αποτελέσματα Υδραυλικής Δοκιμής Δειγμάτων

Από την υδραυλική δοκιμή των δειγμάτων της κάθε παρτίδας παραγωγής για το εξάρτημα ‘Πυθμενοβαλβίδα SK3’ πήραμε τους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 6. Αποτελέσματα υδραυλικής δοκιμής 1^{ης} παρτίδας

	Συνολικά
Παρήχθησαν	23
Επιτυχής υδραυλική δοκιμή	21
Δοκίμια που αστόχησαν	B2, B5

Τα αποτελέσματα της υδραυλικής δοκιμής στην 1η παρτίδα υπέδειξαν τις παραμέτρους που εξετάστηκαν διεξοδικότερα στη 2η. Συγκεκριμένα απορρίφθηκε η απαερίωση του λουτρού με συνεχή παροχή αζώτου στο πυθμένα του χωνευτηρίου.

Πίνακας 7. Αποτελέσματα υδραυλικής δοκιμής 2^{ης} παρτίδας

	Συνολικά
Παρήχθησαν	40
Επιτυχής υδραυλική δοκιμή	39
Δοκίμια που αστόχησαν	K20

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα της παρούσας έρευνας βελτιστοποίησης παραγωγικής διαδικασίας για τη χύτευση του εξαρτήματος της πυθμενοβαλβίδας αναδεικνύουν τη σημασία της εφαρμογής βέλτιστων πρακτικών για την επίτευξη αυξημένης απόδοσης. Ο κόπος, οι εργατοώρες, οι πόροι, η ενέργεια που καταναλώνονται δεν εγγυώνται το αποτέλεσμα μιας διεργασίας, αν δεν υπάρχει επιστημονική μέθοδος να ελεγχθεί και να βελτιστοποιηθεί. Αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό της έρευνας είναι ότι υλοποιήθηκε παράλληλα με την παραγωγή και δε χρειάστηκε να διακοπεί η τροφοδοσία σε κανένα στάδιο. Ταυτόχρονα επιτεύχθηκε η βελτιστοποίηση από 50% έως και 97,5% αποδοτικότητας της παραγωγικής διαδικασίας με καθαρά επιστημονική προσέγγιση χωρίς να χρησιμοποιηθούν επιπλέον πόροι για την έρευνα. Τέλος είναι αναγκαίο να τονιστεί ο θετικός περιβαλλοντικός και οικονομικός αντίκτυπος της παραπάνω μελέτης διότι επιτεύχθηκε σχεδόν ο υποδιπλασιασμός του περιβαλλοντικού αποτυπώματος κάθε τεμαχίου της παραγωγής ενώ ταυτόχρονα μειώθηκε το κόστος ανά τεμάχιο αφού πλέον η ανάγκη για ανακύκλωση και επανάληψη της τήξης και χύτευσης εξαρτημάτων μειώθηκε αισθητά, συγκεκριμένα με το ποσοστό απόρριψης από 50% να βλέπει ραγδαία πτώση έως και 2,5%.

Η αρχική υπόθεση που έγινε αναφορικά με τις καθοριστικές παραμέτρους: χύτευση υπό κλίση, θερμοκρασία λουτρού και μήτρας, απαερίωση μήτρας πριν την χύτευση, απαερίωση λουτρού, προθέρμανση της καρδιάς μήτρας χύτευσης, οδήγησε τελικά στην μείωση του πορώδους που εμφανίζεται στα εξαρτήματα και στο ποσοστό απωλειών ελαττωματικών τεμαχίων όπως προαναφέρθηκε.

Ειδικότερα, η **χύτευση υπό κλίση** αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα στη βελτίωση της παραγωγής με 54 από τα 57 δοκίμια στα οποία εφαρμόστηκε να ήταν επιτυχημένα αφού η αραίωση και η μείωση των πόρων οδηγεί σε μεγαλύτερη φαινόμενη πυκνότητα. Έτσι, αποφεύγεται η δημιουργία ενεργών δρόμων που πιθανόν να μετατρέπονται σε ρωγμές κάτω από πίεση προκαλώντας διαρροές. Όμως, να σημειωθεί και το γεγονός ότι όσα τεμάχια χυτεύτηκαν με τη μέθοδο tilt pour δεν εμφανίζουν πόρους με τη μορφή φυσαλίδας (δοκίμια K2, K20, K26) και εμφανίζονται με τη μορφή σχισμών. Όσον αφορά, τώρα, την **απαερίωση μήτρας και λουτρού** ύστερα από της δοκιμές κρίθηκε απαραίτητη η απαερίωση του τήγματος με 4εις ταμπλέτες αζώτου και μετά από το πέρας 10 χυτεύσεων προσθήκη άλλων 2, ενώ εξίσου σημαντική ήταν και η απαερίωση της μήτρας με πιστόλι αζώτου τόσο για την απομάκρυνση αερίων και σκόνης όσο και για την διατήρηση της σταθερής θερμοκρασίας (ψύξη). Όσο για τις **θερμοκρασίες μήτρας και λουτρού**, σημειώνεται ότι η 2^η παρτίδα ξεκίνησε σε χαμηλότερες θερμοκρασίες βάση υποδείξεως της βιβλιογραφίας οδηγώντας, όμως, αστοχίες στα δοκίμια K2, K3. Έτσι, αυξήθηκαν οι θερμοκρασίες σε $T_{pouring}=788^{\circ}\text{C}$, $T_{mold}=345^{\circ}\text{C}$ και συνεχίστηκε η παραγωγή. Συμπερασματικά ενώ

τα βιβλιογραφικά δεδομένα προτείνουν $T_{pouring}$ 690-740°C, στην συγκεκριμένη έρευνα η θερμοκρασία λουτρού διατηρήθηκε στους 760-800°C όπου δεν παρατηρείται κάποια συσχέτιση θερμοκρασίας με την επιτυχία των δειγμάτων στην υδραυλική δοκιμή. Όσον αφορά τη μήτρα προτείνεται θερμοκρασιακό εύρος 350-360°C. Προφανής αιτία της δυσαρμονίας βιβλιογραφικών δεδομένων και πειραμάτων οφείλεται στην μείωση τη θερμοκρασίας κατά τη μεταφορά τη τήγματος από το λουτρό στη μήτρα.

Από την παραπάνω ανάλυση που έγινε στα δεδομένα του πειράματος προτείνονται οι παρακάτω αλλαγές και προσθήκες στα ήδη υπάρχοντα βήματα παραγωγής:

- Για την πυθμενοβαλβίδα SK3”:

Στην **προετοιμασία υλικού** προτείνεται η μη υπέρβαση του ορίου του 40% μπουκαδούρας κατά την τήξη του κράματος, ενώ όταν το λουτρό φτάσει στους 650°C να προστεθούν ράβδοι βορείου 300 gr/200 kg αλουμινίου. Κατά την προσθήκη των 4^{ων} ταμπλετών αζώτου προτείνεται να εισαχθούν πρώτα οι 2 και ύστερα από χρόνο 5 λεπτών και ξαφρίσματος να γίνει προσθήκη των άλλων 2. Τέλος, προτείνεται η εισαγωγή θερμομέτρου του οποίου η ένδειξη δεν πρέπει να πέσει κάτω από τους 760°C, ενώ η χύτευση μπορεί να ξεκινήσει όταν αυτή φτάσει στους 790°C-800°C.

Στην **προετοιμασία της μήτρας** σαν επιπλέον βήμα προτείνεται η μόνωση της εισόδου με πετροβάμβακα.

Στο 3^ο βήμα όπου γίνεται η **προετοιμασία των εργαλείων και οργάνων** δεν προτείνονται τροποποιήσεις από την ήδη υπάρχουσα διαδικασία.

Στο σημείο αυτό προστίθεται ένα επιπλέον βήμα που αποτελεί την **προετοιμασία της καρδιάς** όπου γίνεται προθέρμανση πάνω στο καμίνι και ο χειριστής ελέγχει τις καρδιές για να ζεσταθούν ομοιόμορφα. Η θερμοκρασία προθέρμανσης κυμαίνεται στους 80-100 °C. Η προθέρμανση γίνεται ανά 2-3 καρδιές πάνω στο καμίνι για κάθε κύκλο χύτευσης, το οποίο σημαίνει 10-15 λεπτά προθέρμανση για την κάθε πλευρά καρδιάς.

Στη συνέχεια ακολουθεί η **εκτέλεση της χύτευσης** η οποία αποτέλεσε και το καθοριστικότερο βήμα της διαδικασίας βάση των αποτελεσμάτων που αναλύθηκαν νωρίτερα. Στο κομμάτι αυτό προτείνεται η ακόλουθη διαδικασία:

- i. Ανέβασμα μήτρας έως 45°: 50 sec
- ii. Κατέβασμα μήτρας έως 0° (3-5 sec ρίψη χυτού χωρίς πάτημα του διακόπτη για κατέβασμα μήτρας 30-32 sec ρίψη χυτού με κατέβασμα της μήτρας): 40 sec
- iii. Χρόνος στερεοποίησης: 350 sec
- iv. Άνοιγμα μήτρας και αφαίρεση χυτού: 10 -18 sec
- v. Κλείσιμο μήτρας: 8 -10 sec

Τελικό βήμα αποτελεί η **προετοιμασία για την επόμενη χύτευση** όπου επίσης δεν προτείνονται αλλαγές στην ήδη υπάρχουσα διαδικασία και **συνολικά** καταλήγουμε ότι η διάρκεια παραγωγής καθενός από τα εξαρτήματα κυμαίνεται μεταξύ 8-9 λεπτών.

- Για την Κεφαλή Πυθμενοβαλβίδας:

Ομοίως τα ίδια με προηγουμένως βήματα προτείνονται με μία παραλλαγή στο 5^ο βήμα που αφορά την **εκτέλεση χύτευσης** όπου τώρα ο χρόνος στερεοποίησης θα μειωθεί στα 300 sec ανά χυτό. **Συνολικά**, η διαδικασία αυτή διαρκεί 7-8 λεπτά.

Αξίζει επίσης να σημειωθούν περιορισμοί και προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν κατά την παραγωγική διαδικασία:

- i. Αντιμετώπιστηκε πρόβλημα διαρροής με το χείλος εισόδου που είχε δημιουργηθεί για το καλούπι χύτευσης. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, δημιουργήθηκε ένα βοηθητικό εξάρτημα που εμπόδιζε το λιωμένο αλουμίνιο να διαφύγει και εξασφάλιζε την ομαλή εισαγωγή του στο καλούπι.
- ii. Η διαδικασία απαερίωσης της μήτρας δεν εφαρμόστηκε υπό κλίση για τα πρώτα οκτώ δοκίμια. Αυτή η κατάσταση προκάλεσε αρκετά προβλήματα στην επιφάνεια του υλικού, με αποτέλεσμα την εμφάνιση εξωτερικών πόρων από τα θρύμματα της καρδιάς. Ωστόσο, με την εφαρμογή της απαερίωσης της μήτρας κατά τη διάρκεια που το καλούπι βρισκόταν στη μέγιστη επιτρεπόμενη κλίση, το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με επιτυχία.
- iii. Το αυτόματο σύστημα θερμομέτρου που ενεργοποιεί τον καυστήρα είχε προγραμματιστεί αρχικά να τον ανάβει όταν η θερμοκρασία του χωνευτηρίου έπεφτε κάτω από τους 765°C. Αντίστοιχα, έσβηνε όταν ξεπερνούσε την αναφερόμενη θερμοκρασία. Η δεδομένη τιμή αναφοράς παρουσίασε προβλήματα καθώς λόγω της θερμικής αδράνειας το τήγμα έπεφτε έως και τους 757°C προκαλώντας καθυστέρηση στη παραγωγή, έως ότου το τήγμα επανέλθει στο επιτρεπτό εύρος χύτευσης (τα χυτά 12 και 17 παρήχθησαν εκτός ορίων). Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε αλλάζοντας την θερμοκρασία αναφοράς στους 775°C. Το θερμοκρασιακό εύρος Trounging περιορίστηκε στους $\pm 20^\circ\text{C}$ (770-790°C).

Περαιτέρω έρευνα μπορεί να πραγματοποιηθεί στην μελέτη αντιδιαβρωτικής προστασίας, στην έψηση της καρδιάς του χυτού, στον ρυθμό ψύξης και άλλων θερμικών φαινομένων στο εσωτερικό του υλικού και στην πλήρη θερμική μελέτη λειτουργίας του καυστήρα και βελτιστοποίηση του σημείου επαναπλήρωσης του υλικού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΛΟΥΚΑ ΓΙΩΡΓΟΣ, ΠΑΤΣΑΛΟΣΑΒΒΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ (2008). «ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΥΤΕΥΣΗΣ», 7.
- [2] ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΗ ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ,Serope Kalpakjian κεφ.10