

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ
ΕΙΚΟΝΑΣ “IMAGE-PRO PLUS”
ΣΤΟ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟ
ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ
ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΙ
ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΗ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ**

Διπλωματική Εργασία
Καλπαξίδης Παντελής

Επιβλέπων Καθηγητής
Δ.Ι.Παντελής

Αθήνα, Μάρτιος 2005

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία με τίτλο: «Εφαρμογή του λογισμικού ανάλυσης εικόνας “Image-Pro Plus” στο χαρακτηρισμό των στερεοποιημένων σωματιδίων που έχουν σχηματιστεί με τεχνική ψεκασμού πλάσματος», ολοκληρώθηκε υπό την επίβλεψη του Αναπλ. Καθηγητή κ. Δ. Ι. Παντελή της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π και του Υποψηφίου Διδάκτορα Δημήτρη Κ. Χριστούλη κατά το Ακαδημαϊκό έτος 2004-2005. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της εργασίας έγκειται στο ότι δεν υπάρχουν πολλές μελέτες στον συγκεκριμένο τομέα που να περιέχουν τη χρήση κάποιου λογισμικού ανάλυσης εικόνας στη μελέτη στερεοποιημένων σωματιδίων και άρα αποτελεί ένα πρώτο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον καθηγητή κ. Δ. Ι. Παντελή για την άμεση υποστήριξη, ενθάρρυνση και συμπαράσταση που επέδειξε καθ’ όλη τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας και τον Υποψήφιο Διδάκτορα Δημήτρη Κ. Χριστούλη, χωρίς τη συμβολή του οποίου δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί η παρούσα μελέτη. Επιπρόσθετα η επιστημονική καθοδήγηση και των δυο συντέλεσε καταλυτικά στην εξαγωγή ορθών και έγκυρων συμπερασμάτων.

Καλπαξίδης Παντελής
Φεβρουάριος 2005

Περιεχόμενα

A. Θεωρητικό Μέρος

	Σελ
Κατάλογος Σχημάτων.....	1
Κατάλογος Πινάκων.....	5
A.0 Τυπολόγιο.....	7
A.1 Σκοπός.....	8
A.2 Εισαγωγή στον Θερμικό Ψεκασμό.....	9
A.2.1 Μέθοδοι Θερμικού Ψεκασμού.....	10
A.2.1.1 Ψεκασμός Ηλεκτρικού Τόξου.....	10
A.2.1.2 Ψεκασμός Φλόγας Καύσης.....	11
A.2.1.3 Ψεκασμός Υψηλής Ταχύτητας Φλόγας Καύσης και Ψεκασμός Όπλου Εκτόνωσης.....	12
A.2.1.4 Ψεκασμός Πλάσματος.....	13
A.2.1.4.1 Ατμοσφαιρικός Ψεκασμός Πλάσματος.....	13
A.2.1.4.2 Ψεκασμός Πλάσματος υπό Κενό.....	15
A.2.1.4.3 Ψεκασμός Πλάσματος υπό Ελεγχόμενη Ατμόσφαιρα.....	15
A.2.2 Ψυχρός Ψεκασμός.....	17
A.2.3 Εφαρμογές Επιστρωμάτων Θερμικού Ψεκασμού.....	18
A.3 Μορφολογία Επιστρώματος.....	21
A.3.1 Φαινόμενα κατά την πρόσκρουση.....	22
A.3.1.1 Παραμόρφωση σωματιδίων.....	22
A.3.1.2 Θερμοκρασία των τηγμένων σωματιδίων κατά την πρόσκρουση.....	29
A.3.1.3 Πυρηνοποίηση, στερεοποίηση και ανάπτυξη των κρυστάλλων.....	35
A.3.2 Μηχανισμοί πρόσφυσης.....	37
A.4 Μελέτη των επιστρωμάτων θερμικού ψεκασμού με «Image Analysis»	39
A.4.1 Μέσο πάχος απόθεσης.....	42
A.4.2 Κατανομές μεγέθους και σχήματος.....	44

B. Πειραματικό Μέρος

Σελ

B.0	Εφαρμογή του «Image Pro Plus» στη μελέτη splats Θερμικού Ψεκασμού.....	46
B.1	Λογισμικό «Image Pro Plus».....	47
B.1.1	Ρύθμιση Επιπέδου Έντασης.....	49
B.1.2	Εφαρμογή φίλτρων.....	53
B.1.2.1	Enhancement Filters.....	54
B.1.2.2	Edge Filters.....	56
B.1.2.3	Morphological Filters.....	57
B.1.2.4	Special Filters.....	60
B.1.3	Ρύθμιση συχνότητας μιας εικόνας.....	62
B.1.4	Εντολές μετρήσεων.....	63
B.2	Πειραματική Διαδικασία.....	65
B.2.1	Υλικό υποστρώματος και πούδρας ψεκασμού.....	66
B.2.2	Διάταξη συλλογής μικρού αριθμού splats.....	69
B.2.3	Επιπλέον επεξεργασία εικόνων των splats.....	73
B.3	Αποτελέσματα Πειραματικής Διαδικασίας.....	74
B.3.1	Παρουσίαση των αποτελεσμάτων.....	75
B.3.2	Υποστρώματα με τραχύτητα $Ra=0.03\mu m$	77
B.3.2.1	Μελέτη της Επιφάνειας των splats με Οπτικό Μικροσκόπιο.....	77
B.3.2.2	Μελέτη με της Τομής των splats με Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM).....	80
B.3.2.3	Μελέτη της Επιφάνειας των splats με Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης (AFM).....	86
B.3.3	Υποστρώματα με τραχύτητα $Ra=0.5\mu m$	91
B.3.3.1	Μελέτη της Επιφάνειας των splats με Οπτικό Μικροσκόπιο.....	91
B.3.3.2	Μελέτη της Τομής των splats με Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM).....	93
B.4	Τελικά συμπεράσματα.....	97
B.5	Γενικό συμπέρασμα.....	100
Γ.	Βιβλιογραφία.....	101
Δ.	Παράρτημα.....	105

Κατάλογος Σχημάτων

	Σελ.
Σχήμα 1: Σχηματική διάταξη μεθόδου Θερμικού Ψεκασμού.....	9
Σχήμα 2: Μέθοδοι θερμικού ψεκασμού ανάλογα με την πηγή θερμότητας που χρησιμοποιείται.....	9
Σχήμα 3: Σχηματική διάταξη ψεκασμού με δημιουργία ηλεκτρικού τόξου.....	10
Σχήμα 4: Σχηματική διάταξη του ψεκασμού με χρήση φλόγας καύσης.....	11
Σχήμα 5: Σχηματική διάταξη του ηλεκτρικού τόξου ψεκασμού πλάσματος.....	13
Σχήμα 6: Γενική διάταξη της μεθόδου APS.....	13
Σχήμα 7: Φωτογραφία και σχηματική διάταξη του CAPS.....	16
Σχήμα 8: Ταχύτητες σωματιδίων (APS) συναρτήσει απόστασης από έξοδο του δαυλού ψεκασμού.....	24
Σχήμα 9: Ταχύτητες σωματιδίων (VPS) σε συνάρτηση με την απόσταση από την έξοδο του δαυλού ψεκασμού.....	25
Σχήμα 10: Θεωρητικός υπολογισμός του πάχους splat Al_2O_3 , με δυο διαφορετικές μεθόδους.....	25
Σχήμα 11(α,β): Δυο τυπικές μορφές splat: το «κυκλικό splat» με μικρές προεκτάσεις στην περιφέρεια και το «διασκορπισμένο splat».....	26
Σχήμα 12: Νομογράφημα που δίνει τη λύση της εξίσωσης (9).....	30
Σχήμα 13: Πειραματική διάταξη που επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση της θερμοκρασίας των σωματιδίων αμέσως μετά την πρόσκρουση.....	32
Σχήμα 14: Η μεταβολή με τον χρόνο της θερμοκρασίας του splat Nb κατά την διαπλάτυνσή του σε υπόστρωμα από γυαλί (+) και χάλυβα (■).....	33
Σχήμα 15: Μεταβολή της θερμοκρασίας των σωματιδίων σε συνάρτηση με την ταχύτητα πρόσκρουσης για Al_2O_3 (επάνω καμπύλη), TiO_2 (μεσαία καμπύλη) και WC – Co (κάτω καμπύλη).....	34
Σχήμα 16: Επιμήκης μορφή, αποτέλεσμα της στερεοποίησης.....	35
Σχήμα 17: Μικροδομή τύπου «τουβλοδομή».....	35

Σχήμα 18: Σκίτσο της μηχανικής “στερέωσης” των στερεοποιημένων σωματιδίων πάνω στις ανωμαλίες της επιφάνειας του υποστρώματος.....	37
Σχήμα 19α: Τρία διαφορετικά επίπεδα τομής του ίδιου σώματος που οδηγούν σε τρεις διαφορετικές μορφολογίες.....	40
Σχήμα 19β: Δυο διαφορετικά σώματα, για το ίδιο επίπεδο τομής, παρουσιάζουν την ίδια μορφολογία.....	41
Σχήμα 20: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας για τον καθορισμό του μέσου πάχους.....	42
Σχήμα 21: Σχηματική απεικόνιση των επιμήκων και πεπλατυσμένων ελλειψοειδών.	44
Σχήμα 22: Εικονίδιο «Contrast Enhancement».....	49
Σχήμα 23: Μπάρα ρύθμισης Φωτεινότητας, Αντίθεσης και «Διόρθωσης Γάμμα» μέσω των κυλιόμενων σημείων ελέγχου.	50
Σχήμα 24: Παράθυρο επιλογών που εμφανίζεται όταν ενεργοποιηθεί η επιλογή «More» του Σχήματος 21.....	51
Σχήμα 25: Μορφή γραμμικής καμπύλης.....	51
Σχήμα 26: Μεταβολή σημείου ελέγχου γρ.καμπύλης.....	51
Σχήμα 27: Καρτέλα επιλογής φίλτρου της κατηγορίας Enhancement Filters.....	54
Σχήμα 28: Καρτέλα επιλογής φίλτρου της κατηγορίας Edge Filters.....	56
Σχήμα 29: Καρτέλα επιλογής φίλτρου της κατηγορίας Morphological Filters.....	57
Σχήμα 30: Η αρχική εικόνα και η εικόνα μετά την επιβολή του φίλτρου Erode	57
Σχήμα 31: Η αρχική εικόνα και η εικόνα μετά την επιβολή του φίλτρου Open	58
Σχήμα 32: Η αρχική εικόνα και η εικόνα μετά την επιβολή του φίλτρου Thinning	58
Σχήμα 33: Η αρχική εικόνα και η εικόνα μετά την επιβολή του φίλτρου Pruning	59
Σχήμα 34: Καρτέλα επιλογής φίλτρου της κατηγορίας Special Filters.....	60

	Σελ
Σχήμα 35: Η αρχική εικόνα και η εικόνα μετά την επιβολή του φίλτρου Background	60
Σχήμα 36: Εικόνα που περιέχει θόρυβο (φωτεινές κουκίδες) όπως αυτός φαίνεται μετά την εφαρμογή της εντολής «FFT».....	62
Σχήμα 37: Η αρχική εικόνα που περιέχει θόρυβο και η εικόνα μετά την διόρθωσή της	62
Σχήμα 38: Παράθυρο επιλογής εντολών μετρήσεων και εμφάνισης των αποτελεσμάτων.....	63
Σχήμα 39: Παράθυρο επιλογής Καρτέλας Εισερχόμενων / Εξερχόμενων	64
Σχήμα 40: Γραφική παράσταση της κατανομής των κόκκων της πούδρας.....	67
Σχήμα 41: Φωτογραφίες SEM των κόκκων της πούδρας σε έξι διαφορετικές κλίμακες.....	68
Σχήμα 42: Σχηματική διάταξη συλλογής μικρού αριθμού σταγονιδίων.....	69
Σχήμα 43 (α-δ): Φωτογραφίες από τη διάταξη συλλογής μικρού αριθμού splats.....	70
Σχήμα 44: Σχηματικό διάγραμμα κατηγοριοποίησης αποτελεσμάτων.....	76
Σχήμα 45: Φωτογραφία οπτικού μικροσκοπίου για $T_s = 200^\circ C$	77
Σχήμα 46: Splats σε λεία υποστρώματα: (α, β): $T_s = 200^\circ C$ (γ, δ): $T_s = 240^\circ C$, (ε, στ): $T_s = 270^\circ C$	78
Σχήμα 47: Σχηματική αναπαράσταση των στοιχείων του Shape Factor.....	79
Σχήμα 48α: Φωτογραφία τομής από SEM για $T_s = 200^\circ C$	81
Σχήμα 48β: Μεγέθυνση της περιοχής του κόκκινου πλαισίου 1.....	81
Σχήμα 49α: Φωτογραφία τομής από SEM για $T_s = 240^\circ C$	82
Σχήμα 49β: Μεγέθυνση της περιοχής του κόκκινου πλαισίου 3.....	82
Σχήμα 50α: Φωτογραφία τομής από SEM για $T_s = 270^\circ C$	83
Σχήμα 50β: Μεγέθυνση της περιοχής του κόκκινου πλαισίου 4.....	83

Σχήμα 51: Τρισδιάστατη απεικόνιση splats με AFM για λεία υποστρώματα (α, β): $T_s = 200^\circ C$, (γ, δ): $T_s = 240^\circ C$, (ε, στ): $T_s = 270^\circ C$	86
Σχήμα 52: Προφίλ splat κατά μήκος της μαύρης γραμμής.....	87
Σχήμα 53: α) Το κεντρικό δισκίο του splat β) Η εξωτερική στεφάνη του splat γ) Το πλήρες σχήμα του splat.....	88
Σχήμα 54: Μηχανισμός στερεοποίησης με τήξη του υποστρώματος.....	90
Σχήμα 55: Splats σε υποστρώματα με $R_a = 0.5 \mu m$. (α, β): $T_s = 200^\circ C$, (γ, δ): $T_s = 240^\circ C$, (ε, στ): $T_s = 270^\circ C$	91
Σχήμα 56α: Φωτογραφία τομής από SEM για $T_s = 200^\circ C$	93
Σχήμα 56β: Μεγέθυνση του κόκκινου πλαισίου 1.....	93
Σχήμα 57α: Φωτογραφία τομής από SEM για $T_s = 240^\circ C$	94
Σχήμα 57β: Μεγέθυνση του κόκκινου πλαισίου 2.....	94
Σχήμα 58α: Φωτογραφία τομής από SEM για $T_s = 270^\circ C$	95
Σχήμα 58β: Μεγέθυνση του κόκκινου πλαισίου 3.....	95

Κατάλογος Πινάκων

	Σελ
ΤΥΠΟΛΟΓΙΟ.....	7
ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-1: Χαρακτηριστικά Ψεκασμού Ηλεκτρικού Τόξου.....	10
ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-2: Χαρακτηριστικά Ψεκασμού Φλόγας Καύσης.....	11
ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-3: Χαρακτηριστικά Ψεκασμού Υψηλής Ταχύτητας με Φλόγα Καύσης.....	12
ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-4: Χαρακτηριστικά Ψεκασμού Όπλου Εκτόνωσης.....	12
ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-5: Χαρακτηριστικά Ατμοσφαιρικού Ψεκασμού Πλάσματος.....	14
ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-6: Χαρακτηριστικά Ψεκασμού Πλάσματος Υπό Κενό.....	15
ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-7: Χαρακτηριστικά Ψεκασμού Πλάσματος Υπό Ελεγχόμενη Ατμόσφαιρα.....	15
ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-8: Διάφορες εκφράσεις του βαθμού διαπλάτυνσης ξ , που περιγράφει την εξάπλωση των splat που προσκρούουν στο υπόστρωμα.....	23
ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-9: Μορφολογία Mo splat ψεκασμένο με διάφορες τεχνικές.....	28
ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-10: Υπολογισμοί σχετικά με τη θερμοκρασία διεπιφάνειας και το χρόνο στερεοποίησης (ο τελευταίος βασίζεται σε πειραματική εκτίμηση του h).....	31
ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-11: Η περιεκτικότητα σε οξυγόνο σε επιστρώσεις, με τις μεθόδους APS και SPS.....	38
ΠΙΝΑΚΑΣ Π-1: Χημική ανάλυση πούδρας χαλκού.....	66
ΠΙΝΑΚΑΣ Π-2: Κατανομή διαμέτρων κόκκων πούδρας χαλκού.....	67
ΠΙΝΑΚΑΣ Π-3: Παράμετροι ψεκασμού.....	71
ΠΙΝΑΚΑΣ Π-4: Χαρακτηριστικά επιφανειών υποστρωμάτων και τεχνική ψεκασμού.....	72
ΠΙΝΑΚΑΣ Π-5: Υπολογισμός του $\overline{S.F}$ για τραχύτητα $R_a = 0.03\mu m$	79
ΠΙΝΑΚΑΣ Π-6: Υπολογισμός του (ξ) με SEM για τραχύτητα $R_a = 0.03\mu m$	85
ΠΙΝΑΚΑΣ Π-7: Υπολογισμός του (ξ) με AFM για τραχύτητα $R_a = 0.03\mu m$	89

ΠΙΝΑΚΑΣ Π-8: Σύγκριση των τιμών του (ξ) από SEM και AFM.....	90
ΠΙΝΑΚΑΣ Π-9: Υπολογισμός του $\overline{S.F}$ για τραχύτητα $R_a = 0.5 \mu m$	92
ΠΙΝΑΚΑΣ Π-10: Υπολογισμός του (ξ) με SEM για τραχύτητα $R_a = 0.5 \mu m$	96
ΠΙΝΑΚΑΣ Π-11: Σύγκριση του $\overline{S.F}$ για τραχύτητα $R_a = 0.03 \mu m$ και $R_a = 0.5 \mu m$	97
ΠΙΝΑΚΑΣ Π-12: Σύγκριση των τιμών του (ξ) από SEM για $R_a \approx 0.03 \mu m$ και για $R_a \approx 0.5 \mu m$	98
ΠΙΝΑΚΑΣ Π-13: Σύγκριση των τιμών του (ξ) από SEM και από AFM για $R_a \approx 0.03 \mu m$	99

<i>Όνομασία</i>	<i>Μαθηματική Έκφραση</i>	<i>Μονάδες [S.I]</i>
Διάμετρος splat	d_p	μm
Επιφάνεια splat	A	m^2
Ταχύτητα splat (πριν την πρόσκρουση)	v	m/s
Ιξώδες τηγμένου σωματιδίου	η_ℓ	$N \cdot s / (m^2)$
Πυκνότητα τηγμένου υλικού	ρ_ℓ	kg / m^3
Συντελεστής επιφανειακής τάσης	σ	N/m
Βαθμός διαπλάτυνσης	$\xi = \frac{2}{d_p} \sqrt{\frac{A}{\pi}}$	
Αριθμός Reynolds	$Re = \frac{\rho_\ell \cdot d_p \cdot v^2}{\eta_\ell}$	
Αριθμός Weber	$We = \frac{\rho_\ell \cdot d_p \cdot v^2}{\sigma}$	
Πάχος splat	$h = \frac{2 \cdot d_p}{3 \cdot \xi^2}$	m
Θερμική διαχυτότητα	α	m^2 / s
Θερμική αγωγιμότητα	λ	$W / m \cdot K$
Ειδική θερμοχωρητικότητα	c_p	$kJ / kg \cdot K$
Χρόνος ψεκασμού	$t_{0.9} = \frac{2 \cdot d_p \cdot Re^{0.2}}{3 \cdot v}$	s
Χρόνος στερεοποίησης	$t_o = \left(\frac{h}{2 \cdot a} \right)^2 \cdot \frac{1}{a}$	s
Θερμοκρασία υποστρώματος πριν την πρόσκρουση	T_S	K
Σημείο τήξης	T_m	K
Συντελεστής K_ϵ	$K_\epsilon = \frac{(\lambda_1 \cdot a_2^{0.5})}{(\lambda_2 \cdot a_1^{0.5})}$	
Λανθάνουσα θερμότητα τήξης	L	kJ / kg
Συντελεστής K_L	$K_L = \frac{c_p (T_m - T_S)}{L \cdot \pi^{0.5}}$	
Εξίσωση A	$K_\epsilon + \Phi(x) = \frac{K_L \cdot \exp(-x^2)}{x}$	
Ρίζα εξίσωσης A	x	
Πιθανότητα	$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$	
Θερμοκρασία επαφής	$T_c = T_o + \frac{K_\epsilon \cdot (T_m - T_S)}{K_\epsilon + \Phi(a)}$	K

A.1 ΣΚΟΠΟΣ

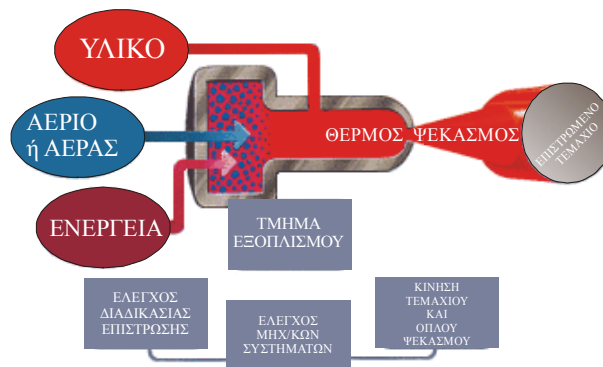
Ο σκοπός της εργασίας αυτής ήταν διπλός. Αφενός διερευνήθηκε το λογισμικό ανάλυσης εικόνας «Image Pro Plus» και οι δυνατότητές του στον τομέα ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας και αφετέρου έγινε η χρήση του λογισμικού αυτού στη μελέτη των στερεοποιημένων σωματιδίων χαλκού (Cu) που είχαν διαπλάτυνθεί σε υποστρώματα από ντουραλουμίνιο, που ανήκουν στα κράματα αλουμινίου 2000, κατά τον σχηματισμό επιστρωμάτων με την τεχνική ψεκασμού πλάσματος. Η επεξεργασία των εικόνων των splats είχε σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων και τη σύγκρισή τους με αντίστοιχα αποτελέσματα από άλλες διαδικασίες μετρήσεων, ώστε να βρεθεί κατά πόσο το Image Analysis μπορεί να χρησιμεύσει στη μελέτη των στερεοποιημένων σωματιδίων.

Η μελέτη των στερεοποιημένων σωματιδίων είναι πολύ χρήσιμη καθώς για την παραγωγή επιστρωμάτων θερμικού ψεκασμού βελτιωμένων ιδιοτήτων, θα πρέπει να ελεγχθεί όσο καλύτερα γίνεται η διαπλάτυνση των τηγμένων σωματιδίων [1,2]. Η διαπλάτυνση των τηγμένων σωματιδίων είναι μια διαδικασία η οποία εμπεριέχει πλήθος φυσικών φαινομένων τα οποία συμβαίνουν ταυτόχρονα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Αυτό το γεγονός καθιστά τη μελέτη της διαπλάτυνσης πολύπλοκη. Τα κυριότερα φυσικά στάδια σε μια τυπική διαδικασία ψεκασμού πλάσματος είναι δυο: (i) τήξη και πτήση των σωματιδίων μέσα στο δαυλό του πλάσματος και (ii) πρόσκρουση στο υπόστρωμα με ταυτόχρονη διαπλάτυνση και στερεοποίηση [3]. Είναι προφανές λοιπόν ότι η διαπλάτυνση των τηγμένων σταγονιδίων εξαρτάται τόσο από τις συνθήκες πτήσης των σωματιδίων [4,5] όσο και από ιδιότητες της επιφάνειας όπως η θερμοκρασία του υποστρώματος [6,7] η επιφανειακή τραχύτητα [8, 9], ο βαθμός διαβροχής [10,11].

Συνεπώς για τη μελέτη των στερεοποιημένων σωματιδίων απαιτούνται εξειδικευμένες πειραματικές εγκαταστάσεις καθώς και η ύπαρξη εξειδικευμένων μετρητικών οργάνων. Βασικός σκοπός, λοιπόν, αυτής της εργασίας είναι να εξεταστεί κατά πόσο το λογισμικό «Image Pro Plus» μπορεί να βοηθήσει στην ευκολότερη εξαγωγή αποτελεσμάτων για τα στερεοποιημένα σωματίδια θερμικού ψεκασμού. Η εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων με το «Image Pro Plus» θα βοηθούσε στην γρηγορότερη, και με μικρό κόστος, εξαγωγή συμπερασμάτων για τα επιστρώματα θερμικού ψεκασμού βελτιωμένων ιδιοτήτων.

A.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΘΕΡΜΙΚΟ ΨΕΚΑΣΜΟ

Αναφέρθηκε ότι splats (στερεοποιημένα σωματίδια) δημιουργούνται κατά το σχηματισμό επιστρώματος με ψεκασμό πλάσματος, ο οποίος αποτελεί τεχνική θερμικού ψεκασμού. Ο όρος "Θερμικός Ψεκασμός" [12] περιγράφει ένα σύνολο κατεργασιών κατά τις οποίες λεπτομερή κεραμικά ή μεταλλικά ή σύνθετα σωματίδια που βρίσκονται σε κατάσταση τήξης ή ρευστοποίησης, εναποτίθενται με ψεκασμό σε επιφάνεια (μεταλλική, κεραμική ή πολυμερή) κατάλληλα προετοιμασμένου υποστρώματος με σκοπό την παραγωγή μιας επικάλυψης βελτιωμένων ιδιοτήτων. Για να συμβεί αυτό είναι απαραίτητη μια πηγή θερμότητας και ένα μέσο επιτάχυνσης των τηγμένων σωματιδίων. Η σχηματική διάταξη της μεθόδου φαίνεται στο **Σχήμα 1**.



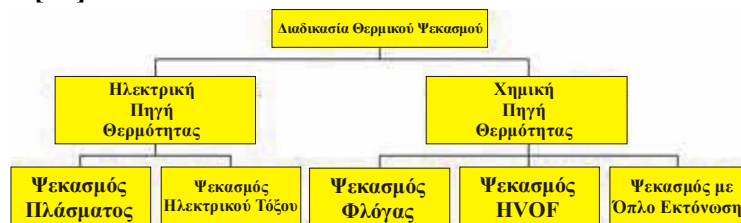
Σχήμα 1 [13]

Σχηματική διάταξη μεθόδου Θερμικού Ψεκασμού

Το αναλώσιμο υλικό μπορεί να είναι σε μορφή σκόνης, σύρματος ή ράβδου. Η τήξη του μπορεί να γίνει με καύση αερίων, με ηλεκτρικό τόξο ή με τόξο πλάσματος.

Κάθε υλικό που τήκεται ή ρευστοποιείται κατά τη θέρμανση και παράλληλα διατηρεί τη δομή και σύνθεσή του, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό ψεκασμού. Η πρόσφυση της επικάλυψης που δημιουργείται σε ένα υπόστρωμα είναι μηχανική. Κατά τον ψεκασμό υπάρχει περίπτωση να συμβεί και τήξη ενός τμήματος του υποστρώματος, κάτι που θα φανεί και στο πειραματικό μέρος της εργασίας. Έτσι, σκληρά μέταλλα και κεραμικά μπορούν να επικαλύψουν ακόμη και υποστρώματα από θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή (thermosetting). Η προηγηθείσα τράχυνση της επιφάνειας του υποστρώματος είναι απαραίτητη για την καλή σύνδεση υποστρώματος-επικάλυψης [14].

Οι διάφορες μέθοδοι του θερμικού ψεκασμού προκύπτουν ανάλογα με τη μορφή του υλικού που χρησιμοποιείται για την επικάλυψη (π.χ σύρμα, ράβδος, πούδρα κλπ) και ανάλογα με την πηγή θερμότητας που χρησιμοποιείται για την τήξη των σωματιδίων [15].



Σχήμα 2

Μέθοδοι θερμικού ψεκασμού ανάλογα με την πηγή θερμότητας που χρησιμοποιείται

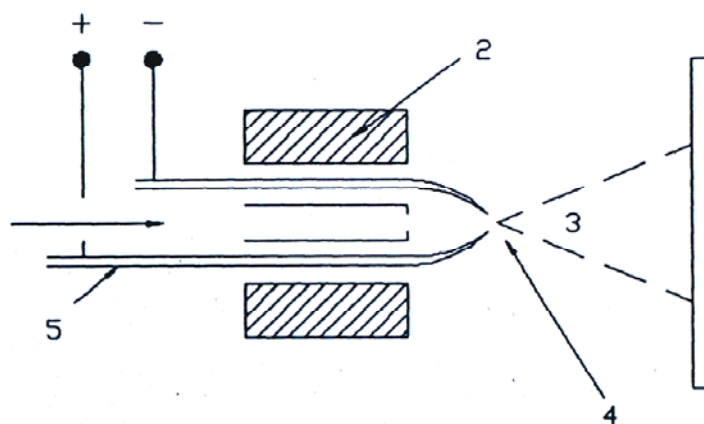
A.2.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

A.2.1.1 Ψεκάσμος με δημιουργία Ηλεκτρικού Τόξου [4,16] (Arc Wire Spraying)

Η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για μεταλλικές επικαλύψεις και περιορίζεται για εφαρμογές στις οποίες το προς απόθεση υλικό είναι αγωγίμο. Το υλικό βρίσκεται σε μορφή δυο συρμάτων μεταξύ των οποίων σχηματίζεται ηλεκτρικό τόξο (συνήθως 5 – 10 kW μέσω ωμικής αντίστασης) που τα τήκει. Πεπιεσμένος αέρας ψεκάζει τα τηγμένα σωματίδια προς την επιφάνεια του υποστρώματος. Η μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και ταχεία, παράγει επικαλύψεις για προστασία κατά της διάβρωσης και της φθοράς, αλλά χρησιμοποιείται και για την αναγόμωση φθαρμένων περιοχών. Ωστόσο τα λαμβανόμενα υποστρώματα εμφανίζουν υψηλό πορώδες (10-20%) και υψηλό ποσοστό οξειδίων (10-20%) αλλά έχουν καλή πρόσφυση. Η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία φτάνει τους 4000° C ενώ ο ρυθμός απόθεσης κυμαίνεται στα 50- 300 $\frac{g}{min}$.

Τα χαρακτηριστικά της μεθόδου φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα Θ-1.

ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΤΟΞΟΥ		
ΤΟΞΟ	Θερμοκρασία	4000 °C
	Τάση	20 – 40 V
ΑΝΑΛΩΣΙΜΟ ΥΛΙΚΟ (ΣΥΡΜΑ)	Διάμετρος	2 – 5 mm
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ	Απόσταση Ψεκασμού	50 – 170 mm
	Ταχύτητα	έως 240 m/s
	Ατμόσφαιρα	ατμοσφαιρικός αέρας, δραστική, αδρανής, κενό
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ	Πάχος	100 – 1500 μm



Σχήμα 3

Σχηματική διάταξη ψεκασμού με δημιουργία ηλεκτρικού τόξου

1: ροή αερίου, 2: ασπίδα προστασίας δαυλού ψεκασμού,

3: δέσμη τηγμένων σωματιδίων, 4: ηλεκτρικό τόξο,

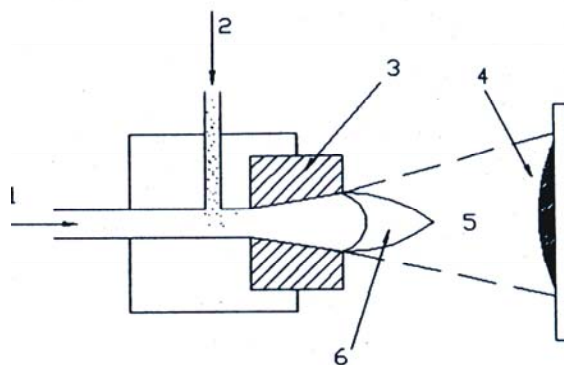
5: αναλίσκόμενα ηλεκτρόδια

Α.2.1.2 Ψεκασμός με χρήση Φλόγας Καύσης [4,16] (Combustion Flame Spraying).

Η μέθοδος αυτή, για την τήξη και την επιτάχυνση του υλικού που θα σχηματίσει την επικάλυψη, χρησιμοποιεί τη θερμότητα που παράγεται από την καύση ενός αερίου, συνήθως συμπιεσμένο αέρα ή οξυγόνο, που αναμιγνύεται με κάποιο άλλο καύσιμο (π.χ., ασετιλίνη, προπυλένιο, προπάνιο, υδρογόνο). Γενικά, με αυτή τη διαδικασία παράγονται επιστρώματα χαμηλής ποιότητας (εξαιρητικά μεγάλο πορώδες, 10-15%, και έντονη τάση για οξείδωση αν η επίστρωση είναι μεταλλική) και δεν εφαρμόζεται όπου απαιτούνται υψηλή πυκνότητα και καλή σύνδεση μεταξύ τηγμένων σωματιδίων και επιστρώματος. Οι λόγοι για την ύπαρξη αυτών των σφαλμάτων έχουν να κάνουν με τη σχετικά χαμηλή ταχύτητα ψεκασμού, και τη χαμηλή θερμοκρασία που επιτυγχάνεται μέσα στη φλόγα καύσης. Το υλικό ψεκασμού χρησιμοποιείται με τη μορφή σκόνης ή σύρματος. Παρά τα όποια σφάλματα, η μέθοδος αυτή έχει βρει χρήση σε όλο τον κόσμο εξαιτίας της απλότητας και της αποτελεσματικότητας σε συνάρτηση με το κόστος της. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί από λιγότερο εξειδικευμένους εργάτες χωρίς να εμφανίζονται σημαντικά σφάλματα.

Τα χαρακτηριστικά της μεθόδου φαίνονται στον **Πίνακα Θ-2**.

ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΦΛΟΓΑΣ ΚΑΥΣΗΣ		
ΦΛΟΓΑ	<i>Θερμοκρασία</i>	3000 °C
ΑΝΑΛΩΣΙΜΟ ΥΛΙΚΟ (ΠΟΥΔΡΑ)	<i>Σχήμα</i>	Σφαιρικό
	<i>Μέγεθος</i>	5 – 100 μm
	<i>Ρυθμός Τροφοδοσίας</i>	80 – 650 g/min
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ	<i>Απόσταση Ψεκασμού</i>	120 – 250 mm
	<i>Ατμόσφαιρα</i>	Αέρας
	<i>Ταχύτητα</i>	90 – 180 m/s
ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ	<i>Θερμοκρασία</i>	Άνευ σημασίας για κεραμικά
		έως 1000 K για μέταλλα
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ	<i>Πάχος</i>	100 – 2500 μm



Σχήμα 4

Σχηματική διάταξη ψεκασμού με χρήση φλόγας καύσης

- 1: εργαζόμενο αέριο, 2: εισαγωγή πούδρας ψεκασμού, 3: ασπίδα δαυλού,
4: επίστρωση, 5: δέσμη τηγμένων σωματιδίων, 6: φλόγα καύσης

A.2.1.3 Ψεκασμός Υψηλής Ταχύτητας με χρήση Φλόγας Καύσης [4,16] (HVOF: High Velocity Oxygen Flame).

Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνονται υπερηχητικές ταχύτητες [17] ψεκασμού με αποτέλεσμα τη σημαντική βελτίωση στη θέρμανση, τήξη και πυκνή απόθεση του υλικού, που είναι συνήθως σε μορφή πούδρας. Η καύση γίνεται σε θάλαμο πολύ υψηλής πίεσης με έξοδο μικρής διαμέτρου για να δημιουργείται αέριο ρεύμα υπερηχητικής ταχύτητας. Κατά την πρόσκρουση των τηγμένων σταγονιδίων στο υπόστρωμα εμφανίζεται ισχυρή σύνδεση με το υπόστρωμα και με τα υπόλοιπα splats της γειτονικής περιοχής, με αποτέλεσμα, οι επικαλύψεις να είναι υψηλής ποιότητας με μεγάλη πυκνότητα, υψηλή σκληρότητα και καλή πρόσφυση με το υπόστρωμα. Τα επιστρώματα που παράγονται με HVOF έχουν χαμηλό πορώδες (1-2%) και χαμηλό ποσοστό περιεχόμενων οξειδίων (1-5%). Η μέθοδος είναι ιδανική για επικαλύψεις κεραμικών και ιδίως καρβιδίων με τυπικά πάχη επιστρώσεων 100 – 300 mm.

Τα χαρακτηριστικά της μεθόδου φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα Θ-3.

ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-3		
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΦΛΟΓΑ ΚΑΥΣΗΣ		
ΦΛΟΓΑ	<i>Θερμοκρασία</i>	4500 °C (max)
ΑΝΑΛΩΣΙΜΟ ΥΛΙΚΟ (ΠΟΥΔΡΑ)	<i>Ρυθμός Τροφοδοσίας</i>	20 – 80 g/min
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ	<i>Απόσταση Ψεκασμού</i>	150 – 300 mm
	<i>Ατμόσφαιρα</i>	Αέρας
	<i>Ταχύτητα</i>	750 – 1100 m/s
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ	<i>Πάχος</i>	100 – 300 μm

Μια παραλλαγή της παραπάνω μεθόδου είναι ο Ψεκασμός με χρήση Όπλου Εκτόνωσης (Detonation Gun Spray).

Σε αυτή την περίπτωση η θερμότητα παρέχεται μέσω ελεγχόμενων εκρήξεων, κατά την ανάφλεξη μίγματος οξυγόνου-ακετυλενίου με τη βοήθεια ηλεκτρικού σπινθήρα. Σκόνη του προς απόθεση υλικού εισάγεται παράλληλα του επιμήκους άξονα του κυλινδρικού δαυλού, επιταχύνεται από τα αέρια καύσης, εξέρχεται από το δαυλό με υπερηχητική ταχύτητα και προσπίπτοντας στην επιφάνεια του υποστρώματος σχηματίζει το υψηλής ποιότητας επίστρωμα. Τα χαρακτηριστικά της μεθόδου φαίνονται στον Πίνακα Θ-4.

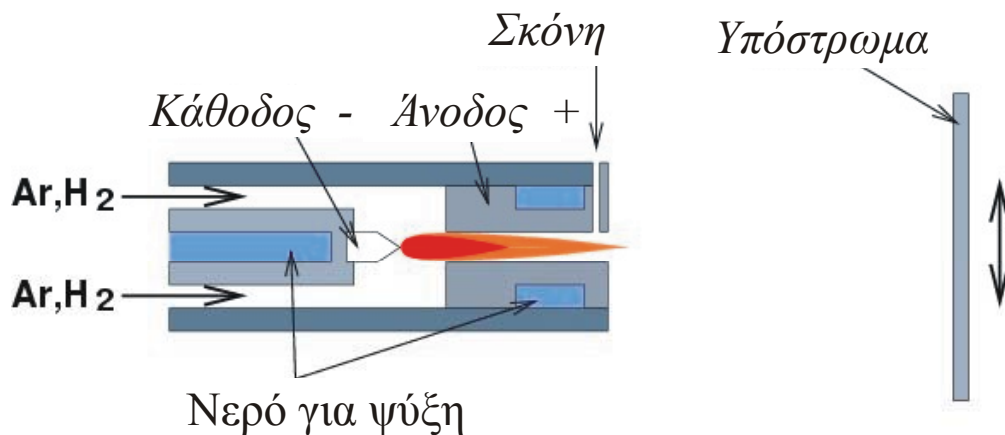
ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-4		
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΟΠΛΟΥ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ		
DETONATION WAVE	<i>Θερμοκρασία</i>	4500 °C (max)
ΑΝΑΛΩΣΙΜΟ ΥΛΙΚΟ (ΠΟΥΔΡΑ)	<i>Σχήμα</i>	Σφαιρικό
	<i>Μέγεθος</i>	5 – 60 μm
	<i>Ρυθμός Τροφοδοσίας</i>	50 – 100 g/min
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ	<i>Απόσταση Ψεκασμού</i>	100 mm
	<i>Ατμόσφαιρα</i>	Αέρας
	<i>Ταχύτητα</i>	~750 m/s
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ	<i>Πάχος</i>	~300 μm

A.2.1.4 Ψεκασμός με χρήση Πλάσματος (Plasma Spraying)

Ανάλογα με το περιβάλλον όπου λαμβάνει χώρα ο ψεκασμός, διακρίνουμε τρεις κύριες παραλλαγές της τεχνικής.

A.2.1.4.1 Ατμοσφαιρικός Ψεκασμός Πλάσματος [4,17,18,19] (APS: Air Plasma Spraying)

Είναι μια από τις σημαντικότερες μεθόδους επικάλυψης με ψεκασμό. Είναι μια μέθοδος σχετική απλή στην κατανόησή της αλλά σύνθετη στην εφαρμογή της. Το υλικό υπό μορφή σκόνης τήκεται λόγω της ενέργειας του πλάσματος (θερμό ιονισμένο αέριο) που δημιουργείται από κατάλληλο αέριο και από ηλεκτρικό τόξο το οποίο σχηματίζεται μεταξύ δύο μη αναλώσιμων ηλεκτροδίων (Σχήμα 3). Το ηλεκτρικό τόξο είναι αποτέλεσμα του συνεχούς ρεύματος που τροφοδοτεί το όπλο ψεκασμού (συνήθως έως 60kW και σε μερικές περιπτώσεις πάνω από 100kW). Για το σχηματισμό του πλάσματος συνήθως χρησιμοποιούνται αέρια όπως αργό, ήλιο, υδρογόνο, άζωτο και άλλα αδρανή αέρια.



Σχήμα 5
Σχηματική διάταξη του ηλεκτρικού τόξου



Σχήμα 6
Γενική διάταξη της μεθόδου APS

Η θερμοκρασία στο πλάσμα μπορεί να ξεπεράσει τους 10000°C , ενώ στην έξοδο του πλάσματος τους 5500°C , είναι δηλαδή πολύ υψηλότερη από την θερμοκρασία τήξης οποιουδήποτε δύστηκτου υλικού. Τα σωματίδια της πούδρας, επιταχύνονται και τήκονται μέσα στη φλόγα πλάσματος. Καθώς τα σωματίδια συγκρούονται με το υπόστρωμα, αρχίζουν να στερεοποιούνται. Δεδομένου ότι η ροή για το κάθε ένα από τα αέρια και το εφαρμοσμένο ρεύμα μπορούν να ρυθμιστεί ακριβώς, μπορούν να επιτευχθούν επαναλαμβανόμενα και προβλέψιμα αποτελέσματα επιστρώματος. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την δημιουργία επικαλύψεων σε μια μεγάλη γκάμα βιομηχανικών προϊόντων.

Τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της μεθόδου, σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους θερμικού ψεκασμού, είναι :

- η ποιότητα της επικάλυψης και η μεγάλη ποικιλία υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν
- η πλήρης αυτοματοποίηση της μεθόδου και η ελαστικότητά της ώστε να είναι προσαρμόσιμη στις εκάστοτε συνθήκες της κάθε εφαρμογής
- ο υψηλός ρυθμός ψεκασμού υλικού (πάχος επίστρωσης από μm έως μερικά mm)
- κανένας περιορισμός ως προς το μέγεθος και το σχήμα του υποστρώματος

ενώ τα μειονεκτήματά της είναι:

- το κόστος του απαραίτητου εξοπλισμού
- η αναγκαιότητα ύπαρξης εξειδικευμένων εγκαταστάσεων
- η ανομοιογένεια της επικάλυψης
- σε περίπτωση πολύπλοκης γεωμετρίας του προς επικάλυψη αντικειμένου είναι απαραίτητο να γίνει ειδική σχεδίαση της διαδικασίας ψεκασμού.

Τα χαρακτηριστικά της μεθόδου φαίνονται στον **Πίνακα Θ-5**.

ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-5		
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ		
ΤΟΞΟ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ	<i>Θερμοκρασία</i>	14000 °C (max)
ΑΝΑΛΩΣΙΜΟ ΥΛΙΚΟΥ (ΠΟΥΔΡΑ)	<i>Σχήμα</i>	Σφαιρικό
	<i>Μέγεθος</i>	5 – 100 μm
	<i>Ρυθμός Τροφοδοσίας</i>	50 – 100 g/min
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ	<i>Απόσταση Ψεκασμού</i>	60 – 130 mm
	<i>Ταχύτητα</i>	200 – 400 m/s
	<i>Ατμόσφαιρα</i>	Αέρας
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ	<i>Πάχος</i>	50 – 500 μm

**Α.2.1.4.2 Ψεκασμός Πλάσματος Υπό Κενό [4,16]
(VPS: Vacuum Plasma Spraying)**

Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνεται υψηλότερη ταχύτητα των σωματιδίων (400-600 m/s) και το λαμβανόμενο επίστρωμα έχει ελάχιστο πορώδες (έως 2%) και ελάχιστο ποσοστό οξειδίων (<0.5%). Τα χαρακτηριστικά της μεθόδου φαίνονται στον Πίνακα Θ-6.

ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΚΕΝΟ		
ΤΟΞΟ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ	<i>Θερμοκρασία</i>	15000 °C (max)
ΑΝΑΛΩΣΙΜΟ ΥΛΙΚΟΥ (ΠΟΥΔΡΑ)	<i>Σχήμα</i>	Σφαιρικό
	<i>Μέγεθος</i>	5 – 20 μm
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ	<i>Απόσταση Ψεκασμού</i>	300 – 400 mm
	<i>Ταχύτητα</i>	200 – 400 m/s
	<i>Ατμόσφαιρα</i>	Κενό
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ	<i>Πάχος</i>	50 – 500 μm

**Α.2.1.4.3 Ψεκασμός Πλάσματος Υπό Ελεγχόμενη Ατμόσφαιρα [4,16]
(CAPS: Controlled Atmosphere Plasma Spraying).**

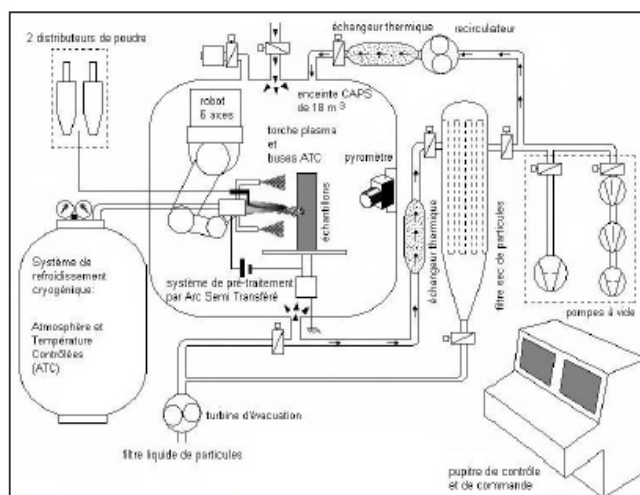
Αποτελεί την πλέον προηγμένη τεχνολογία ψεκασμού πλάσματος, ωστόσο οι δυνατότητές της δεν έχουν ακόμη διερευνηθεί πλήρως. Ο ψεκασμός γίνεται σε υψηλή πίεση (4 atm), που διευκολύνει τις θερμικές ανταλλαγές μέσα στη φλόγα του πλάσματος και επιτρέπει την ομοιογενή απόθεση και αδρομερέστερων σωματιδίων (>100 μm). Ταυτόχρονα, το αδρανές αέριο ανακυκλώνεται μέσω φίλτρων και εναλλακτών θερμότητας, υποβοηθώντας έτσι την ψύξη του υποστρώματος και την εξοικονόμηση του αερίου.

Τα χαρακτηριστικά της μεθόδου φαίνονται στον Πίνακα Θ-7.

ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-7 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ		
ΤΟΞΟ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ	<i>Θερμοκρασία</i>	14000 °C (max)
ΑΝΑΛΩΣΙΜΟ ΥΛΙΚΟΥ (ΠΟΥΔΡΑ)	<i>Σχήμα</i>	Σφαιρικό
	<i>Μέγεθος</i>	5 – 100 μm
	<i>Ρυθμός Τροφοδοσίας</i>	50 – 100 g/min
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ	<i>Απόσταση Ψεκασμού</i>	100 – 130 mm
	<i>Ταχύτητα</i>	200 – 400 m/s
	<i>Ατμόσφαιρα</i>	Αργό, Ήλιο, Άζωτο
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ	<i>Πάχος</i>	50 – 500 μm

Η τεχνική **CAPS** (Σχήμα 5) συνδυάζει τις μεθόδους του συνηθισμένου θερμικού ψεκασμού αλλά υπό ελεγχόμενες συνθήκες (πίεση, ατμόσφαιρα, θερμοκρασία). Με τη δημιουργία θερμοδυναμικού συστήματος, διευκολύνονται οι θερμικές ανταλλαγές μέσα στη φλόγα του πλάσματος και οδηγούμαστε στη δημιουργία επικαλύψεων βελτιωμένης ποιότητας και μηχανικών ιδιοτήτων. Πρόκειται για ένα σύστημα πολλαπλών δυνατοτήτων, το οποίο λειτουργεί σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα με αέρα, αργό ή άζωτο. Μπορεί να πραγματοποιήσει ψεκασμούς κάτω από συνθήκες πίεσης με εύρος από 2 KPa έως 350 KPa, παρέχοντας τη δυνατότητα εφαρμογής εναλλακτικών μεθόδων ψεκασμού όπως:

- Ατμοσφαιρικός ψεκασμός πλάσματος (**APS**): 100 Pa, αέρας
- Ψεκασμός πλάσματος σε αδρανή ατμόσφαιρα (**IPS**): 100 KPa, αργό
- Ψεκασμός πλάσματος υπό κενό (**VPS**): < 100 KPa, αργό
- Ψεκασμός πλάσματος υπό υψηλή πίεση (**HPPS**): 100 - 400 KPa, αργό
- Ψεκασμός πλάσματος σε δραστικό περιβάλλον (**RPS**): 0,5-400 KPa, άζωτο



Σχήμα 7
Φωτογραφία και Σχηματική διάταξη του CAPS

A.2.2 ΨΥΧΡΟΣ ΨΕΚΑΣΜΟΣ (COLD SPRAY) [20]

Η τεχνική του Cold Spray αποτελεί τη πλέον σύγχρονη τεχνική θερμικού ψεκασμού. Η τεχνική αυτή είναι μια διαδικασία παρασκευής επιστρωμάτων που πραγματοποιείται με την έκθεση ενός υποστρώματος σε υψηλής ταχύτητας δέσμη σωματιδίων και βασίζεται στην επιλογή του σωστού συνδυασμού θερμοκρασίας, ταχύτητας και μεγέθους σωματιδίων. Κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι τα σωματίδια της σκόνης επίστρωσης, επιταχύνονται σε θερμοκρασία που είναι πάντα χαμηλότερη του σημείου τήξης του υλικού της σκόνης, με άμεση συνέπεια τη δημιουργία επιστρωμάτων από σωματίδια που βρίσκονται συνεχώς σε στερεά φάση. Με τον τρόπο αυτό, εξαλείφονται τα προβλήματα της θερμοκρασιακής οξειδωσης, της ατμοποίησης, της τήξης, της ανακρυστάλλωσης, των παραμενουσών τάσεων, της κακής πρόσφυσης και της έκλυσης αερίων. Όλα τα συνήθη προβλήματα που συναντώνται στις διάφορες μεθόδους θερμικού ψεκασμού, με τη μέθοδο αυτή ελαχιστοποιούνται ή εξαφανίζονται.

Η βασική αρχή της μεθόδου είναι ότι πλέον το υλικό ψεκασμού δεν τήκεται μέσω της πρόσδοσης θερμικής ενέργειας. Τα ψεκαζόμενα σωματίδια, που βρίσκονται σε στερεά μορφή, πλαστικοποιούνται, δημιουργώντας ισχυρούς δεσμούς με το υπόστρωμα επειδή συγκρούονται μ' αυτό με μεγάλη ταχύτητα, σε θερμοκρασία χαμηλότερη του σημείου τήξης του υλικού της σκόνης.

Ουσιαστικά η μέθοδος επίστρωσης με Cold Spray είναι σχετικά απλή. Ένα συμπιεσμένο και θερμό, αδρανές αέριο (άζωτο, ήλιο ή μίγμα των δυο), επιταχύνεται μέσα σε ακροφύσιο τύπου de Laval. Οι συνήθεις συνθήκες στο εσωτερικό του ακροφυσίου για το αέριο είναι 3.5 MPa πίεση και θερμοκρασία μέχρι και 650 °C. Το υλικό επίστρωσης εισέρχεται σε μορφή σκόνης, στο εσωτερικό του ακροφυσίου και στη συνέχεια εκτοξεύεται στο υπόστρωμα. Πάνω από μια συγκεκριμένη κρίσιμη ταχύτητα σωματιδίων, η οποία είναι χαρακτηριστική για το εκάστοτε επίστρωμα και εξαρτάται από το υλικό, τη γεωμετρία του ακροφυσίου καθώς και άλλες παραμέτρους της διαδικασίας, τα σωματίδια δύνανται να σχηματίσουν ένα συμπαγές επίστρωμα μετά την πρόσκρουσή τους στο υπόστρωμα. Κατά την απόθεση, τα σωματίδια ψεκασμού εμφανίζουν μικρή αλλαγή στη μικροδομή τους και ελάχιστη οξειδωση ή αποσύνθεση. Γεγονός, λοιπόν, είναι ότι με τη μέθοδο αυτή μπορούν να επιστρωθούν τα περισσότερα μέταλλα, όπως Cu, Al, Ni, Ti, Ni-ούχα κράματα, καθώς επίσης και κεραμομεταλλικές ενώσεις και κεραμικά.

Συχνά κατά τη δημιουργία επιστρωμάτων με τεχνικές θερμικού ψεκασμού εμφανίζεται οξειδωση των σωματιδίων [21,22] που έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή επιστρωμάτων με υποβαθμισμένες ιδιότητες. Στην τεχνική, όμως, του Ψυχρού Ψεκασμού τα σωματίδια έχουν θερμοκρασία χαμηλότερη του σημείου τήξης του υποστρώματος και έτσι είναι δυσκολότερη η εμφάνιση οξειδωσης.

Πολύ σημαντικός παράγοντας για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου (η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυξάνει στο 50-70%) είναι η τιμή της ταχύτητας των σωματιδίων όταν αυτή πλησιάσει μια κρίσιμη τιμή, η οποία είναι χαρακτηριστική για κάθε υλικό (πχ για Al, Cu, Ni κυμαίνεται σε 500-700 m/s).

A.2.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ [4, 23]

Οι εφαρμογές επικαλύψεων με θερμικό ψεκασμό να συγκεντρώνονται γύρω από τους κάτωθι βασικούς άξονες:

α. Θερμικός ψεκασμός για προστασία από φθορά και διάβρωση

Τα θερμικά ψεκασμένα επιστρώματα βρίσκουν εκτενείς εφαρμογές στην προστασία μηχανημάτων από τη φθορά και τη διάβρωση. Η σχέση ανάμεσα στη συμπεριφορά σε τριβή των επικαλύψεων και στις ιδιότητες του υλικού είναι κρίσιμη στην αξιολόγηση της απόδοσής τους.

Η δημιουργία μιας επίστρωσης με ψεκασμό ενός μετάλλου επάνω σε μια επιφάνεια, χρησιμοποιείται για να αποτρέψει τη διάβρωση. Τα ενεργά μέταλλα όπως τα κράματα ψευδάργυρου, αργιλίου και ψευδαργύρου-αργιλίου επιλέγονται συνήθως για την προστασία του χάλυβα από διάβρωση. Αυτά τα μέταλλα και κράματα είναι διαθέσιμα, χαμηλού κόστους και έρχονται με μορφή καλωδίου ή πούδρας που τα καθιστούν κατάλληλα για τη χρήση σε ψεκασμό προηγμένων κατασκευών. Αυτά τα υλικά όταν ψεκάζονται σε πάχη από 0.13 έως 0.51 mm, παρέχουν καθοδική προστασία στον χάλυβα.

Ένας άλλος τύπος προστασίας από διάβρωση που μπορεί να επιτευχθεί μέσω του θερμικού ψεκασμού είναι η δημιουργία «εμποδίου». Σε αυτήν την περίπτωση η ψεκασμένη επίστρωση ενεργεί ως εμπόδιο μεταξύ του εξωτερικού περιβάλλοντος και του χάλυβα. Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου είναι ότι η επίστρωση δεν «θυσιάζεται» για την προστασία του μετάλλου έχει όμως το μειονέκτημα ότι δεν ενεργεί σε περιοχές που δεν έχουν ψεκαστεί. Παράδειγμα τέτοιας περίπτωσης αποτελεί ο ανοξειδωτος χάλυβας πάνω στον οποίο έχει ψεκαστεί επίστρωση οξειδίου του χρωμίου.

β. Θερμικά μονωτικά επιστρώματα (Thermal Barrier Coatings)

Τα θερμικά μονωτικά επιστρώματα εφαρμόζονται με τον ψεκασμό πλάσματος σε πάχη 0.005 ιντσών (125 μικρόμετρα) και επάνω, ανάλογα με την εφαρμογή. Κατηγορίες κεραμικών που έχουν πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα (YSZ: $ZrO_2 - 8\% Y_2O_3$, PSZ: $ZrO_2 - 6\% Y_2O_3$, LZ: $La_2 - ZrO_2$ κ.α) μονώνουν αποτελεσματικά το υπόστρωμα από το περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας. Για τις εφαρμογές στρόβιλων, το πάχος των TBC είναι 125 - 250 μm . Σε αυτό το πάχος, για τα πολύ θερμά τμήματα που λειτουργούν σε θερμοκρασίες γύρω από $1000^\circ C$, η θερμοκρασία στην επιφάνεια του μονωμένου τμήματος μπορεί να μειωθεί περίπου $100^\circ C$, επιτρέποντας την αύξηση της ζωής στη λειτουργούσα θερμοκρασία ή επιτρέποντας στο στρόβιλο να λειτουργήσει σε μια υψηλότερη, αποδοτικότερη θερμοκρασία. Το αξιοπρόσεκτο χαρακτηριστικό γνώρισμα των TBC είναι η αντοχή στο θερμικό σοκ και στις δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες μέσα σε ένα στρόβιλο.

Οι βιομηχανικοί τομείς στους οποίους βρίσκουν και μπορούν να βρουν ακόμη περισσότερες εφαρμογές οι θερμικές επικαλύψεις είναι :

- αεροναυπηγική και διαστημική τεχνολογία (π.χ κινητήρες αεροσκαφών, τμήματα συστήματος προσγείωσης)
- αυτοκινητοβιομηχανία (π.χ εναλλάκτες)
- στροβιλομηχανές, νηζελομηχανές
- ναυτικοί αεριοστρόβιλοι (marine gas turbine engines)
- χημική, πετροχημική βιομηχανία (π.χ μηχανές για την εξόρυξη πετρελαίου)
- παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος (gas turbines)
- αντλίες-υδραυλικά συστήματα
- γεωργικά μηχανήματα-εργαλεία
- εργαλεία μεταλλείων, ορυχείων
- μεταφορά και επεξεργασία βιομηχανικών ορυκτών και μεταλλευμάτων (σωλήνες, χοάνες, μύλοι λειοτρίβησης, κυκλώνες, μεταφορικές ταινίες)
- εξοπλισμός αμμοβολής
- κλωστοϋφαντουργία (οδηγοί νημάτων, καρούλια, βελόνες)
- χαρτοβιομηχανία (π.χ φτερωτές, ράουλα)
- μηχανές τυπογραφείων (π.χ corona rolls, anilox rolls)
- τσιμεντοβιομηχανία (αλεστικά συστήματα, φτερωτές αερισμού, συστήματα μεταφοράς υλικού)
- πλακίδια, είδη υγιεινής, είδη εστίασεως
- τούβλα, κεραμίδια (ανάμιξη, εξώθηση, κοπή πηλού)
- ιατρική (π.χ εμφυτεύματα)
- ηλεκτρονική (π.χ μικροκυκλώματα)

Τα σημαντικότερα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή θερμικών επικαλύψεων είναι:

- αύξηση χρόνου ζωής των μηχανικών εξαρτημάτων
- μείωση εξόδων για ανταλλακτικά
- μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα μεταξύ δύο διαδοχικών συντηρήσεων
- καλύτερη χρήση των μηχανών και υψηλότερη παραγωγικότητα
- υψηλότερη ποιότητα των παραγομένων προϊόντων

Η τεχνολογία θερμικού ψεκασμού αν και ενεργός για περίπου τριάντα έτη, κυρίως στη ζωτικής σημασίας επισκευή και τη συντήρηση για τη βαριά βιομηχανία και στη συντήρηση σε αεροδιαστημικές εφαρμογές με μια ποικιλομορφία των προστατευτικών επιστρωμάτων, έχει διαδραματίσει μέχρι τώρα έναν περιορισμένο ρόλο στην κατασκευή. Αυτό, εντούτοις, αλλάζει γρήγορα. Οι πολυάριθμες βιομηχανίες, αναγνωρίζοντας τα προτερήματα της ολοένα αναπτυσσόμενης μεθόδου, έχουν εισαγάγει την τεχνολογία στο περιβάλλον κατασκευής. Υπάρχουν εφαρμογές του θερμικού ψεκασμού που εξελίσσονται τώρα και που θα αποτελέσουν μια σημαντική αλλαγή για την τεχνολογία. Εντούτοις, ενώ η κατασκευαστική πλευρά εμφανίζεται έτοιμη για να δεχθεί τις διαδικασίες θερμικού ψεκασμού, ίσως η ίδια η μέθοδος δεν είναι ακόμα έτοιμη να εισαγάγει ένα υψηλό περιβάλλον παραγωγής, στο οποίο η απόδοση, η δυνατότητα αναπαραγωγής και οι δαπάνες είναι ελεγχόμενοι παράγοντες. Ο τομέας του θερμικού ψεκασμού μέχρι σήμερα έχει αναπτυχθεί κυρίως

από τη δοκιμή και το λάθος, που παράγουν, στην πράξη, καταπληκτικά αποτελέσματα. Αλλά είναι αυτή η μεταβλητότητα (εικονική ελευθερία στην επιλογή υλικών) και η έμφυτη πολυπλοκότητα της διαδικασίας (μεγάλοι αριθμοί αλληλεπιδρώντας παραμέτρων διαδικασίας) που θα απαιτήσει μια κοινή προσπάθεια για να τοποθετήσει την μέθοδο αυτή σε μια αποδεκτή και συμφέρουσα λύση.

A.3 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΟΣ [4]

Η επίστρωση είναι στην πραγματικότητα η σύνθεση των μεμονωμένων σωματιδίων, που προσκρούουν πάνω στο υπόστρωμα. Τα σωματίδια που επιταχύνονται μέσα στη φλόγα πλάσματος μπορεί να τηχθούν πλήρως ή μερικώς κατά τη χρονική στιγμή της σύγκρουσης. Τα ψεκαζόμενα σωματίδια θα αναπηδήσουν ή θα παραμείνουν, ασθενώς συνδεδεμένα με το υπόλοιπο υπόστρωμα μειώνοντας τη σκληρότητα της επίστρωσης. Αυτός είναι ο λόγος που είναι απαραίτητη η βελτιστοποίηση των παραμέτρων της διαδικασίας ψεκασμού, επειδή έτσι ελαχιστοποιείται ο αριθμός τέτοιων σωματιδίων.

Τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη σύγκρουση των σωματιδίων στο υπόστρωμα καθορίζουν την ποιότητα της πρόσφυσης επίστρωσης – υποστρώματος. Τα τηγμένα σωματίδια παραμορφώνονται και στερεοποιούνται δίνοντας επιμήκεις ή ισοαξονικούς κρυστάλλους. Ο δαυλός ψεκασμού κινείται πάνω από το υπόστρωμα και το πρώτο στρώμα της επίστρωσης που δημιουργείται είναι από στερεοποιημένα σωματίδια (splats). Τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα μέσα στην επίστρωση καθορίζουν την κρυσταλλική δομή και το μέγεθος των κρυστάλλων, το πορώδες και τις μικρορωγμές. Ο δαυλός ψεκασμού επιστρέφει μετά από κάποια χρονική περίοδο στο ίδιο σημείο από το οποίο πέρασε την πρώτη φορά. Εν τω μεταξύ η επιφάνεια του πρώτου στρώματος* της επίστρωσης είναι εκτεθειμένη στην επίδραση του περιβάλλοντος (π.χ οξείδωση και ψύξη). Η ψύξη οδηγεί στην δημιουργία παραμένουσων τάσεων και τελικά σε πιθανή ρωγμάτωση. Κατά τη διάρκεια του ψεκασμού ενός δεύτερου στρώματος της επίστρωσης, ο δαυλός θερμαίνει το προηγούμενο εναποθεθειθέν στρώμα και επιπλέον θερμότητα παρέχεται προερχόμενη από τη στερεοποίηση των σωματιδίων και από τη ψύξη τους. Το πάχος της τελικής επίστρωσης επιτυγχάνεται με 10 – 200 περάσματα του όπλου ψεκασμού πάνω από το υπόστρωμα. Η επίστρωση ψύχεται ώστε να φτάσει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, κάτι το οποίο μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία θερμικών τάσεων, πιθανή ρωγμάτωση και μερικές φορές ακόμη και αποκόλληση της επίστρωσης από το υπόστρωμα.

Η σύνθεση της επίστρωσης μπορεί να τροποποιηθεί με μια δεύτερη φάση επεξεργασίας με σκοπό την τροποποίηση των ιδιοτήτων της επίστρωσης.

- Στη συνέχεια το στρώμα ορίζεται ως το τμήμα της επίστρωσης που εναποτίθεται κατά την χρονική περίοδο ενός περάσματος του όπλου ψεκασμού πάνω από το υπόστρωμα.

A.3.1 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗ [4]

Ο μετασχηματισμός ενός τηγμένου σωματιδίου σε sflat, καθώς αυτό προσκρούει στο υπόστρωμα, σχετίζεται με τις διαδικασίες διαπλάτυνσης και στερεοποίησης. Οι διαδικασίες αυτές συμβαίνουν ταυτόχρονα. Ωστόσο υπάρχουν στοιχεία που δείχνουν πως η διαπλάτυνση ξεκινά πριν από τη στερεοποίηση. Για τον λόγο αυτό τα δυο φαινόμενα θα εξεταστούν ξεχωριστά.

Η κρυσταλλική δομή καθώς και το μέγεθος των κρυστάλλων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το ρυθμό μείωσης της θερμοκρασίας των σωματιδίων. Επίσης η πρόσφυση sflat – υποστρώματος εξαρτάται από τη θερμοκρασία στην διεπιφάνειά τους, η οποία προφανώς σχετίζεται άμεσα με την αρχική θερμοκρασία των τηγμένων σταγονιδίων.

A.3.1.1 Παραμόρφωση σωματιδίων [4]

Ξεκινώντας από τη χρονική στιγμή της πρώτης επαφής με το υπόστρωμα, το σωματίδιο αρχίζει να παραμορφώνεται. Αρχικά παίρνει τη μορφή ενός κυλίνδρου. Το χρονικό διάστημα στο οποίο το σωματίδιο από σφαίρα μεταπίπτει σε κύλινδρο εκτιμήθηκε από τον Kudinov (1977) και τον Houben (1988) σε $10^{-10} s$.

Στη συνέχεια η κυλινδρική αυτή μορφή επεκτείνεται σε ακτινική διεύθυνση και δημιουργείται μια νέα μορφή «κυκλικού sflat» ενώ ταυτόχρονα η στερεοποίηση συνεχίζεται. Οι διαδικασίες αυτές αναλύθηκαν από τους Jones [24] και Madejski (1976) [25] και πιο πρόσφατα από τους Trapaga και Szekely [26, 27] και Yoshida (1992). Το μοντέλο που ανέπτυξε ο Madejski είναι αυτό που έχει μελετηθεί περισσότερο και έχει αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη άλλων βελτιωμένων μοντέλων, όπως το μοντέλο Delplanque [3], Zhang [28], Wan [29].

Σύμφωνα με τον Madejski ο βαθμός διαπλάτυνσης, ξ , ορίζεται ως εξής:

$$\xi = \frac{2}{d_p} \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (1)$$

όπου d_p είναι η διάμετρος του σωματιδίου πριν τη σύγκρουση. Ο Madejski έλυσε τις εξισώσεις που περιγράφουν την ακτινική κίνηση του τηγμένου κυλίνδρου (εξίσωση διατήρησης ενέργειας) και της στερεοποίησής του (γνωστή ως πρόβλημα Stefan). Το αποτέλεσμα από την ανάλυση της παραμέτρου ξ εξαρτάται από τους αριθμούς Re και We , που ορίζονται ως εξής:

$$Re = \frac{\rho_\ell \cdot d_p \cdot v^2}{\eta_\ell} \quad (2)$$

$$We = \frac{\rho_\ell \cdot d_p \cdot v^2}{\sigma} \quad (3)$$

όπου v είναι η ταχύτητα του σωματιδίου πριν τη πρόσκρουση, η_ℓ και ρ_ℓ είναι το ιξώδες και πυκνότητα του τηγμένου υλικού και σ ο συντελεστής επιφανειακής τάσης.

Η παράμετρος, ξ , για μερικές περιπτώσεις που προέρχονται από τη μελέτη του Madejski και άλλων, φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-8

Βαθμός διαπλάτυνσης ξ : περιγράφει την εξάπλωση των splat που προσκρούουν στο υπόστρωμα.

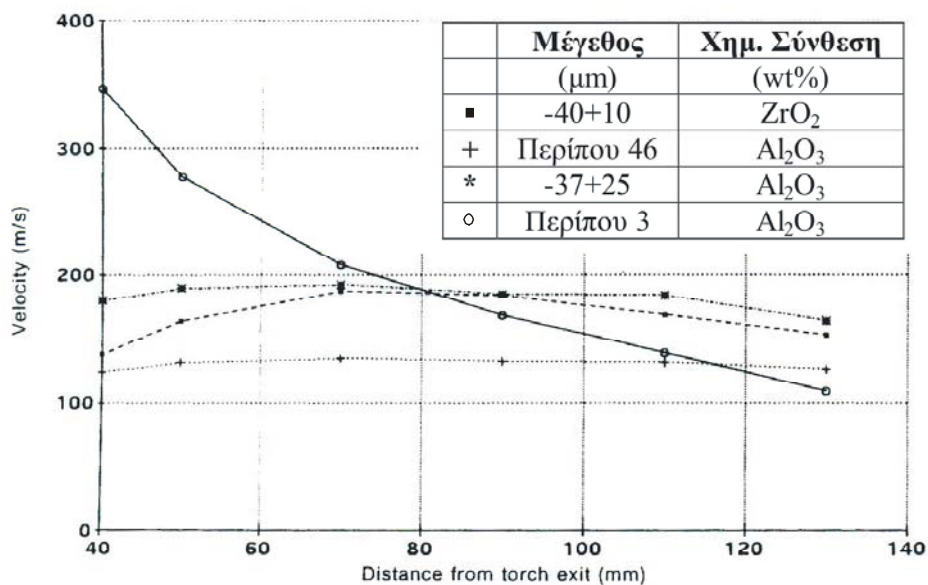
No	Re	We	Βαθμός διαπλάτυνσης (ξ)	Προσέγγιση	Αναφορά
1	Optional	∞	$1.2941 \cdot (\text{Re} + 0.9517)^{0.2}$	Αναλυτική	Madejski (1976)
2	>100	∞	$1.2941 \cdot \text{Re}^{0.2}$	Αναλυτική	Madejski (1976)
3	>100	>100	$\frac{3 \cdot \xi^2}{We} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left(\frac{\xi}{1.2941} \right)^5 = 1$	Αναλυτική	Madejski (1976)
4	∞	>100	$\left(\frac{We}{3} \right)^{0.5}$	Αναλυτική	Madejski (1976)
5			$\text{Re}^{0.2}$	Αριθμητική	Trapaga και Szekely (1991)
6			$0.83 \cdot \text{Re}^{0.21}$	Αριθμητική	Yoshida (1992)

Τα αποτελέσματα του πίνακα ισχύουν, αν θεωρηθεί ότι τα σωματίδια που προσκρούουν στο υπόστρωμα, πρώτα αρχίζουν να παραμορφώνονται και στη συνέχεια στερεοποιούνται. Ο Vardelle (1980) έκανε πειράματα ώστε να μελετήσει τα splat πάνω σε υπόστρωμα αλουμίνιας, μετρώντας τη θερμοκρασία του υποστρώματος πειραματικά. Τα αποτελέσματά του ταιριάζουν ικανοποιητικά με αυτά της θεωρίας του Madejski (Πίνακας Θ-8). Οι Ohmori και Li (1993) πρότειναν ότι τα πειραματικώς προσδιορισμένα μεγέθη των splat Al και Al₂O₃ είναι πιο κοντά με αυτά που δίνει το μοντέλο του Jones (1971). Η πλήρης πειραματική μελέτη του Fantassi (1992), για τηγμένα σωματίδια ζirkονίας, έδειξε καλύτερο συσχετισμό των αποτελεσμάτων με τις προβλέψεις του Yoshida (1992) παρά με αυτά της θεωρίας του Madejski. Ο Solonenko (1993) έκανε μια θεωρητική και πειραματική μελέτη παρόμοια με αυτή του Madejski. Το πειραματικό μέρος αφορούσε μετρήσεις της ταχύτητας των τηγμένων σωματιδίων, χαμηλού σημείου τήξης (Sn, Pb, Zn), πριν τη σύγκρουσή τους με το υπόστρωμα. Το πάχος του splat μετρήθηκε με τη βοήθεια SEM. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών ταιριάζουν με το θεωρητικό μοντέλο του Solonenko αλλά αυτό είναι κάτι που πρέπει να επιβεβαιωθεί και από μελλοντικές μελέτες.

Στην πράξη, η πιο σημαντική παράμετρος που προέρχεται από τη θεωρία είναι το πάχος του splat, h . Μπορεί να υπολογιστεί, με βάση την αρχή διατήρησης της μάζας του σταγονιδίου, δηλαδή ότι κατά τη διαπλάτυνση του σταγονιδίου σχηματίζεται ένα κυκλικό splat και δεν υπάρχει διασκορπισμός.

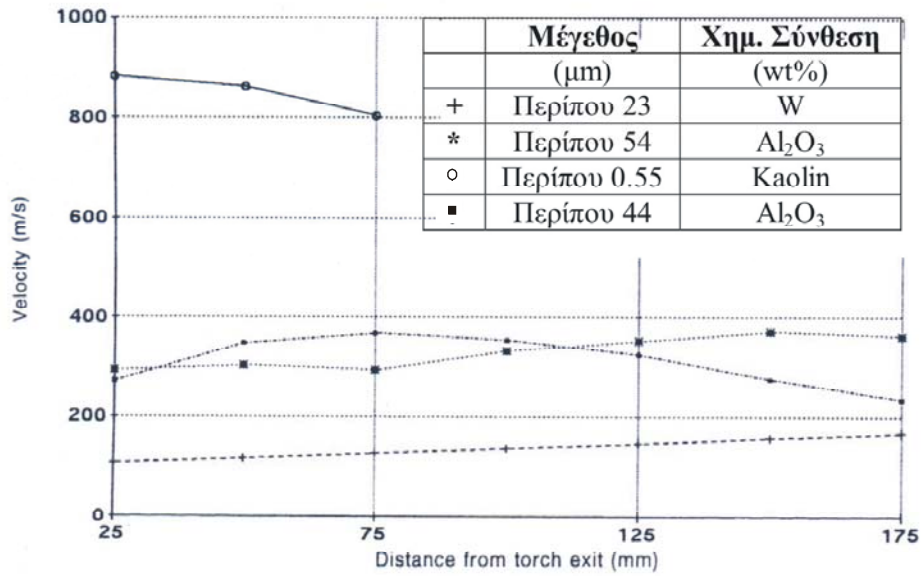
$$h = \frac{2 \cdot d_p}{3 \cdot \xi^2} \quad (4)$$

Το πάχος του splat Al_2O_3 που έχει ψεκαστεί με τις APS και VPS μεθόδους, μπορεί να εκτιμηθεί ξεκινώντας από τα αποτελέσματα της ταχύτητας των σωματιδίων που φαίνονται στα **Σχήματα 8 και 9**. Η πυκνότητα και το ιζώδες της τηγμένης αλουμίνας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία υλικού, που ξεκινά από 2300 K και φτάνει τους 2700 K, μετρήθηκαν από τον Balting (1990). Ο αριθμός Re υπολογίστηκε και βρέθηκε μεγαλύτερος από 250. Ο αριθμός We μπορεί να υπολογιστεί, αν ο συντελεστής επιφανειακής τάσης για την τηγμένη αλουμίνα θεωρηθεί: $\sigma = 0.68 \frac{N}{m}$ (McPherson 1980) και προκύπτει μεγαλύτερος από 4000. Η τιμή αυτή του αριθμού We είναι αρκετά μεγάλη, γι' αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί η προσέγγιση από τη σχέση No2 του **Πίνακα Θ-8** και έτσι να υπολογιστεί ο βαθμός διαπλάτυνσης ξ . Αντικαθιστώντας το αποτέλεσμα του ξ στην εξίσωση (4) υπολογίζεται το πάχος h τους splat. Το **Σχήμα 10** δείχνει τα αποτελέσματα αυτού του υπολογισμού στην συνάρτηση θερμοκρασίας του σωματιδίου κατά την σύγκρουση.



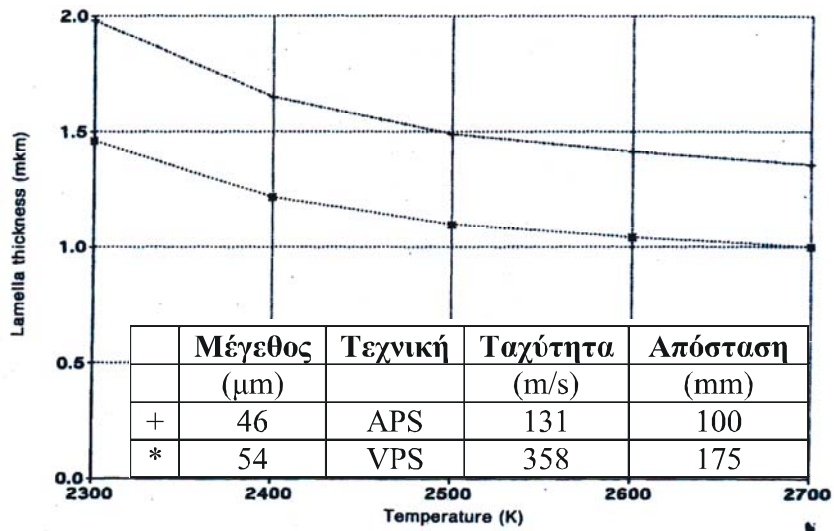
Σχήμα 8

Ταχύτητες σωματιδίων (APS) συναρτήσει απόστασης από έξοδο του δαυλού ψεκασμού



Σχήμα 9

Ταχύτητες σωματιδίων (VPS) σε συνάρτηση με την απόσταση από την έξοδο του δαυλού ψεκασμού



Σχήμα 10

Θεωρητικός υπολογισμός του πάχους *splat* Al₂O₃, με δυο διαφορετικές μεθόδους

Το πάχος του splat μετρήθηκε πειραματικά από τον Zoltowski (1968), για τον ατμοσφαιρικό ψεκασμό πλάσματος (APS) και για πούδρα αλουμίνας με διάμετρο $d_{50} = 50\mu m$, και βρέθηκε περίπου ίσο με $3\mu m$. Αυτό το αποτέλεσμα συγκλίνει καλώς με θεωρητικούς υπολογισμούς που έχουν γίνει χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4) και τη σχέση Νο2 του Πίνακα Θ-8. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.

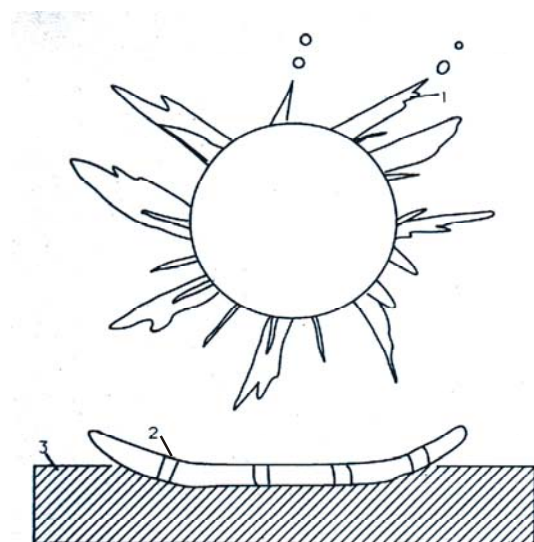
Ο χρόνος ψεκασμού ($t_{0,9}$ ορίζεται ο χρόνος στον οποίο το 90% του ψεκασμού έχει ολοκληρωθεί) υπολογίστηκε από τους Trapaga και Szekely (1991), σύμφωνα με τη σχέση:

$$t_{0,9} = \frac{2 \cdot d_p \cdot Re^{0.2}}{3 \cdot v} \quad (5)$$

όπου v η ταχύτητα του σωματιδίου πριν τη σύγκρουση.

Όμως κατά τη διαπλάτυνση των τηγμένων σωματιδίων μπορεί να εμφανιστεί έντονος διασκορπισμός εάν η κινητική ενέργεια που ελευθερώνεται κατά τη σύγκρουση είναι μεγαλύτερη από τις δυνάμεις επιφανειακής τάσης που συγκρατούν τα τηγμένα σωματίδια.

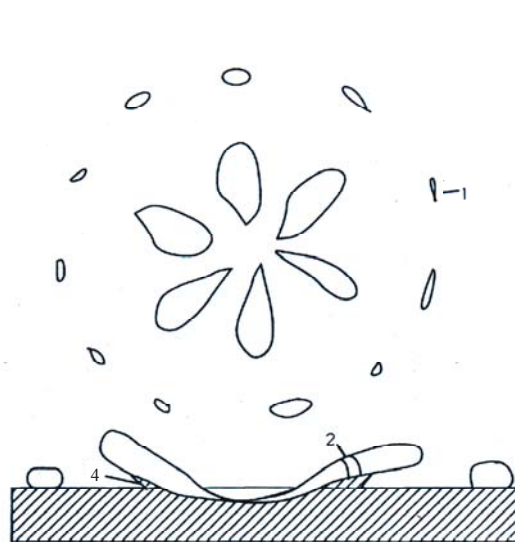
Μια προσεκτική μελέτη της μορφολογίας των splat έγινε από τον Houben (1988), που μελέτησε τη μορφή (APS) σωματιδίων Mo (μεγέθους $-63+53\mu m$), ανοξείδωτου χάλυβα AISI 316 (μεγέθους $-75+63\mu m$) και Al (μεγέθους $-75+53\mu m$). Παρόλο, που τα σωματίδια είναι μικρών διαστάσεων και μόνο μετάλλων, τα αποτελέσματα της μελέτης του Houben μπορούν να γενικευθούν για σωματίδια που μπορούν να ψεκαστούν με όλες τις μεθόδους ψεκασμού. Ο Houben διακρίνει δυο τυπικές μορφές splat: το «κυκλικό splat» με μικρές προεκτάσεις στην περιφέρεια και το «διασκορπισμένο splat» (Σχήμα 11α και Σχήμα 11β).



Σχήμα 11α

Σε κάθε εικόνα τα σχήματα αντιπροσωπεύουν δυο όψεις, μια κάτοψη (πάνω μέρος εικόνας) και μια τομή (κάτω μέρος εικόνας).

1: στεφάνη, 2: ρωγμή, 3: μη παραμορφωμένο υπόστρωμα, 4: παραμορφωμένο υπόστρωμα



Σχήμα 11β

Ο σχηματισμός ενός διασκορπισμένου splat είναι άμεσα συνδεδεμένος με μεγάλη ταχύτητα σωματιδίων και με υψηλή θερμική ενέργεια. Από την άλλη πλευρά ο σχηματισμός κυκλικής μορφής σχετίζεται με ταχύτητες και θερμικό περιεχόμενο μεσαίων τιμών. Μερικές άλλες τεχνικές απόθεσης splat δοκιμάστηκαν από τον Steffens (1993). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον **Πίνακα Θ-9** και επιβεβαιώνουν ότι σε ενεργειακά χαμηλές τεχνικές το splat είναι κυκλικής μορφής και σε ενεργειακά υψηλές τεχνικές (AS, APS) εμφανίζονται δυο τύποι splat ανάλογα με τις παραμέτρους ψεκασμού. Παραμένει, ωστόσο, αντικείμενο προς έρευνα το σχήμα του splat σε τεχνικές όπως η D – gun, η Super D – gun και η HVOF.

Ο Moreau [30] ήταν ο πρώτος που συνέδεσε τη διαπλάτυνση των τηγμένων σωματιδίων με την ικανότητα διαβροχής του υποστρώματος από τα τηγμένα σωματίδια. Πολύ πρόσφατα ο Fukumoto [10] απέδειξε ότι η διαπλάτυνση των σταγονιδίων συνδέεται άμεσα με τη διαβροχή του υποστρώματος. Στο πείραμα αυτό [10] έδειξε ότι η μικρή αύξηση (της τάξης των nm) της τραχύτητας του υποστρώματος, η οποία προκαλείται λόγω οξείδωσης του υποστρώματος, συμβάλει στην καλύτερη διαβροχή του υποστρώματος που έχει σαν αποτέλεσμα την καλύτερη διαπλάτυνση των σταγονιδίων.

Ο Fukumoto ερμήνευσε [11] το μηχανισμό διαπλάτυνσης των σταγονιδίων και πως αυτός συνδέεται με τη διαβροχή του υποστρώματος και τη χαρακτηριστική θερμοκρασία μετάβασης. Όταν η θερμοκρασία υποστρώματος T_S είναι υψηλότερη από τη χαρακτηριστική θερμοκρασία μετάβασης T_{tr} , η διαβροχή στη διεπιφάνεια splat-υποστρώματος είναι καλή και έτσι το σταγονίδιο διαπλατώνεται ομαλά και η πρόσφυση είναι αρκετή καλή χωρίς να εμφανίζονται πόροι στη διεπιφάνεια. Σε αυτήν την περίπτωση η ταχύτητα ροής είναι χαμηλή και επομένως δεν υπάρχει έντονος διασκορπισμός.

Στην περίπτωση που η θερμοκρασία υποστρώματος T_S είναι χαμηλότερη από τη χαρακτηριστική θερμοκρασία μετάβασης T_{tr} , αμέσως μετά την πρόσκρουση του σταγονιδίου στο υπόστρωμα εμφανίζεται ταχύτατη στερεοποίηση στο κάτω τμήμα του splat και σχηματίζεται ένα μικρό στερεό δισκίο το οποίο δεν έχει καλή επαφή με το υπόστρωμα, καθώς εμφανίζονται πόροι στη διεπιφάνεια. Σε αυτή, λοιπόν, την περίπτωση δεν υπάρχει ομαλή ροή του υγρού τμήματος του σταγονιδίου στο υπόστρωμα, αλλά υπάρχει εκτόξευση του υγρού από ένα κεντρικό στερεοποιημένο τμήμα προς την περιφέρεια, οπότε και σχηματίζονται splats με έντονο διασκορπισμό.

* T_{tr} (Transmission Temperature): καλείται θερμοκρασία μετάβασης και ορίζεται ως η θερμοκρασία του υποστρώματος, κατά τη διαπλάτυνση, στην οποία το splat έχει αποκτήσει κυκλική μορφή κατά 50%.

ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-9: Μορφολογία Mo splat ψεκασμένο με διάφορες τεχνικές

No	Μέθοδος	Αναλώσιμα		Μεταβλητές Μεθόδου Ψεκασμού	Μορφή Splat	Σημειώσεις
		Μέγεθος Πούδρας (μm)	Διάμετρος Ηλεκτροδίου (mm)			
1	Flame Spraying – Wire		3.18	Αέριο εργασίας, ρυθμός ροής, απόσταση ψεκασμού (40 – 200 mm)	Κυκλική με στεφάνι	Μεγαλύτερη διασπορά της στεφάνης με αύξηση της απόστασης ψεκασμού
2	Flame Spraying – powder	-45 + 22.5		απόσταση ψεκασμού (120 – 280 mm)	Κυκλική με στεφάνι	Η μορφή του splat δεν εξαρτάται από τις διάφορες παραμέτρους
3	APS	-45 + 22.5		απόσταση ψεκασμού (40 – 200 mm)	Κυκλική, διασκορπισμένη ή ενδιάμεση μορφή	Περισσότερα splat διασκορπισμένης μορφής με αύξηση της απόστασης ψεκασμού
4	Arc Spraying		1.6	Πίεση ατμοποίησης αερίου (0.2 – 0.7 Mpa), απόσταση ψεκασμού (40 – 200 mm)	Κυκλική ή διασκορπισμένη	Περισσότερα splat διασκορπισμένης μορφής με αύξηση της πίεσης ατμοποίησης αερίου

A.3.1.2 Θερμοκρασία των τηγμένων σωματιδίων κατά την πρόσκρουση [4]

Η θερμοκρασία ζώνη στα στερεοποιημένα σωματίδια και στη γειτονική περιοχή του υποστρώματος μπορεί να βρεθεί με τη λύση της εξίσωσης μετάδοσης θερμότητας που δίνεται από τη σχέση:

$$C_p(T) \cdot \rho(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda(T)\nabla T) + q \quad (6)$$

Η λύση της εξίσωσης αυτής, σε μονοδιάστατη κατάσταση, βρέθηκε από τους Carslaw και Jaeger (1959).

Η λύση που προτάθηκε από τον Kudinov (1977) βασίστηκε στις ακόλουθες παραδοχές:

- Το υπόστρωμα είναι ένα ημί – άπειρο σώμα, που έχει θερμοκρασία T_S πριν την πρόσκρουση
- Τα σωματίδια πριν την πρόσκρουση είναι τηγμένα και έχουν θερμοκρασία τήξης T_m
- Η επαφή ανάμεσα στα σωματίδια και το υπόστρωμα είναι τέλεια
- Η θερμότητα διαδίδεται σε μια διάσταση

Η θερμοκρασία επαφής ανάμεσα σε σωματίδια και υπόστρωμα κατά τη χρονική περίοδο της στερεοποίησης t_o των σωματιδίων, δίνεται από τη σχέση:

$$T_c = T_S + \frac{K_\epsilon \cdot (T_m - T_S)}{K_\epsilon + \Phi(x)} \quad (7)$$

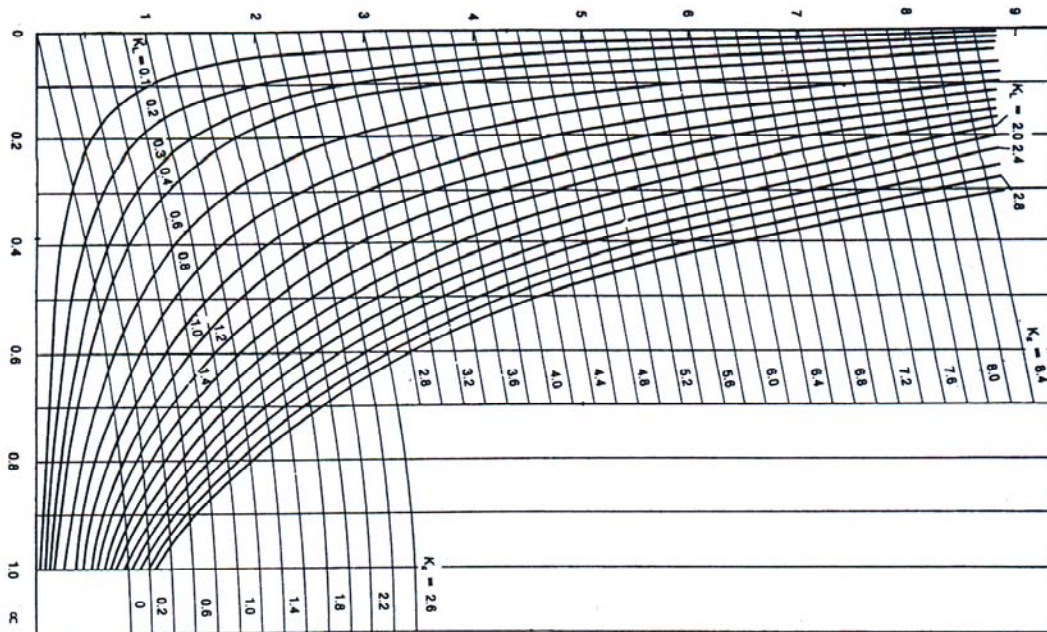
όπου $K_\epsilon = \frac{(\lambda_1 \cdot a_2^{0.5})}{(\lambda_2 \cdot a_1^{0.5})}$, λ είναι η θερμική αγωγιμότητα και a η θερμική διαχυτότητα, οι δείκτες 1 και 2 σχετίζονται με τα σωματίδια και το υπόστρωμα αντίστοιχα, $\Phi(x)$ είναι η πιθανότητα που ορίζεται ως:

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt \quad (8)$$

και x είναι η ρίζα της εξίσωσης:

$$K_\epsilon + \Phi(x) = \frac{K_L \cdot \exp(-x^2)}{x} \quad (9)$$

όπου $K_L = \frac{c_p(T_m - T_S)}{L \cdot \pi^{0.5}}$, c_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα και L είναι η λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Η εξίσωση (9) μπορεί να επιλυθεί με τη βοήθεια ενός νομογράμματος που παρουσιάζεται παρακάτω (Σχήμα 12).



Σχήμα 12

Νομογράφημα που δίνει τη λύση της εξίσωσης (9). Η τιμή της μεταβλητής α μπορεί να βρεθεί στην τομή των γραμμών που αντιστοιχούν στο K_α και το K_L . Γνωρίζοντας το α και το K_e μπορούμε να βρούμε, στον κατακόρυφο άξονα, την τιμή της πιθανότητας $\Phi(x)$.

Ο χρόνος στερεοποίησης t_o δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$t_o = \left(\frac{h}{2 \cdot a} \right)^2 \cdot \frac{1}{a} \quad (10)$$

όπου h είναι το πάχος της splat.

Οι υπολογισμοί σχετικά με τη θερμοκρασία διεπιφάνειας splat - υποστρώματος και το χρόνο στερεοποίησης (ο τελευταίος βασίζεται σε πειραματική εκτίμηση του h) παρουσιάζονται στον **Πίνακα Θ-10**.

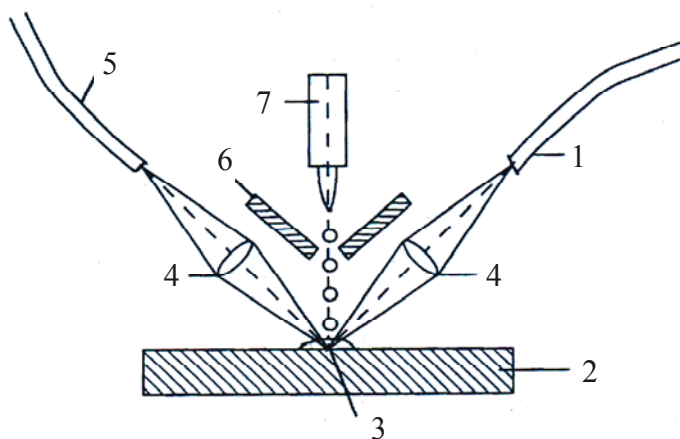
ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-10

Υπολογισμοί σχετικά με τη θερμοκρασία διεπιφάνειας και το χρόνο στερεοποίησης (ο τελευταίος βασίζεται σε πειραματική εκτίμηση του h)

No	Μέθοδος Ψεκασμού	Παράμετροι	Υλικό		Πειραματικοί υπολογισμοί					Αναφορά
			Σωματίδια	Υπόστρωμα	T_m [K]	T_o [K]	h [μm]	T_c [K]	t_o [μs]	
1	APS		Ni	Fe	1728	373	18	1273	23	Kudinov (1977)
2	Arc Spraying	Πίεση ατμοποίησης αερίου 0.7 Mpa	Ni	Fe	1728	300 (πιθανώς)	5	1230	1	Steffens (1991)
3	Ard Spraying	Πίεση ατμοποίησης αερίου 0.25 Mpa	Ni	Fe	1728	300 (πιθανώς)	40	1230	100	Steffens (1991)

Επίσης πολύ σημαντικό ρόλο έχει ο χρόνος στερεοποίησης, ο οποίος εξαρτάται από τη μέθοδο ψεκασμού, και μέσω του πάχους h του splat, εξαρτάται και από τις μεταβλητές της διαδικασίας του ψεκασμού (λεπτότερο πάχος σημαίνει ταχύτερη στερεοποίηση).

Σε πραγματικές συνθήκες τα σωματίδια που προσκρούουν στην επιφάνεια του υποστρώματος μπορεί να έχουν θερμοκρασία διαφορετική από την T_m πράγμα που κάνει αρκετά χρήσιμους τους παρόντες υπολογισμούς αλλά και ταυτόχρονα αρκετά απλοποιημένους. Σε αυτόν τον τομέα έγινε πρόοδος με τη χρήση πυρομέτρων. Στην πραγματικότητα έχουν αναπτυχθεί πολύπλοκες οπτικές συσκευές που κάνουν δυνατή τη συνεχή παρακολούθηση της θερμοκρασίας του διαπλαντούμενου σωματιδίου στην επιφάνεια του υποστρώματος, αμέσως μετά την πρόσκρουση (**Σχήμα 13**).



Σχήμα 13

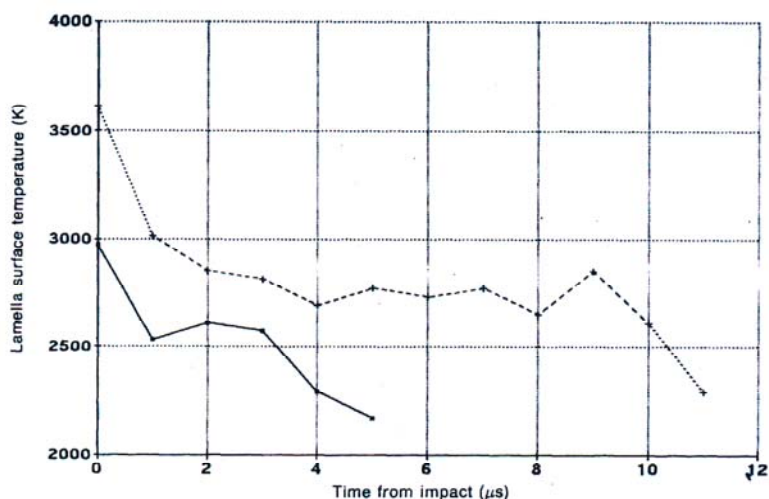
Πειραματική διάταξη που επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση της θερμοκρασίας των σωματιδίων αμέσως μετά την πρόσκρουση. 1: οπτική ίνα που οδηγεί στον δέκτη, 2: υπόστρωμα, 3: εξαπλωμένα σωματίδια, 4: φακοί εστίασης, 5: οπτική ίνα που οδηγεί στο γρήγορο πυρόμετρο, 6: ψυχόμενη με νερό ασπίδα, 7: όπλο ψεκασμού. Η πειραματική διάταξη του Fantassi (1992) έχει ένα επιπλέον πυρόμετρο επικεντρωμένο σε μια απόσταση 2 mm από το πρώτο πυρόμετρο.

Τα σωματίδια, προσκρούουν στην επιφάνεια του υποστρώματος και οι θερμοκρασίες ξεκινούν να καταγράφονται από το πυρόμετρο (5), με την προϋπόθεση ότι ο δέκτης (1) είναι επίσης ενεργοποιημένος. Η συσκευή του Fantassi [31] είναι επιπρόσθετα εφοδιασμένη με ένα πυρόμετρο επικεντρωμένο στην περιοχή σε απόσταση 2 mm από το υπόστρωμα. Συνεπώς, οι θερμοκρασίες των σωματιδίων που πλησιάζουν το υπόστρωμα αρχικά καταγράφονται από το πρώτο πυρόμετρο και στη συνέχεια από το δεύτερο. Το πρώτο πυρόμετρο επιτρέπει την μέτρηση της θερμοκρασίας των σωματιδίων πριν από τη σύγκρουση και ο χρόνος ανάμεσα στα σήματα που έρχονται από τα δυο πυρόμετρα επιτρέπει τον υπολογισμό της ταχύτητας των σωματιδίων.

Ο Moreau [30] παρατήρησε τη συμπεριφορά σωματιδίων νιοβίου που ψεκάστηκαν σε υπόστρωμα χάλυβα και γυαλιού (**Σχήμα 14**)

Το τηγμένο σωματίδιο που προσέκρουσε στο υπόστρωμα από χάλυβα έχει κυκλική μορφή και μετά την πρόσκρουση ψύχεται και συνεχίζει να διαπλαντώνεται για τα επόμενα 2 μ s (η μέγιστη θερμοκρασία που είχε φτάσει είναι 2500 K). Το φαινόμενο αποδόθηκε από τους ειδικούς στην απελευθέρωση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης. Είναι επίσης σημαντικό να σημειώσουμε ότι η θερμοκρασία πυρηνοποίησης της στερεάς φάσης είναι καθαρά χαμηλότερη από το σημείο τήξης ($T_m = 2741K$ για Nb). Τα σωματίδια που προσέκρουσαν στο γυαλί είχαν μεγαλύτερο χρόνο στερεοποίησης και ψύξης. Αυτό προφανώς σχετίζεται με τη χαμηλή θερμική

αγωγιμότητα του γυαλιού σε σύγκριση με το χάλυβα. Επιπλέον, η μορφολογία του splat είναι διασκορπισμένης μορφής (εξαιτίας της μικρής ικανότητας διαβροχής του γυαλιού από τηγμένο Nb), το οποίο συνεπάγεται ότι το θερμογράφημα θα έχει πολλές μεταβολές. Πρέπει ωστόσο, να τονιστεί ότι ο ψεκασμός έγινε σε συνθήκες αέρα και είναι γνωστό ότι το Nb οξειδώνεται εύκολα, με αποτέλεσμα η οξείδωση να επηρεάσει το θερμογράφημα. Τέλος εκτιμήθηκαν οι ρυθμούς απόψυξης των σωματιδίων Nb που ψεκάστηκαν στο χάλυβα και βρέθηκε ότι είναι της τάξης του $2 \cdot 10^8 \text{ K/s}$ και αυτών που ψεκάστηκαν στο γυαλί, της τάξης $6 \cdot 10^7 \text{ K/s}$.

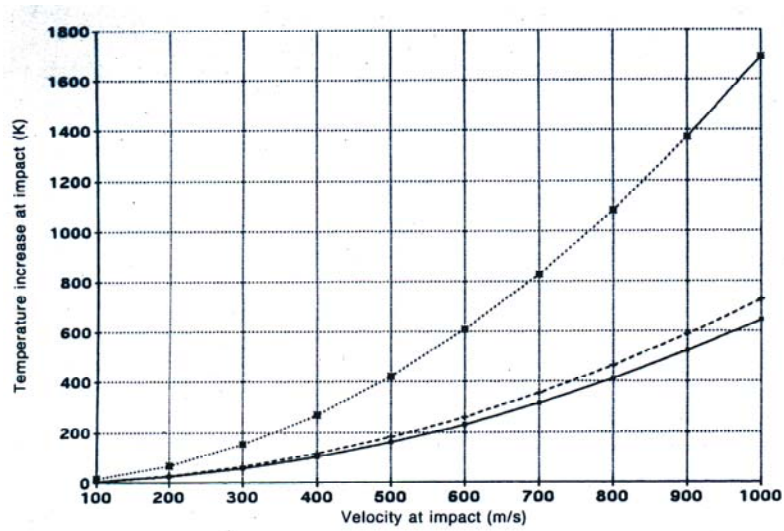


Σχήμα 14

Η μεταβολή με τον χρόνο της θερμοκρασίας του splat Nb κατά την διαπλάτυνσή του σε υπόστρωμα από γυαλί (+) και χάλυβα (■).

Η θερμοκρασία του τηγμένου σωματιδίου κατά την πρόσκρουση εξαρτάται από την ταχύτητα των σωματιδίων που έχουν πριν την πρόσκρουση (**Σχήμα 15**). Η επίδραση αυτή γίνεται σημαντική για ταχύτητες μεγαλύτερες από 400 m/s .

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η θερμική αντίσταση επαφής ανάμεσα στο κάτω μέρος της splat και στην επιφάνεια επαφής. Μια μελέτη που έγινε από τον Moreau (1992) για σωματίδια Mo που ψεκάστηκαν σε χάλυβα, έδειξε ότι ο χρόνος ψύξης του splat μειώνεται με το πάχος της επίστρωσης. Μια εξήγηση αυτού του γεγονότος είναι ότι η θερμική αντίσταση επαφής στο επίπεδο σύνδεσης Mo – Mo είναι μικρότερη από αυτήν στο επίπεδο σύνδεσης Mo – χάλυβα. Με όμοιο τρόπο, όπως αναφέρεται από τους Ivanov και Kudinov (1983), η αύξηση της τραχύτητας και η χρήση ενός συνδετικού επιστρώματος (το συνδετικό επίστρωμα οδηγεί σε αύξηση της πρόσφυσης μεταξύ splat – υποστρώματος) μπορούν να οδηγήσουν σε αύξηση της θερμικής αντίστασης επαφής, πράγμα το οποίο συνεπάγεται αύξηση της θερμοκρασίας του splat και του χρόνου απόψυξης.



Σχήμα 15

Μεταβολή της θερμοκρασίας των σωματιδίων σε συνάρτηση με την ταχύτητα πρόσκρουσης για Al₂O₃ (επάνω καμπύλη), TiO₂ (μεσαία καμπύλη) και WC – Co (κάτω καμπύλη)

A.3.1.3 Πυρηνοποίηση, Στερεοποίηση και Ανάπτυξη των Κρυστάλλων [4]

Κατά την παραμόρφωση των τηγμένων σωματιδίων ξεκινά η διαδικασία στερεοποίησης. Σε τυπικές συνθήκες, η διαδικασία στερεοποίησης ξεκινά στο επίπεδο μεταξύ του σωματιδίου και του υποστρώματος (ή προηγούμενων εναποθετειμένων στρωμάτων). Η πυρηνοποίηση είναι ετερογενής και το μέτωπο της στερεοποίησης κινείται με ταχύτητα προς την κορυφή του τηγμένου σωματιδίου. Η ταχύτητα βρίσκεται σε ένα εύρος, από 10 cm/s που αναφέρθηκε από τον McPherson (1981), έως και 50 m/s από τους Sampath και Herman (1989). Η θερμοκρασία του υπολειμματικού τηγμένου υλικού αυξάνει εξαιτίας της απελευθέρωσης της λανθάνουσας θερμότητας τήξης. Σε τέτοιες συνθήκες, η στερεοποίηση έχει ως αποτέλεσμα μια επιμήκη μορφή (Σχήμα 16).



Σχήμα 16

Επιμήκης μορφή, αποτέλεσμα της στερεοποίησης

Η επιμήκης μορφή παρατηρήθηκε με τη χρήση TEM (Transmission Electron Microscope) από τους Sampath και Herman (1989) σε επιστρώματα από Ni και NiCr πάνω σε υπόστρωμα Cu που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο APS. Η ίδια παρατήρηση εσωτερικά της επίστρωσης έγινε από τους Wilms και Herman (1976) σε επιστρώματα από αλουμίνα που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο APS.

Ωστόσο, πολλές παρατηρήσεις έδειξαν μια ισοαξονική μικροδομή (Σχήμα 17), που αναφέρεται από τους Sampath και Herman (1989) ως «τουβλοδομή» (brick wall). Η κατασκευή μιας τέτοιας μικροδομής εσωτερικά του splat ευνοείται από το χαμηλό ρυθμό απομάκρυνσης της θερμότητας στο επίπεδο επαφής υποστρώματος – επίστρωσης και επιπλέον από την αύξηση της θερμικής αντίστασης επαφής. Επίσης, ίσως σχετίζεται και με την οξείδωση και/ή την τραχύτητα του υποστρώματος.



Σχήμα 17

Μικροδομή τύπου «τουβλοδομή»

Σε μια τέτοια περίπτωση, η πυρηνοποίηση είναι ομογενής όταν η διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας τήξης και θερμοκρασίας στερεοποίησης είναι μεγάλη, ενώ στην αντίθετη περίπτωση είναι ετερογενής. Οι ισοαξονικοί κόκκοι παρατηρήθηκαν σε ατμοσφαιρικό ψεκασμό πλάσματος, σε υποστρώματα από μόλυβδο (Moreau 1992). Ο Moreau διατύπωσε την άποψη ότι ο παγιδευμένος αέρας εμποδίζει την απομάκρυνση της θερμότητας και κάνει το σχηματισμό της ισοαξονικής μικροδομής πιο πιθανό από

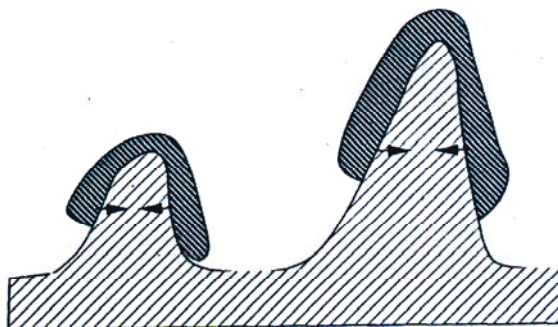
ότι το σχηματισμό της επιμήκους. Η «τουβλοδομή» μπορεί επίσης να σχηματιστεί σαν αποτέλεσμα της ανακρυστάλλωσης της επίστρωσης (παρατηρήθηκε από τους Sampath και Herman (1989) για επιστρώματα νικελίου ψεκασμένα με τη μέθοδο VPS).

Αν δεν σχηματιστούν πυρήνες στερεοποίησης, καθώς το τηγμένο υλικό στερεοποιείται, είναι πιθανό ότι μια υαλώδης ή άμορφη μικροδομή μπορεί να σχηματιστεί. Μια τέτοια περίπτωση αναφέρθηκε από τους Wilms και Herman (1976).

Καθώς η στερεοποίηση του τηγμένου υλικού είναι μια ταχεία διαδικασία, οι κρύσταλλοι, σε κάποια υλικά, μεγαλώνουν προς μια προνομιακή κατεύθυνση. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη το σχηματισμό επιμήκων κόκκων όπου οι άξονές τους είναι κάθετοι στο υπόστρωμα, ένας συγκεκριμένος κρυσταλλογραφικός προσανατολισμός είναι αναμενόμενος. Τελικά η μορφή των στερεοποιημένων κόκκων εξαρτάται από τους συντελεστές που καθορίζουν την παραμόρφωση των σωματιδίων (όπως η τεχνική του ψεκασμού, η κατεύθυνση του ψεκασμού, το μέγεθος των κόκκων της πούδρας, οι ιδιότητες του ψεκαζόμενου υλικού) και από το υπόστρωμα (τραχύτητα, θερμοκρασία και υλικό). Οι διαστάσεις των κρυστάλλων στα επιστρώματα θερμικού ψεκασμού ποικίλουν ανάμεσα σε μερικά nm έως μερικές εκατοντάδες nm.

A.3.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΡΟΣΦΥΣΗΣ [4]

Η πρόσφυση των splats εξαρτάται από τις δυνάμεις που προκύπτουν από τη συστολή του τηγμένου υλικού, που «τυλίγεται» γύρω από τις ανωμαλίες (τραχύτητα) της επιφάνειας. (Σχήμα 18)



Σχήμα 18

Σκίτσο της μηχανικής “στερέωσης” των στερεοποιημένων σωματιδίων πάνω στις ανωμαλίες της επιφάνειας του υποστρώματος

Το splat δε βρίσκεται σε πλήρη επαφή με το υπόστρωμα σε όλη του την επιφάνεια. Αυτό είναι προφανές για στερεοποιημένα σωματίδια διασκορπισμένης μορφής και υπάρχουν πολλές πειραματικές αποδείξεις από τους Kudinov (1977) και Houben (1988), ότι το ίδιο συμβαίνει και για splat κυκλικής μορφής. Η πρόσφυση του επιστρώματος αυξάνεται όσο η επιφάνεια επαφής μεγαλώνει. Αυτές οι περιοχές είναι γειτονικές σε οξείδια και πόρους.

Η αύξηση της επιφάνειας επαφής, με μια μείωση του περιεχόμενου οξειδίου, μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση κατάλληλων στοιχείων στην πούδρα ψεκάσμου. Ο ρόλος του αλουμινίου μελετήθηκε από τους McPherson και Cheang (1989). Μελέτες έδειξαν ότι η προκραματωμένη πούδρα Ni + 5 wt% Al, που ψεκάζεται με τεχνική APS, έχει ως αποτέλεσμα splat κυκλικής μορφής που περιέχει μόνο 10^{-3} wt% οξυγόνο. Αντίθετα, η πούδρα από καθαρό Ni, που έχει ψεκαστεί με ίδια διαδικασία, δίνει splat διασκορπισμένης μορφής που περιέχει 2 wt% οξυγόνο (με τη μορφή οξειδίου NiO).

Ένας άλλος τρόπος για να αυξηθεί η επιφάνεια επαφής είναι να γίνει η απόθεση σε ατμόσφαιρα χαμηλής πίεσης (VPS) ή σε αδρανή ατμόσφαιρα (IPS, SPS: Shrouded Plasma Spray μέθοδοι). Μεταλλικές επιστρώσεις που έχουν επιτευχθεί με την τεχνική SPS περιέχουν πολύ λιγότερο οξυγόνο από τις ίδιες επιστρώσεις που έχουν επιτευχθεί με την τεχνική APS (Πίνακας Θ-11).

Πλεονέκτημα της μεθόδου VPS είναι η μείωση της περιεκτικότητας αερίου που απορροφάται από τα τηγμένα σωματίδια που αιωρούνται κατά τον ψεκάσμο. Στην πραγματικότητα το επίπεδο της επιφάνειας που βρίσκεται ανάμεσα στο υπόστρωμα και την επίστρωση, όταν αυτή έχει ψεκαστεί με τις κατάλληλες παραμέτρους της μεθόδου VPS, δεν εμφανίζει καθόλου πόρους.

Οξείδια μπορούν επίσης να σχηματιστούν στην επιφάνεια του υποστρώματος. Εκτός από τη μέθοδο VPS, σε όλες τις άλλες μεθόδους το ψεκαζόμενο υπόστρωμα οξειδώνεται, ελαφρά, κατά το χρονικό διάστημα ανάμεσα στην εκτράχυνση της επιφάνειας και στην αρχή της διαδικασίας ψεκάσμου.

ΠΙΝΑΚΑΣ Θ-11

Η περιεκτικότητα σε οξυγόνο σε επιστρώσεις, με τις μεθόδους APS και SPS.

No	Υλικό	Περιεκτικότητα σε οξυγόνο (κ.β%)		
		Πούδρα	APS επίστρωμα	SPS επίστρωμα
1	Cu	0.126x	0.302	0.092
2	Ni	0.172	0.456	0.151
3	W	0.027	0.274	0.030
4	Ti	0.655	>2.0	0.730
5	Mo	0.419	0.710	0.160

Στις περιοχές της επιφάνειας που βρίσκονται ανάμεσα στο splat και στο υπόστρωμα, η πρόσφυση μπορεί να είναι αποτέλεσμα των παρακάτω μηχανισμών:

- Φυσική αλληλεπίδραση
- Μεταλλουργική αλληλεπίδραση
- Άλλου τύπου αλληλεπίδραση

A.4 ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΜΕ «IMAGE ANALYSIS» [32]

Από την αναζήτηση άρθρων στη διεθνή βιβλιογραφία δεν κατέσται εφικτό να βρεθούν αναφορές που να εξετάζουν την εφαρμογή της Ανάλυσης Εικόνας (Image Analysis) στη μελέτη των splats θερμικού ψεκασμού. Όμως γενικότερα, έχει μελετηθεί το Image Analysis και μπορεί να βρει εφαρμογή στη μελέτη επιστρωμάτων θερμικού ψεκασμού. Στη συνέχεια λοιπόν αναφέρονται οι κυριότερες εφαρμογές του Image Analysis στη μελέτη και την ανάλυση των επιστρωμάτων θερμικού ψεκασμού

Στην περίπτωση των επιστρωμάτων, η μεταλλογραφική ανάλυση συνήθως γίνεται πάνω σε τομές (cross – sections), εξαιτίας της αδιαφάνειας των υλικών. Μια τέτοια μελέτη χρησιμοποιείται ευρέως σαν ένα αναλυτικό εργαλείο για τον χαρακτηρισμό μικροδομών και οδηγεί σε ποιοτικά και, μερικές φορές, ποσοτικά αποτελέσματα φυσικών και δομικών χαρακτηριστικών, όπως η παρουσία κάποιας φάσης, η παρουσία ρωγμών και το ποσοστό των μη τηγμένων σωματιδίων (όσον αφορά τον θερμικό ψεκασμό). Οι παραπάνω πληροφορίες περιγράφουν πλήρως την μικροδομή των θερμικά ψεκασμένων υποστρωμάτων. Συνήθως η ποιότητα και η αποδοχή μιας δεδομένης εφαρμογής θερμικού ψεκασμού εκτιμούνται με τη χρήση ενός κριτηρίου, το οποίο βασίζεται σε μερικά συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της μικροδομής, όπως το επίπεδο πορώδους και η περιεκτικότητα σε οξείδια, που παρατηρούνται μέσω ενός μικροσκοπίου.

Η επεξεργασία και ανάλυση εικόνας μικροδομών με τη χρήση βιντεοκάμερας μπορεί να προσφέρει σημαντική βοήθεια στην παροχή ποσοτικών δεδομένων, όπως για παράδειγμα μετρήσεις χαρακτηριστικών. Αυτά τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καλύτερο ποιοτικό έλεγχο της διαδικασίας και των εφαρμογών του θερμικού ψεκασμού.

Η παρατήρηση της μεταλλογραφικής μικροδομής μπορεί να γίνει πάνω σε τομές με τη χρήση ενός οπτικού μικροσκοπίου, μιας CCD (Charge Coupled Device) βιντεοκάμερας και ενός συστήματος ανάλυσης εικόνας. Η διαδικασία ανάλυσης εικόνας αποτελείται από:

- A. Καθαρισμό της εικόνας από οποιεσδήποτε οπτικές παρεμβολές και
- B. Εντοπισμό των προς παρατήρηση χαρακτηριστικών (πχ πόροι)

και μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα βήματα:

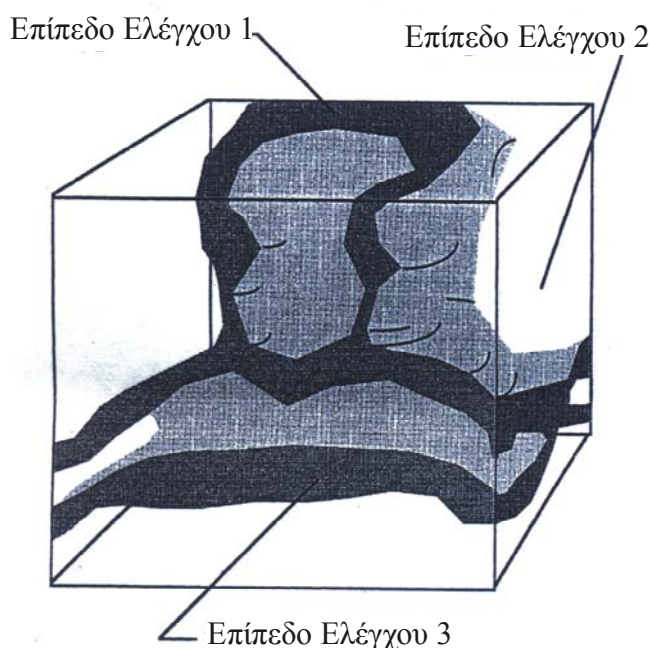
1. Λήψη εικόνας ασπρόμαυρης (grey level) εικόνας
2. Επεξεργασία της παραπάνω εικόνας για τον καθαρισμό της από παρεμβολές και τον καθορισμό των προς παρατήρηση τμημάτων
3. Ανάλυση της εικόνας (αριθμητικά δεδομένα των παρατηρούμενων μεγεθών όπως, μέγεθος, σχήμα κλπ)
4. Στατιστική επεξεργασία των αριθμητικών δεδομένων με βάση στερεολογικά πρωτόκολλα.

Επειδή η μεταλλογραφική ανάλυση γίνεται συνήθως πάνω σε τομές, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι η παρατήρηση μιας τομής δεν εκπροσωπεί τη συνολική τρισδιάστατη μικροδομή παρά μόνο την τομή της κατασκευής με ένα επίπεδο. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 19 (α, β) ένα σώμα με τη μια διάστασή του κατά πολύ μεγαλύτερη από τις άλλες, χωρισμένο σε τρία επίπεδα ελέγχου μπορεί να παρουσιάσει τρεις διαφορετικές μορφολογίες, καθώς επίσης και δυο διαφορετικά

σώματα, για το ίδιο επίπεδο ελέγχου, μπορεί να παρουσιάσουν παρόμοια μορφολογία. Σε τέτοιες συνθήκες τα αποτελέσματα των παρατηρήσεις πρέπει να αναλύονται με ιδιαίτερη προσοχή.

Αποκλίσεις ή λάθη, μπορούν να εισαχθούν στα αποτελέσματα από την ανάλυση εικόνας. Υπάρχουν και τυποποιημένες λίστες με τέτοια λάθη ή αποκλίσεις, ανάλογα με την εκάστοτε διαδικασία (για παράδειγμα το πρότυπο ASTM E 1382-91 έγγραφο αναφέρει μια λίστα με τα κυριότερα λάθη και αποκλίσεις που μπορεί να συμβούν σε μια τέτοια διαδικασία). Σχετίζονται με την προετοιμασία της επιφάνειας πριν από την ανάλυση και με την διαδικασία επεξεργασίας εικόνας. Τα κυριότερα από αυτά είναι:

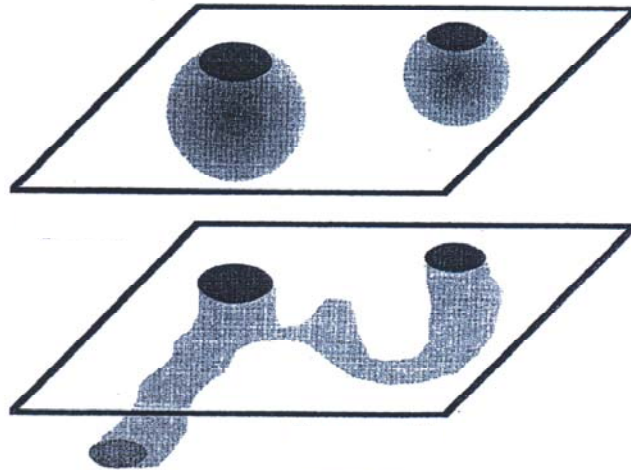
- Μια ακατάλληλη τεχνική προετοιμασίας της επιφάνειας μπορεί να δημιουργήσει χαραγές ή άλλες ατέλειες (π.χ επιφανειακούς πόρους)
- Οι περιοχές να μην είναι αντιπροσωπευτικές ολόκληρης της μικροδομής, ειδικά για προσανατολισμένες μικροδομές
- Ο ελλειπής εντοπισμός τεχνητών χαρακτηριστικών που οφείλονται στο σύστημα ανάλυσης εικόνας (κυρίως εξαιτίας της υψηλής αντίθεσης ή των διαφόρων επιπέδων του γκρι στο ίδιο σώμα) ή ο ελλειπής εντοπισμός των πραγματικών συνόρων (κυρίως εξαιτίας φτωχής αντίθεσης ή της χρήσης ακατάλληλης τεχνικής χάραξης)
- Η παρουσία σκόνης στο μικροσκόπιο, στο σύστημα της βιντεοκάμερας και στην προς εξέταση περιοχή
- Ο μη ομοιόμορφος φωτισμός του προς εξέταση δείγματος, ο οποίος επηρεάζει τον εντοπισμό ατελειών



Σχήμα 19α

Τρία διαφορετικά επίπεδα τομής του ίδιου σώματος που οδηγούν σε τρεις διαφορετικές μορφολογίες

Η βαθμονόμηση του συστήματος ανάλυσης εικόνας είναι το πρώτο βήμα για την ποσοτική ανάλυση και οδηγεί στη συσχέτιση της περιοχής των pixel με τις φυσικές διαστάσεις. Πρακτικά, η βαθμονόμηση επιτυγχάνεται καθορίζοντας την απόσταση ανάμεσα σε δυο μη συνεχή pixel. Αυτή η διαδικασία γίνεται μέσω μιας ψηφιακής εικόνας μιας βαθμονομημένης κλίμακας, ψηφιοποιημένη με τις ίδιες ρυθμίσεις με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη ψηφιακών εικόνων της προς ανάλυση μικροδομής.



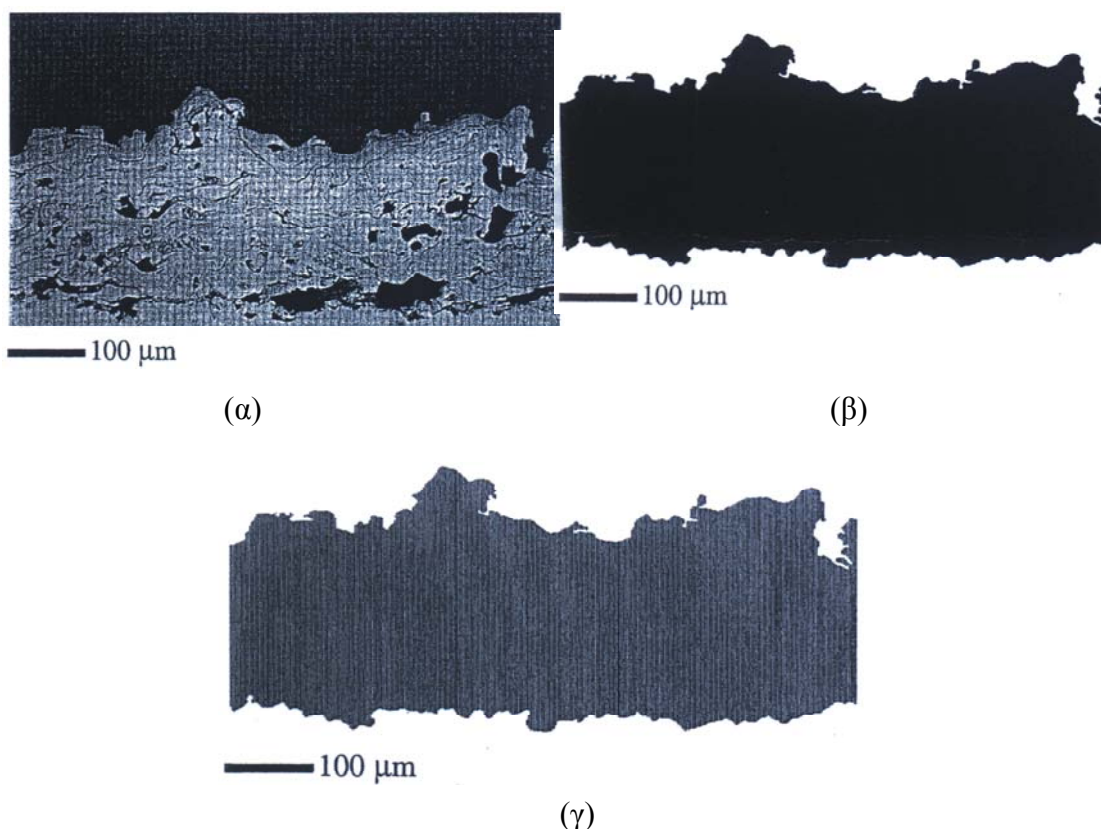
Σχήμα 19β

Δυο διαφορετικά σώματα, για το ίδιο επίπεδο τομής, παρουσιάζουν την ίδια μορφολογία

A.4.1 ΜΕΣΟ ΠΑΧΟΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ

Το πάχος είναι, ανάμεσα στα διάφορα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά μιας απόθεσης θερμικού ψεκασμού, ένας σημαντικός συντελεστής στον καθορισμό της συμπεριφοράς της απόθεσης και μετράται πάντοτε. Επιπλέον, το πάχος της απόθεσης προκύπτει άμεσα από την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας απόθεσης. Διάφορα πρότυπα, καταστρεπτικά και μη, έχουν αναπτυχθεί για τη δημιουργία μεθόδων μέτρησης του πάχους της απόθεσης. Το μέσο πάχος της απόθεσης, που καθορίζεται μέσω «image analysis», επιτρέπει έναν πιο ακριβή υπολογισμό του πάχους αυτού.

Το πρώτο βήμα στην επεξεργασία είναι η εξαγωγή των περιγραμμάτων της απόθεσης από τα αρχικά επίπεδα του γκρι χρώματος της εικόνας της τομής της απόθεσης (πχ. το περίγραμμα της κατώτερης και ανώτερης επιφάνειας). Η μεγέθυνση του μικροσκοπίου πρέπει να προσαρμοστεί στο πάχος του προς ανάλυση δείγματος. Το δεύτερο βήμα είναι η εφαρμογή μιας «μάσκας» στο προφίλ της τομής, που αποτελείται από παράλληλες και ισαπέχουσες γραμμές, με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι κάθετες στην επιφάνεια που βρίσκεται ανάμεσα στην επίστρωση και το υπόστρωμα. Τέλος η εικόνα της μάσκας «προστίθεται» στην αρχική εικόνα του προφίλ. Η παραπάνω διαδικασία φαίνεται στο **Σχήμα 20**.



Σχήμα 20

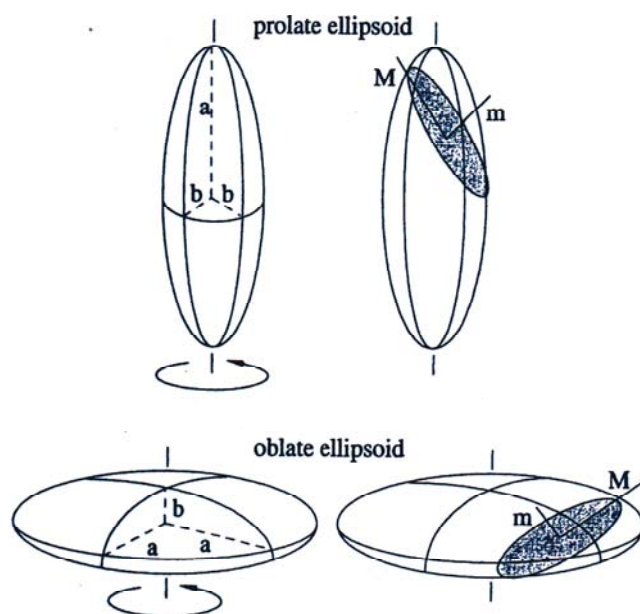
- Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας για τον καθορισμό του μέσου πάχους.
(α) Εικόνα (grey level) μιας τομής κάθετα στην επιφάνεια μιας απόθεσης τιτανίου
(β) Εικόνα (binary) του προφίλ της απόθεσης
(γ) Επεξεργασμένη εικόνα, αποτέλεσμα της «πρόσθεσης» του (α) και (β)

Η ανάλυση της εικόνας, μετά από αυτά, γίνεται μετρώντας το ολικό μήκος και τον αριθμό των κάθετων γραμμών (από το **Σχήμα 20γ**).

Διάφορες τομές της ίδιας όψης της ίδιας απόθεσης είναι απαραίτητο να αναλυθούν, με την παραπάνω διαδικασία, για τον καθορισμό μιας αντιπροσωπευτικής τιμής του μέσου πάχους (ένας αριθμός πέντε τομών θεωρείται ικανοποιητικός).

A.4.2 ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

Οι κατανομές μεγέθους και σχήματος των μικροδομικών χαρακτηριστικών είναι μεγάλης σημασίας στην ποσοτική περιγραφή των μικροδομών, οι οποίες με τη σειρά τους ίσως εξηγούν την σχέση ανάμεσα στη μέθοδο θερμικού ψεκασμού και στις μηχανικές ή άλλες ιδιότητες της απόθεσης. Αυτές οι κατανομές μπορούν να καθοριστούν με στερεολογική ανάλυση. Η στερεολογία έχει ως αντικείμενο την εκτίμηση τρισδιάστατων χώρων, όταν είναι διαθέσιμες μόνο δισδιάστατες εικόνες αυτού του χώρου. Προσπαθεί να απεικονίσει, αριθμητικά, τα χαρακτηριστικά των δισδιάστατων εικόνων και να δημιουργήσει σχέσεις με αυτά τα χαρακτηριστικά, στον τρισδιάστατο χώρο. Οι κανόνες αυτών των εκτιμήσεων που κάνει η στερεολογία βασίζονται σε γεωμετρικές πιθανότητες. Πολλά από τα σχήματα που συναντώνται στις αποθέσεις του θερμικού ψεκασμού, όπως οι πόροι και τα στερεοποιημένα σωματίδια, μπορούν να προσεγγιστούν με σφαιροειδή σχήματα, τα οποία προκύπτουν από πλήρη περιστροφή ελλειψοειδών γύρω από έναν άξονα. Ξεχωρίζουν δυο βασικές μορφολογίες τέτοιων ελλειψοειδών: τα επιμήκη και τα πεπλατυσμένα, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 21**.



Σχήμα 21

Σχηματική απεικόνιση των επιμήκων και πεπλατυσμένων ελλειψοειδών

Η τομή τέτοιων σχημάτων με ένα επίπεδο ελέγχου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ελλείψεων που χαρακτηρίζονται από τον κύριο άξονά τους, M , και τον δευτερεύοντα άξονα, m . Υπάρχουν δυο πρωτόκολλα, ανάμεσα στα υπόλοιπα, των De-Hoff και των Cruz-Orive, που επιτρέπουν μια ικανοποιητική περιγραφή των κατανομών σχήματος και μεγέθους των σφαιροειδών σωμάτων.

Τα δυο πρωτόκολλα δεν θα περιγραφούν αναλυτικά. Απλά αναφέρεται ότι το πρωτόκολλο των De-Hoff προκύπτει από την ανάλυση των Schwartz-Saltykov για σφαιρικά σωματίδια και περιγράφει σύνολα σωματιδίων που περιέχουν επιμήκη ή πεπλατυσμένα ελλειψοειδή από περιστροφή, με ίδιο αξονικό λόγο q (αυτό σημαίνει ότι το σχήμα των σωματιδίων παραμένει σταθερό για την κάθε κλάση μεγέθους). Για τα επιμήκη ελλειψοειδή, η προς μελέτη διάσταση είναι αυτή του κυρίως άξονα, M , ενώ για τα πεπλατυσμένα ελλειψοειδή είναι η δευτερεύουσα διάσταση, m . Από την

άλλη πλευρά το πρωτόκολλο των Cruz-Orive θεωρεί ελλειψοειδή σωματίδια, επιμήκη ή πεπλατυσμένα, όχι σταθερού μεγέθους.

Συμπερασματικά το «Image Analysis» επιτρέπει μια ποσοτική περιγραφή των πληροφοριών μιας μικροδομής, που περιέχονται σε μια εικόνα. Στην περίπτωση του θερμικού ψεκασμού μια τέτοια ποσοτική περιγραφή μπορεί να εφαρμοστεί στα κύρια χαρακτηριστικά μιας απόθεσης, όπως στο βαθμό διαπλάτυνσης, στο ποσοστό μη τηγμένων σωματιδίων, στο πορώδες και στο ποσοστό περιεχόμενων οξειδίων.

B.0 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ «IMAGE PRO PLUS» ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ SPLATS ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

Όπως ήδη αναφέρθηκε, στη διεθνή βιβλιογραφία δεν κατέσται δυνατό να βρεθούν προηγούμενα άρθρα που να εφαρμόζουν λογισμικά Ανάλυσης Εικόνας στη μελέτη των στερεοποιημένων σωματιδίων θερμικού ψεκασμού. Στη συνέχεια λοιπόν γίνεται ένα πρώτο βήμα για να εξεταστεί η συνθετότητα εφαρμογής του λογισμικού ανάλυσης εικόνας «Image Pro Plus» στη μελέτη των splats Cu που έχουν σχηματιστεί με τεχνικές ψεκασμού πλάσματος σε υποστρώματα ντουραλουμινίου. Αρχικά λοιπόν γίνεται μια γενικότερη περιγραφή του προγράμματος «Image Pro Plus» και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικότερες εντολές που χρησιμοποιήθηκαν.

Οι πολλαπλές δυνατότητες του «Image Pro Plus» χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη των splat από χαλκό (Cu) που έχουν ψεκαστεί πάνω σε υπόστρωμα αλουμινίου της σειράς 2000.

Η εισαγωγή της προς επεξεργασία εικόνας μπορεί να γίνει σε πραγματικό χρόνο, αν υπάρχει σύστημα που διαθέτει κάμερα συνδεδεμένο με τον υπολογιστή ή με τη διαδικασία ανοίγματος αρχείου, αν η εικόνα είναι διαθέσιμη σε τέτοια μορφή. Στην πρώτη περίπτωση υπάρχει η επιλογή *Video/Digital Capture Command Button* με την οποία ενεργοποιείται η διαδικασία εισαγωγής εικόνας σε πραγματικό χρόνο. Γενικά η γραμμή εργαλείων περιέχει όλα τα εργαλεία που χρειάζεται κάποιος για να συλλέξει διαφόρων ειδών πληροφορίες και μετρήσεις από μια εικόνα.

Στη συνέχεια αναλύονται αρχικά οι διευρυμένες δυνατότητες του «Image Pro Plus», οι οποίες και χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε.

B.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ «IMAGE PRO PLUS» [33]

Το λογισμικό «Image Pro Plus» δίνει τη δυνατότητα επεξεργασίας μιας εικόνας για την οπτική βελτίωσή της, εξαγωγής δεδομένων από αυτήν (με διάφορες εντολές) και αποθήκευση των δεδομένων αυτών. Όπως γίνεται φανερό πρόκειται για ένα ισχυρό λογισμικό που μεταξύ των άλλων περιλαμβάνει:

- Λήψη εικόνας από κάμερα, μικροσκόπιο, VCR ή σκάνερ.
- Δυνατότητα ΑΝΑΓΝΩΣΗΣ και ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ δεδομένων σε πολλούς τύπους αρχείων όπως TIFF, JPEG, BMP, TGA και άλλους.
- Δυνατότητα εργασίας με εικόνες σε 1, 8, 12, 16 ή 32-bit βάθος χρώματος καθώς και με έγχρωμες εικόνες σε 24, 36 ή 48-bit βάθος χρώματος. Δυνατότητα ρύθμισης των χρωμάτων με μοντέλα RGB, HIS HSV ή YIQ.
- Δυνατότητα επεξεργασίας μιας εικόνας για την οπτική βελτίωσή της μέσω εφαρμογής εντολών, φίλτρων και άλλων διαδικασιών.
- Δυνατότητα εντοπισμού και καταμέτρησης συγκεκριμένων και επαναλαμβανόμενων σχημάτων, σε μια εικόνα, με αυτόματη διαδικασία.
- Δυνατότητα κατανομής των αποτελεσμάτων ανάλογα με κριτήρια του χρήστη ή/και σε μορφή διαγραμμάτων και αποθήκευσή τους.
- Μέτρηση του Επιπέδου Έντασης (Intensity Level) μιας εικόνας, απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε μορφή γραφήματος ή πίνακα και αποθήκευσή τους.
- Εξαγωγή δεδομένων από συγκεκριμένη περιοχή μιας εικόνας που ορίζεται ως Περιοχή Ενδιαφέροντος (AOI: Area of Interest).
- Δημιουργία αρχείων που μπορούν να περιέχουν εικόνες, αριθμητικά δεδομένα και κείμενο.
- Λειτουργική οργάνωση εικόνων μέσω της Λειτουργίας Βάσης Δεδομένων (Database Utility) που επιτρέπει την εύκολη πρόσβαση, φόρτωση και απεικόνισή τους.
- Δυνατότητα αυτοματοποιημένων διαδικασιών καθώς και δυνατότητα του χρήστη να δημιουργήσει τις δικές του αυτοματοποιημένες διαδικασίες.

Μια εικόνα στην πραγματικότητα είναι η αναπαράσταση ενός αντικειμένου ή ενός συνόλου αντικειμένων. Με τη ψηφιακή επεξεργασία εικόνας (Digitization Process), μια εικόνα διασπάται σε περιοχή πολύ μικρών τμημάτων που καλούνται στοιχεία εικόνας (picture elements ή pixels). Στον υπολογιστή η εικόνα αναπαριστάται από αυτήν την περιοχή των pixels.

Τις περισσότερες φορές μια εικόνα στον υπολογιστή χρειάζεται βελτίωση των χαρακτηριστικών της ώστε να έχει καλύτερη οπτική ποιότητα ή να είναι πιο εύκολη η

εξαγωγή δεδομένων από αυτήν. Τέτοιες τεχνικές επεξεργασίας μιας εικόνας στον υπολογιστή ποικίλουν από απλές διαδικασίες, όπως η ρύθμιση της φωτεινότητας, ή/και της αντίθεσης, έως πιο πολύπλοκες οι οποίες εφαρμόζουν φίλτρα πάνω στην αρχική εικόνα.

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι για την ποιοτική αναβάθμιση μιας εικόνας μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή:

1. Ρύθμιση του επιπέδου έντασης (intensity level)
2. Εφαρμογή ενός φίλτρου
3. Ρύθμιση των συχνοτήτων της εικόνας

Το λογισμικό «Image Pro Plus» παρέχει μια πληθώρα εργαλείων που επιτρέπουν την επεξεργασία μιας εικόνας με ποικίλους τρόπους. Ανάλογα με τις απαιτήσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν μια ή περισσότερες ή συνδυασμός κάποιων από τις τεχνικές που προσφέρει το λογισμικό για το επιθυμητό αποτέλεσμα.

B.1.1 ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΕΝΤΑΣΗΣ

Για τη ρύθμιση του επιπέδου έντασης το «Image Pro Plus» διαθέτει τα παρακάτω εργαλεία.



Φωτεινότητα (Brightness)

Ο όρος «Φωτεινότητα» χρησιμοποιείται για να δείξει πόσο φωτεινή είναι μια εικόνα. Στο λογισμικό «Image Pro Plus» η ρύθμιση του συγκεκριμένου χαρακτηριστικού γίνεται μέσω μιας μπάρας (Σχήματα 22, 23) που εμφανίζεται πατώντας το αντίστοιχο εικονίδιο. Σε μια έγχρωμη εικόνα υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης της φωτεινότητας μέσω ενός μόνο χρώματος από την εντολή με τίτλο «Contrast Enhancement». Στην περίπτωση των splats η ρύθμιση της φωτεινότητας πραγματοποιήθηκε με βάση μόνο το άσπρο χρώμα.



Αντίθεση (Contrast)

Ο όρος «Αντίθεση» χρησιμοποιείται για να δείχνει τη διαφορά ανάμεσα στο πιο φωτεινό και το πιο σκοτεινό σημείο (ή περιοχή) μιας εικόνας. Το Contrast μιας εικόνας θεωρείται καλό όταν οι τιμές του Brightness εκτείνονται, μεταξύ της περιοχής του μαύρου και του άσπρου, όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα. Η ρύθμιση του συγκεκριμένου χαρακτηριστικού γίνεται μέσω μιας μπάρας (Σχήματα 22, 23) που εμφανίζεται πατώντας το αντίστοιχο εικονίδιο. Σε μια έγχρωμη εικόνα υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης της αντίθεσης μέσω ενός μόνο χρώματος από την εντολή με τίτλο «Contrast Enhancement». Στην περίπτωση των splats η ρύθμιση της φωτεινότητας πραγματοποιήθηκε με βάση μόνο το άσπρο χρώμα.



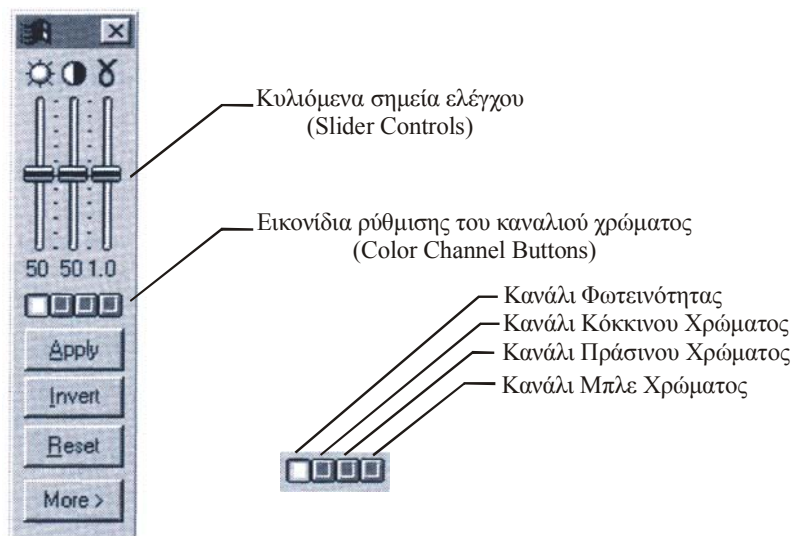
Διόρθωση Γάμμα (Gamma Correction)

Η «Διόρθωση Γάμμα» είναι ένας συγκεκριμένος τύπος ρύθμισης της αντίθεσης στις πιο σκοτεινές και στις πιο φωτεινές περιοχές μιας εικόνας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση των μεσαίων τόνων (midtone values) μιας εικόνας χωρίς να επηρεάζονται τα σημεία υψηλής και χαμηλής φωτεινότητας (highlight and shadow points). Η «Διόρθωση Γάμμα» χρησιμοποιείται για την οπτική βελτίωση ή για την αντιστάθμιση των διαφορών που υπάρχουν στην απεικόνιση μιας εικόνας, οι οποίες οφείλονται σε διαφορετικές συσκευές εισαγωγής και εξαγωγής της εικόνας. Η ρύθμιση του συγκεκριμένου χαρακτηριστικού γίνεται μέσω μιας μπάρας (Σχήματα 22, 23) που εμφανίζεται πατώντας το αντίστοιχο εικονίδιο. Σε μια έγχρωμη εικόνα υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης της «Διόρθωσης Γάμμα» μέσω ενός μόνο χρώματος από την εντολή με τίτλο «Contrast Enhancement».



Σχήμα 22

Εικονίδιο «Contrast Enhancement» το οποίο, όταν ενεργοποιηθεί, ανοίγει τη μπάρα ρύθμισης Φωτεινότητας, Αντίθεσης και «Διόρθωσης Γάμμα»



Σχήμα 23

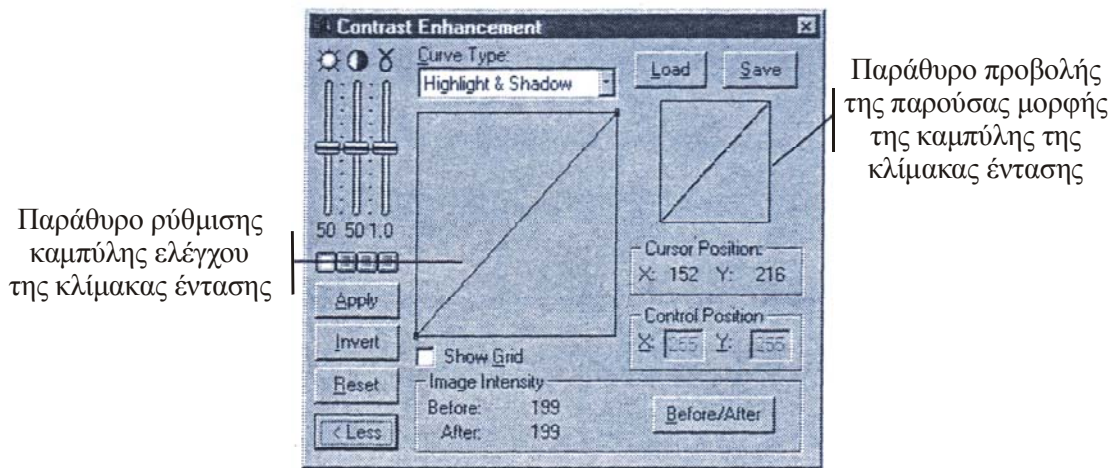
Μπάρα ρύθμισης Φωτεινότητας, Αντίθεσης και «Διόρθωσης Γάμμα» μέσω των κυλιόμενων σημείων ελέγχου

Τα τρία κυλιόμενα σημεία ελέγχου (**Σχήμα 23**) ρυθμίζουν τη φωτεινότητα, την αντίθεση και τη «Διόρθωση Γάμμα». Κάθε μια από τις τρεις αυτές ρυθμίσεις είναι ανεξάρτητη των άλλων δυο. Μια τιμή «50» για τη φωτεινότητα και την αντίθεση σημαίνει ότι δεν συμβαίνει καμία αλλαγή στην εμφάνιση της εικόνας. Η αντίστοιχη τιμή για τη «Διόρθωση Γάμμα» είναι «1».

Με τα εικονίδια ρύθμισης καναλιού χρώματος (**Σχήμα 23**) ρυθμίζονται τα κανάλια της Φωτεινότητας, του Κόκκινου, του Πράσινου και του Μπλε χρώματος ανάλογα με το αν επιλέξουμε το 1^ο, 2^ο, 3^ο ή 4^ο (από τα αριστερά προς τα δεξιά) εικονίδιο. Σε αυτήν την περίπτωση το κανάλι της Φωτεινότητας (Luminance Channel) ρυθμίζει την ένταση των συνδυασμένων τριών καναλιών των χρωμάτων της εικόνας (RGB Channels) και δεν πρέπει να συγχέεται με τη φωτεινότητα που ρυθμίζεται από τα κυλιόμενα σημεία ελέγχου. Σε περίπτωση που η εικόνα δεν είναι τύπου «True Color» ή τύπου «Palette» δεν υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης των καναλιών των τριών χρωμάτων παρά μόνο του καναλιού της Φωτεινότητας.

Ενεργοποιώντας την επιλογή «Apply» εφαρμόζονται οι ρυθμίσεις που έχουμε επιλέξει στην εικόνα μας ενώ με την επιλογή «Revert» αντιστρέφονται οι ρυθμίσεις που έχουν οριστεί. Η επιλογή «Reset» επαναφέρει τις ρυθμίσεις στην αρχική τους κατάσταση. Τέλος ενεργοποιώντας την επιλογή «More» ανοίγει ένα νέο παράθυρο με περισσότερες και πιο λεπτομερείς επιλογές, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 24**.

Το νέο αυτό παράθυρο στην αριστερή του πλευρά περιέχει όλες τις επιλογές της μπάρας ρύθμισης φωτεινότητας, αντίθεσης και «Διόρθωσης Γάμμα» που αναφέρθηκαν παραπάνω και στη δεξιά του πλευρά έχει καινούργιες επιλογές. Μια από αυτές είναι η ρύθμιση της καμπύλης που περιγράφει την κλίμακα έντασης της εικόνας.

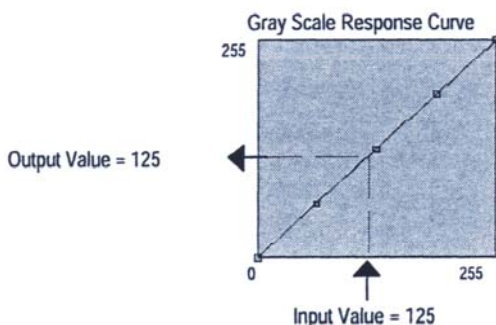


Σχήμα 24

Παράθυρο επιλογών που εμφανίζεται όταν ενεργοποιηθεί η επιλογή «More» του Σχήματος 21

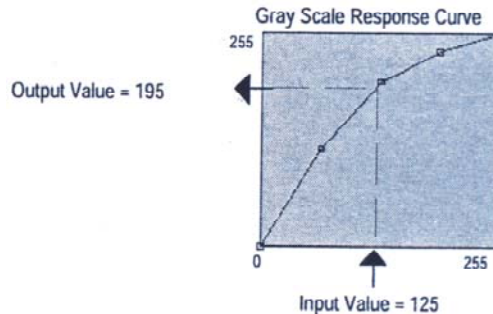
Αρχικά, ανοίγοντας το παράθυρο του **Σχήματος 24**, οι τιμές στην κλίμακα έντασης παράγουν μια γραμμική καμπύλη ελέγχου της έντασης της εικόνας, όπου οι τιμές της κλίμακας έντασης της αρχικής εικόνας (Input Values) είναι ίδιες με τις τιμές της κλίμακας έντασης της τελικής εικόνας (Output Values). Η μορφή μιας τέτοιας καμπύλης είναι αυτή που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 25**, όπου η μικρότερη τιμή αντιστοιχεί στο μηδέν και η μεγαλύτερη στο 255.

Το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα μεταβολής της μορφής της καμπύλης μέσω της μεταβολής των τιμών των σημείων ελέγχου της. Έτσι, ο χρήστης μπορεί, για παράδειγμα, να ορίσει όλες οι τιμές στην κλίμακα έντασης που είναι πάνω από 200 (Input Values) να αντιστοιχούν σε μια, ίδια, τελική τιμή ίση με 255 (Output Value). Αυτό επιτυγχάνεται με τη δυνατότητα που δίνει το λογισμικό στο χρήστη να επιλέξει τον αριθμό των σημείων ελέγχου της καμπύλης, που μπορεί να είναι 2, 5, 9 ή 256. Το πώς επηρεάζεται η καμπύλη με μεταβολή των σημείων ελέγχου της φαίνεται στο **Σχήμα 26**, όπου παρουσιάζεται η νέα καμπύλη που προκύπτει αν στην καμπύλη του **Σχήματος 25** η τιμή «Input Value» παραμείνει 125 και μεταβληθεί η τιμή «Output Value» από 125 σε 195.



Σχήμα 25

Μορφή γραμμικής καμπύλης



Σχήμα 26

Μεταβολή σημείου ελέγχου γρ.καμπύλης

Thresholding

Η εντολή Thresholding εκτελείται από το μενού Process και δίνει τη δυνατότητα της μετατροπής μιας έγχρωμης εικόνας σε μια νέα εικόνα ασπρόμαυρη (που αποτελείται δηλαδή μόνο από δυο χρώματα, το άσπρο και το μαύρο). Χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό μιας εικόνας σε μαύρο και άσπρο με σκοπό την πιο εύκολη εξαγωγή δεδομένων από αυτήν ή την προετοιμασία της για άλλες διαδικασίες (διαδικασία που διευκολύνεται όταν η εικόνα είναι ασπρόμαυρη).

B.1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΦΙΛΤΡΩΝ

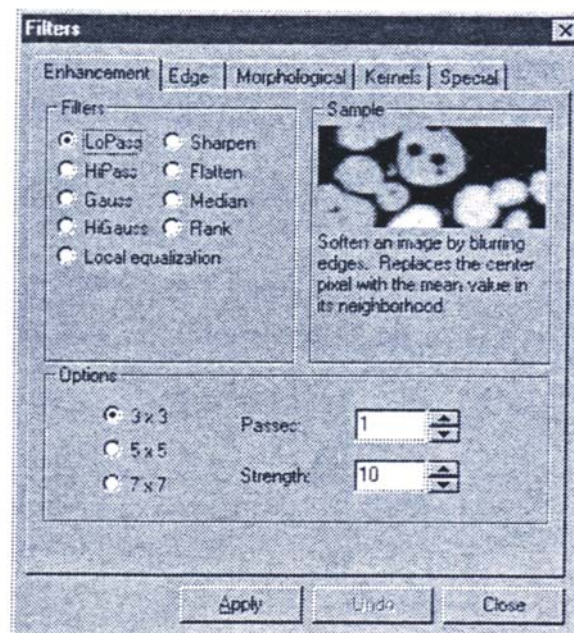
Με την εφαρμογή των κατάλληλων φίλτρων ρυθμίζεται η μεταβολή στο *Επίπεδο Έντασης* μιας εικόνας. Περιοχές της εικόνας στις οποίες υπάρχουν ξαφνικές αλλαγές στο *Επίπεδο Έντασης* εμφανίζεται ως οι λεγόμενες «Hard edges» ενώ αντίθετα περιοχές όπου η μεταβολή του *Επιπέδου Έντασης* είναι ομαλή καλούνται «Soft edges». Η εφαρμογή φίλτρων έχει ως σκοπό να εντοπίσει και να ρυθμίσει κατάλληλα το *Επίπεδο Έντασης* σε αυτές τις περιοχές. Τέτοια φίλτρα μπορούν να αυξήσουν τη διαφορά *Έντασης* σε μια περιοχή «Soft edge» ή να τη μειώσουν σε μια περιοχή «Hard edge».

Τα φίλτρα ποικίλουν σε λειτουργίες και σε αριθμό στο λογισμικό «Image Pro Plus» και αναφέρονται οι κυριότερες κατηγορίες φίλτρων που είναι:

1. Enhancement Filters
2. Edge Filters
3. Morphological Filters
4. Special Filters

B.1.2.1 Enhancement Filters

Στο **Σχήμα 27** παρουσιάζονται οι επιμέρους επιλογές της κατηγορίας Enhancement Filters.



Σχήμα 27

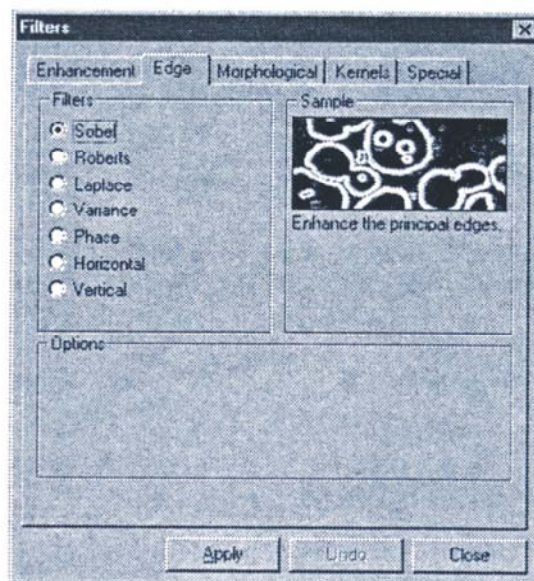
Καρτέλα επιλογής φίλτρου της κατηγορίας Enhancement Filters

- **LoPass:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για τη μείωση των πληροφοριών μιας εικόνας που βρίσκονται σε υψηλές συχνότητες (high frequency information) αντικαθιστώντας ένα τυχαίο pixel με τη μέση τιμή των γειτονικών του. Με αυτόν τον τρόπο μετριάζονται οι έντονες οπτικές διακυμάνσεις μέσα σε μια εικόνα. Το φίλτρο αυτό μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση θορύβου (noise) από μια εικόνα.
- **HiPass:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για την αύξηση των πληροφοριών μιας εικόνας που βρίσκονται σε υψηλές συχνότητες αντικαθιστώντας ένα pixel με μια νέα τιμή, η οποία αυξάνει την αντίθεση του pixel σε σχέση με τα γειτονικά του.
- **Gauss:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για την αποκοπή όλων των πληροφοριών μιας εικόνας που βρίσκονται σε υψηλές συχνότητες (high frequency information) με τη βοήθεια μιας συνάρτησης Gauss. Η λειτουργία του φίλτρου Gauss είναι παρόμοια με αυτή του LoPass αλλά μετριάζει τις οπτικές διακυμάνσεις μιας εικόνας λιγότερο από ότι το LoPass φίλτρο.
- **HiGauss:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για την αύξηση της καθαρότητας μιας εικόνας. Η λειτουργία είναι παρόμοια με αυτή του φίλτρου **Sharpen** με τη διαφορά ότι εισάγει λιγότερη θόρυβο (noise), κατά την εφαρμογή του, στην εικόνα.

- **Local Equalize:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για την αύξηση της αντίθεσης μεταξύ των pixel με βάση τα γειτονικά pixel.
- **Sharpen:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για την αύξηση της καθαρότητας μιας εικόνας ή για την επανεστίαση μιας εικόνας η οποία παρουσιάζεται θολωμένη.
- **Flatten:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση των διακυμάνσεων στο φόντο (background) μιας εικόνας ώστε να είναι ευκρινέστερα τα τυχόν αντικείμενα που περιέχονται σε αυτή. Η εφαρμογή του συνίσταται στην προετοιμασία μιας εικόνας ώστε να είναι εφικτές οι λειτουργίες μετρήσεων που σχετίζονται με αντικείμενα που περιέχονται σε αυτή. Η λειτουργία του φίλτρου αυτού βασίζεται στη μείωση των διακυμάνσεων του επιπέδου έντασης στα pixel του φόντου μιας εικόνας.
- **Median:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση παλμικού θορύβου από μια εικόνα. Η λειτουργία του βασίζεται στην αντικατάσταση ενός pixel με τη μέση τιμή των γειτονικών του pixel.

B.1.2.2 Edge Filters

Στο Σχήμα 28 παρουσιάζονται οι επιμέρους επιλογές της κατηγορίας Edge Filters.



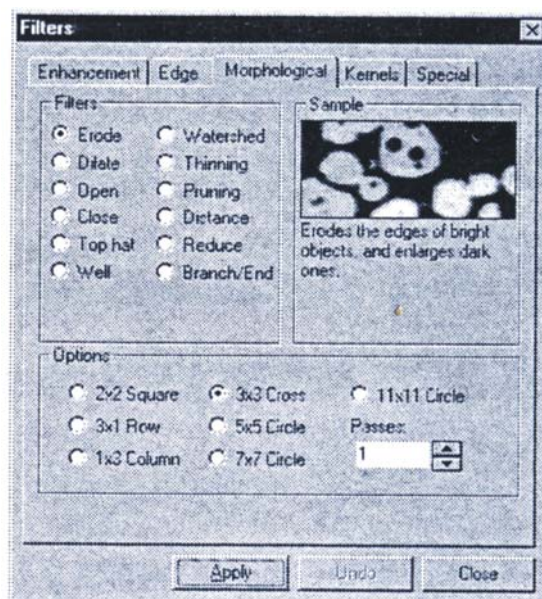
Σχήμα 28

Καρτέλα επιλογής φίλτρου της κατηγορίας Edge Filters

- **Sobel:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για τον τονισμό των βασικών περιγραμμάτων που περιέχονται σε μια εικόνα. Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιεί μια μαθηματική φόρμουλα του λογισμικού «Image Pro Plus» σε μια περιοχή, για τον εντοπισμό και τον τονισμό αυτών των περιγραμμάτων.
- **Roberts:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για τον τονισμό των δευτερευόντων περιγραμμάτων που περιέχονται σε μια εικόνα. Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιεί μια μαθηματική φόρμουλα του λογισμικού «Image Pro Plus» σε μια περιοχή, για τον εντοπισμό και τον τονισμό αυτών των περιγραμμάτων.
- **Laplace:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για τον τονισμό όλων των περιγραμμάτων μιας εικόνας.
- **Variance:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό και τον τονισμό περιγραμμάτων και υφής μιας εικόνας.
- **Phase:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για τη μεγέθυνση των περιγραμμάτων που περιέχονται σε μια εικόνα με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι φανερή η διεύθυνση τη αύξησης αυτής. Το φίλτρο είναι το συμπληρωματικό του φίλτρου Sobel.
- **Horizontal / Vertical:** Τα φίλτρα αυτά χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό και τον τονισμό οριζόντιων / κάθετων περιγραμμάτων.

B.1.2.3 Morphological Filters

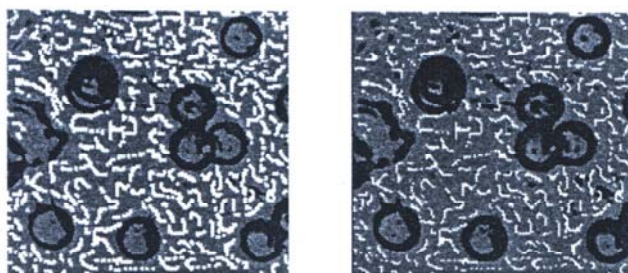
Στο **Σχήμα 29** παρουσιάζονται οι επιμέρους επιλογές της κατηγορίας Morphological Filters.



Σχήμα 29

Καρτέλα επιλογής φίλτρου της κατηγορίας Morphological Filters

- **Erode:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για τη μεταβολή του μεγέθους των φωτεινών αντικειμένων που βρίσκονται μέσα σε μια εικόνα. Η λειτουργία του βασίζεται στη «διάβρωση» των περιγραμμάτων φωτεινών αντικειμένων και στη μεγέθυνση των περιγραμμάτων των σκοτεινών αντικειμένων.



Σχήμα 30

*Διακρίνεται αριστερά η αρχική εικόνα και δεξιά η εικόνα μετά την επιβολή του φίλτρου **Erode***

- **Dilate:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για τον ίδιο λόγο που χρησιμοποιείται και το **Erode** φίλτρο. Η λειτουργία του, όμως, βασίζεται στη διαστολή των περιγραμμάτων φωτεινών αντικειμένων και στη «διάβρωση» των περιγραμμάτων των σκοτεινών αντικειμένων.

- **Open:** Σε εικόνες που περιέχουν φωτεινά αντικείμενα σε σκούρο φόντο, τα οποία βρίσκονται πολύ κοντά το ένα στο άλλο, η εφαρμογή του συγκεκριμένου φίλτρου έχει ως αποτέλεσμα τον σαφή διαχωρισμό των αντικειμένων, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 31**.



Σχήμα 31

*Διακρίνεται αριστερά η αρχική εικόνα και δεξιά η εικόνα μετά την επιβολή του φίλτρου **Open***

- **Tophat:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό και τον τονισμό σημείων μιας εικόνας, τα οποία είναι φωτεινότερα από το φόντο της.
- **Well:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό και τον τονισμό σημείων μιας εικόνας, τα οποία είναι πιο σκούρα από το φόντο της.
- **Watershed:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό αντικειμένων μιας εικόνας, τα οποία βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους. Η λειτουργία του φίλτρου βασίζεται στη «διάβρωση» των αντικειμένων μέχρι αυτά να εξαφανισθούν (όχι όμως να πάψουν να υπάρχουν) και στη συστολή τους με τέτοιο τρόπο ώστε να μην έρχονται σε επαφή μεταξύ τους.
- **Thinning:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για τη μεταβολή μιας εικόνας από πλήρη σε ένα βασικό σκελετό των περιεχομένων της. Το φίλτρο αυτό βρίσκει εφαρμογή μόνο σε ασπρόμαυρες εικόνες. Στο **Σχήμα 32** φαίνεται αριστερά η αρχική εικόνα και δεξιά το αποτέλεσμα μετά την επιβολή του συγκεκριμένου φίλτρου (δύο συνεχόμενες φορές).



Σχήμα 32

*Διακρίνεται αριστερά η αρχική εικόνα και δεξιά η εικόνα μετά την επιβολή του φίλτρου **Thinning***

- **Pruning:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό και τη διαγραφή προεξοχών από αντικείμενα που βρίσκονται σε μια εικόνα, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 33**.



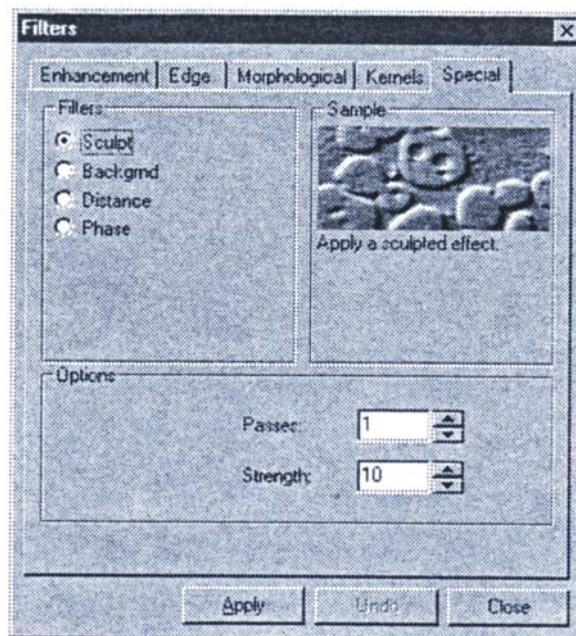
Σχήμα 33

Διακρίνεται αριστερά η αρχική εικόνα και δεξιά η εικόνα μετά την επιβολή του φίλτρου **Pruning**

- **Distance:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για την προβολή των αποστάσεων μεταξύ των pixel που βρίσκονται εσωτερικά κάποιου σώματος που περιέχεται στην εικόνα και του εξωτερικού περιγράμματος αυτού του σώματος. Έτσι, μετά την εφαρμογή του φίλτρου αυτού σε μια εικόνα, το φόντο της γίνεται μαύρο (δηλ pixels με τιμή 0). Μόνο περιοχές που βρίσκονται μέσα σε σώματα της εικόνας έχουν μη μηδενικές τιμές (δηλ φαίνονται άσπρα). Η αριθμητική τιμή που αντιστοιχεί σε κάθε pixel που βρίσκεται στο εσωτερικό ενός σώματος είναι η μικρότερη απόσταση από ένα pixel που βρίσκεται στο περίγραμμα του σώματος. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένας χάρτης αποστάσεων (distance map) της εικόνας. Το φίλτρο αυτό εφαρμόζεται μόνο σε ασπρόμαυρες εικόνες.
- **Reduce:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για τη μετατροπή αντικειμένων που περιέχονται σε μια εικόνα σε ένα και μοναδικό σημείο ή σε ένα σύνολο σημείων. Το φίλτρο αυτό εφαρμόζεται μόνο σε ασπρόμαυρες εικόνες.

B.1.2.4 Special Filters

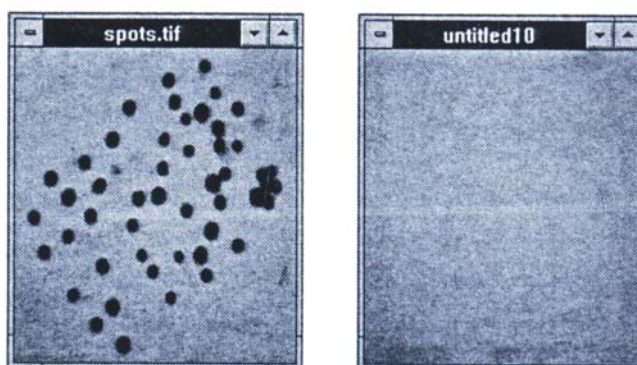
Στο **Σχήμα 34** παρουσιάζονται οι επιμέρους επιλογές της κατηγορίας Morphological Filters.



Σχήμα 34

Καρτέλα επιλογής φίλτρου της κατηγορίας Special Filters

- **Sculpt:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για την εφαρμογή ενός ειδικού εφέ (sculpted) στην εικόνα.
- **Background:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του φόντου μιας εικόνας. Μια νέα εικόνα που περιέχει μόνο το εξαχθέν φόντο εμφανίζεται μέσα σε ένα νέο πλαίσιο παραθύρου, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 35**.



Σχήμα 35

*Διακρίνεται αριστερά η αρχική εικόνα και δεξιά η εικόνα μετά την επιβολή του φίλτρου **Background***

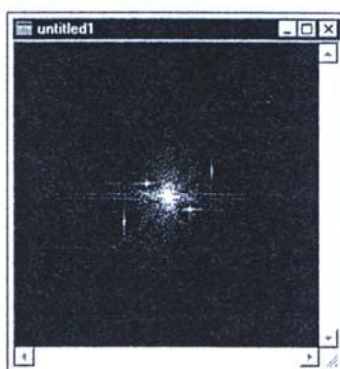
- **Distance:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός χάρτη αποστάσεων μιας εικόνας και βρίσκει εφαρμογή μόνο σε ασπρόμαυρες εικόνες.
- **Phase:** Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για τη μεγέθυνση των περιγραμμάτων που περιέχονται σε μια εικόνα με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι φανερή η διεύθυνση τη αύξησης αυτής.

B.1.3 ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΜΙΑΣ ΕΙΚΟΝΑΣ

Συχνά, μέσα σε μια εικόνα υπάρχουν παρεμβολές, με τη μορφή διαφόρων σχημάτων, οι οποίες είναι πολύ δύσκολο να αφαιρεθούν με τη ρύθμιση της έντασης της εικόνας ή την εφαρμογή κάποιου φίλτρου. Ο πιο κατάλληλος τρόπος για την διόρθωση τέτοιων παρεμβολών, που στην ουσία είναι περιοδικός ή κάποιος συναφής θόρυβος, είναι η μετατροπή της εικόνας σε ένα σύνολο συχνοτήτων και εν συνεχεία η διαγραφή των συχνοτήτων που προκαλούν το πρόβλημα.

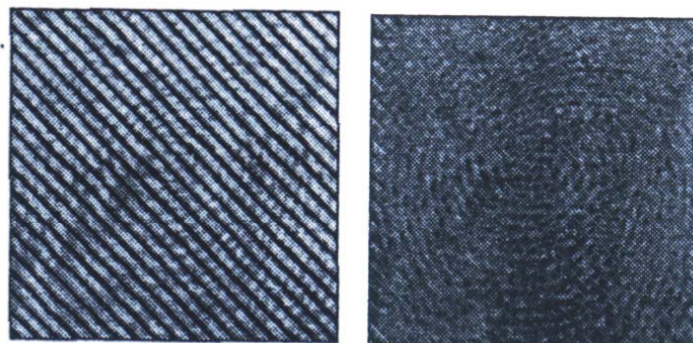
Η διαδικασία μετατροπής μιας εικόνας στο πεδίο των συχνοτήτων καλείται Μετασχηματισμός Fourier και στο λογισμικό «Image Pro Plus» πραγματοποιείται με χρήση της εντολής «FFT» (Fast Fourier Transform), η οποία βρίσκεται στο μενού «Process».

Συνήθως, σε μια εικόνα το φάσμα των συχνοτήτων παρουσιάζεται σαν ένα κυκλικό σώμα το οποίο είναι πιο φωτεινό και συμπαγές στο κέντρο του. Αν η εικόνα περιέχει θόρυβο (περιοδικό ή συναφή), τότε αυτός αντιστοιχεί (στο φάσμα των συχνοτήτων) σε κάποιες φωτεινές κουκίδες (bright points) που εμφανίζονται γύρω από το κυκλικό σώμα. Η αφαίρεση των σημείων αυτών ισοδυναμεί με αφαίρεση των συχνοτήτων που αντιστοιχούν στο θόρυβο.



Σχήμα 36

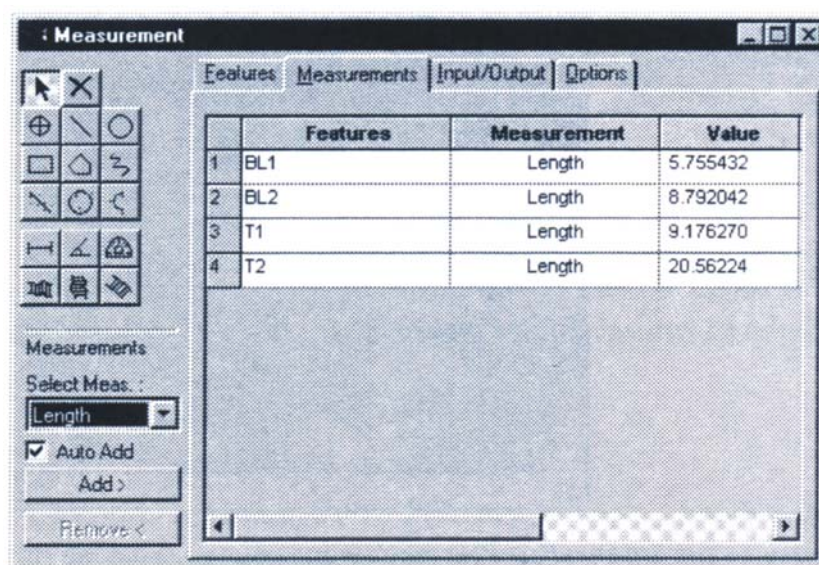
Εικόνα που περιέχει θόρυβο (φωτεινές κουκίδες) όπως αυτός φαίνεται μετά την εφαρμογή της εντολής «FFT»



Σχήμα 37







Διακρίνεται αριστερά η αρχική εικόνα που περιέχει θόρυβο και δεξιά η εικόνα μετά την διόρθωσή της


B.1.4 ΕΝΤΟΛΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ





Σχήμα 38


Παράθυρο επιλογής εντολών μετρήσεων και εμφάνισης των αποτελεσμάτων

-  **Selector:** Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για την επιλογή κάποιου από τα υπάρχοντα χαρακτηριστικά ή μετρήσεις (για παράδειγμα να μετακινήσει ή να τα σβήσει)
-  **Delete:** Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση κάθε επιλεγμένου χαρακτηριστικού ή μέτρησης, από την εικόνα και ενεργοποιείται μόνο αν υπάρχει ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά επιλεγμένα με το **Εργαλείο Επιλογής** (Selection Tool).
-  **Create Click and Drag Angle Measurement:** Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία δυο γραμμών και τη μέτρηση της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα στις δυο αυτές γραμμές. Αυτή η εντολή διαφέρει από τις υπόλοιπες εντολές μετρήσεων στο ότι δεν επιλέγει δυο χαρακτηριστικά ανάμεσα στα οποία θα γίνει η μέτρηση, αλλά πρώτα δημιουργεί τα δυο αυτά χαρακτηριστικά (δυο γραμμές) και στη συνέχεια εξάγει από αυτά τη μέτρηση.
-  **Straight Line:** Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μιας ίσιας γραμμής πάνω στην ήδη υπάρχουσα εικόνα. (Είναι το ίδιο εργαλείο που σε προηγούμενη έκδοση του προγράμματος είχε την ονομασία **Length Tool**)
-  **Horizontal Thickness:** Αυτή η εντολή επιτρέπει τη μέτρηση της οριζόντιας minimum ή maximum απόστασης ανάμεσα σε δυο γραμμές (lines).
-  **Vertical Thickness:** Αυτή η εντολή επιτρέπει τη μέτρηση της κάθετης, ελάχιστης ή μέγιστης, απόστασης ανάμεσα σε δυο γραμμές (lines).

 **Curve Thickness:** Αυτή η εντολή επιτρέπει τη μέτρηση της minimum ή maximum απόστασης ανάμεσα σε δυο χαρακτηριστικά (features) σε οποιαδήποτε κατεύθυνση.

 **Point:** Αυτή η εντολή επιτρέπει τη δημιουργία ενός σημείου σε μια εικόνα.

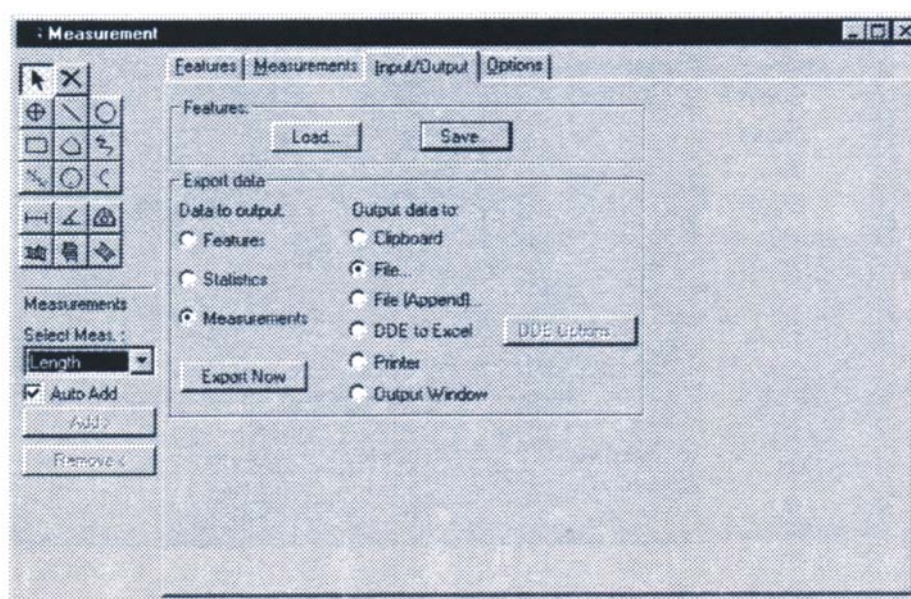
 **Best Fit Line:** Αυτή η εντολή επιτρέπει τη δημιουργία μιας ευθείας γραμμής που παρεμβάλλει ένα σύνολο σημείων.

 **Add Angle Measurement:** Αυτή η εντολή επιτρέπει τη μέτρηση της γωνίας μεταξύ δυο γραμμών που υπάρχουν σε μια εικόνα. Η γωνία είναι θετική αν η φορά της μέτρησης είναι ωρολογιακή.

Η «**Καρτέλα Εισερχόμενων / Εξερχόμενων**» (**Σχήμα 39**) παρέχει τη δυνατότητα για «φόρτωση» ή αποθήκευση των μετρήσεων, για «φόρτωση» περιγραμμάτων (outlines) και για αντιγραφή δεδομένων σε αρχείο ή εξαγωγή τους στο Excell.

- Χρησιμοποιήθηκε η επιλογή **DDE To Excell**

Με την εντολή αυτή μπορούμε να μεταφέρουμε τα δεδομένα των μετρήσεών μας σε ένα φύλλο του Excell. Πριν επιλέξουμε την εντολή αυτή θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την επιλογή **DDE Options** για να προσδιορίσουμε το ακριβές σημείο (μέσα στο Excell) για την εξαγωγή των δεδομένων μας. Όταν επιλέξουμε **DDE To Excell**, η μεταφορά των δεδομένων συμβαίνει χωρίς να το αντιληφθεί ο χρήστης του προγράμματος. Αλλάζοντας περιβάλλον και πηγαίνοντας στο Excell (το οποίο έχει ανοίξει αυτόματα), μπορούμε να επιβεβαιώσουμε ότι η μεταφορά δεδομένων έχει πραγματοποιηθεί.



Σχήμα 39

Παράθυρο επιλογής Καρτέλας Εισερχόμενων / Εξερχόμενων

B.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα των μετρήσεων από στερεοποιημένα σωματίδια που δημιουργήθηκαν με τη μέθοδο ατμοσφαιρικού ψεκασμού πλάσματος (APS). Αρχικά γίνεται μια σύντομη παρουσίαση στα υλικά ψεκασμού και υποστρώματος που χρησιμοποιήθηκαν και στη διαδικασία προετοιμασίας του υποστρώματος και χαρακτηρισμού των δοκιμίων. Ένα μέρος της διαδικασίας πραγματοποιήθηκε στο Centre des Materiaux της Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris στο Evry. Η μελέτη των splats και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Εν συνεχεία, περιγράφεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε και πώς αυτή στήθηκε προκειμένου να επιτευχθεί η συλλογή μικρού αριθμού splats στα κατάλληλα υποστρώματα. Επίσης, αναφέρονται αναλυτικά όλες οι συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα.

B.2.1 ΥΛΙΚΟ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΟΥΔΡΑΣ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

Ως υπόστρωμα χρησιμοποιήθηκε κράμα αλουμινίου της σειράς 2000. Τα κράματα της σειράς αυτής έχουν μηχανικές αντοχές υψηλότερες από αυτές του μέσου χάλυβα. Χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις κατασκευών με απαίτηση υψηλές μηχανικές αντοχές. Κάτω από ειδικές συνθήκες παρουσιάζουν μια αυξημένη ευαισθησία στην ατμοσφαιρική διάβρωση, γι' αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται ειδική μέριμνα προστασίας. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αεροναυπηγική, στη ναυπηγική, στη βιομηχανία όπλων, κλπ.

Αρχικά κόπηκαν δοκίμια διαστάσεων 24x24x3 mm³. Στη συνέχεια με δυο διαφορετικές κατεργασίες μεταβλήθηκε η επιφανειακή τραχύτητα των δοκιμίων:

α) Προκειμένου τα υποστρώματα να αποκτήσουν τραχύτητα $R_a \approx 0.03 \mu\text{m}$ πραγματοποιήθηκε λείανση των δοκιμίων με χαρτιά SiC από βαθμό 600 έως και 4000 και στη συνέχεια στίλβωση, η οποία και έγινε με τέσσερις διαφορετικές πάστες διαμαντιού: 7 μm , 3 μm , 1 μm και 1/4 μm .

β) Προκειμένου τα υποστρώματα Dural αποκτήσουν τραχύτητα $R_a \approx 0.5 \mu\text{m}$ πραγματοποιήθηκε χημική προσβολή. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε διάλυμα «Kroll», το οποίο αποτελείται από 3 ml Υδροχλωρικό οξύ, 5 ml Νιτρικό οξύ, 2 ml Υδροφθορικό οξύ και 190 ml Απιονισμένο νερό.

Πριν πραγματοποιηθεί ο ψεκασμός πλάσματος, όλα τα δοκίμια καθαρίστηκαν με υπέρηχους.

Για τη συλλογή μικρού αριθμού σταγονιδίων επιλέχθηκε πούδρα χαλκού (Cu) με κοκκομετρία (-90+45) μm . Είναι πούδρα εμπορικής χρήσης και προέρχεται από την εταιρία «Sulzer-Metco», με στοιχεία παραγωγής:

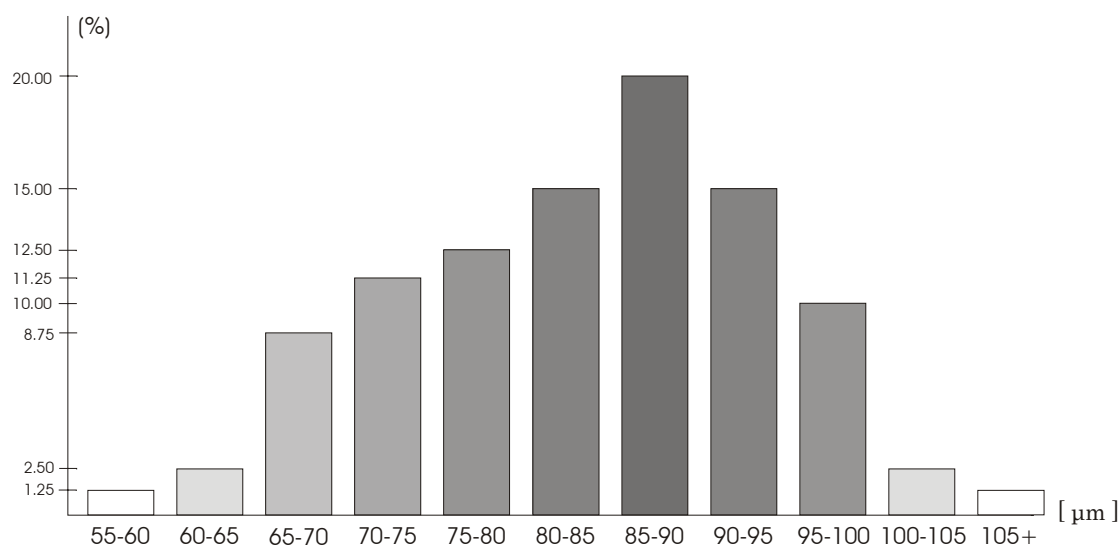
- Ονομασία: METCO 55
- Αριθμός Παραγωγής: 330294

ΠΙΝΑΚΑΣ Π-1	
ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΟΥΔΡΑΣ ΧΑΛΚΟΥ	
	Cu (wt %)
METCO 55	99.8

Πριν πραγματοποιηθεί ο ψεκασμός, η πούδρα παρατηρήθηκε με Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM). Με τη βοήθεια του προγράμματος ανάλυσης εικόνας (Image Pro Plus) μετρήθηκαν οι διάμετροι των σωματιδίων προκειμένου να βρεθεί η κατανομή των κόκκων της πούδρας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον **Πίνακα Π-2**.

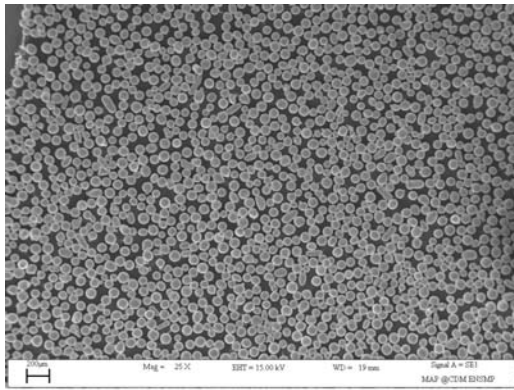
Από τη γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων του Πίνακα Π-2 (Σχήμα 40) φαίνεται ότι η κατανομή είναι *Κατανομή Gauss* και παρατηρείται η ύπαρξη και σωματιδίων διαμέτρου μεγαλύτερης από αυτής των προδιαγραφών.

ΠΙΝΑΚΑΣ Π-2	
ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΙΑΜΕΤΡΩΝ ΚΟΚΚΩΝ ΧΑΛΚΟΥ	
<i>Διάμετρος [μm]</i>	<i>Ποσοστό κόκκων [%]</i>
55 – 60	1.25
60 – 65	2.50
65 – 70	8.75
70 – 75	11.25
75 – 80	12.50
80 – 85	15.00
85 – 90	20.00
90 – 95	15.00
95 – 100	10.00
100 – 105	2.50
105 +	1.25

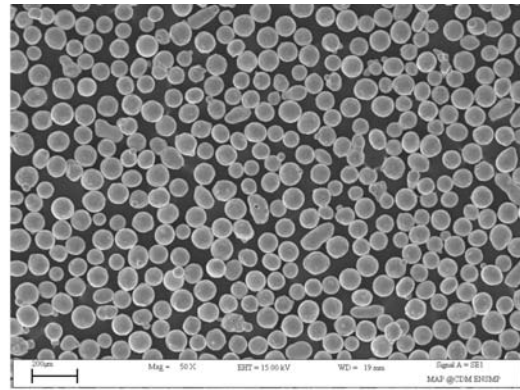


Σχήμα 40
Γραφική παράσταση της κατανομής των κόκκων της πούδρας

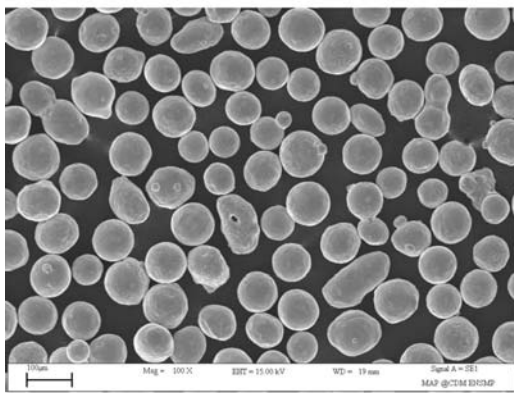
Στο Σχήμα 41 παρουσιάζονται φωτογραφίες SEM, από τις οποίες γίνεται φανερό ότι τα αρχικά σωματίδια είχαν σφαιρικό σχήμα.



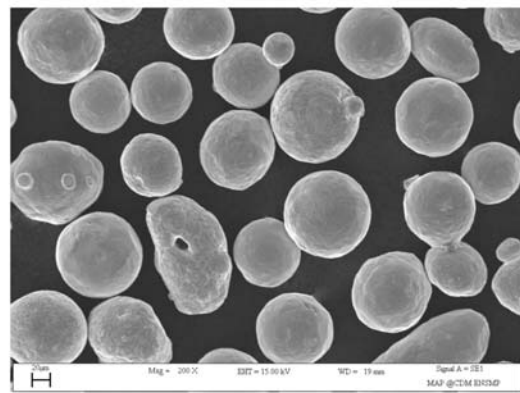
- α -



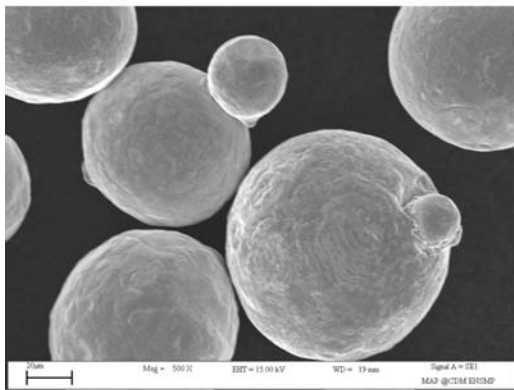
- β -



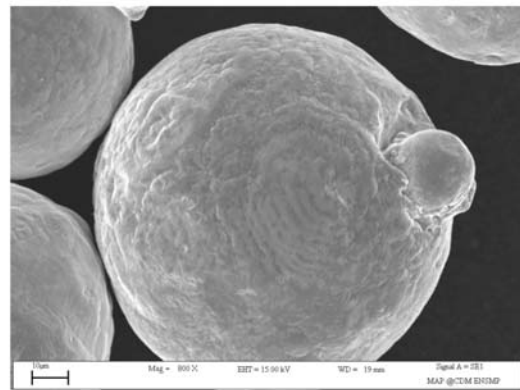
- γ -



- δ -



- ε -



- στ -

Σχήμα 41

Φωτογραφίες SEM των κόκκων της πούδρας σε έξι διαφορετικές κλίμακες

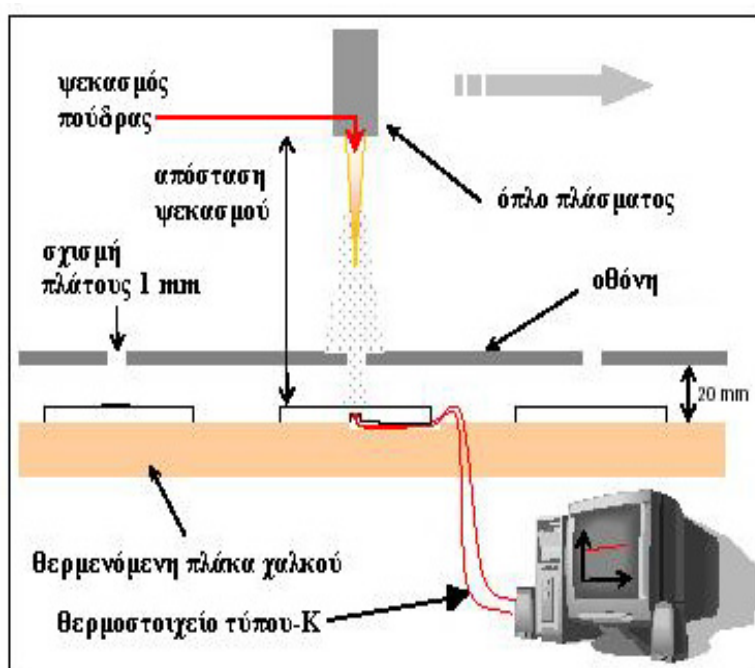
B.2.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΜΙΚΡΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ SPLATS

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο σύστημα ψεκασμού πλάσματος ελεγχόμενης ατμόσφαιρας ("Controlled Atmosphere Plasma Spraying", (CAPS)) **SULZER METCO CAPS**, στο Centre des Materiaux της Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris στο Evry

Η μεγάλη δυσκολία για τη μελέτη του σταδίου της διαπλάτυνσης, οφείλεται στην αδυναμία μέτρησης του χρόνου αυτής, μιας και είναι εξαιρετικά μικρός. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό, η μελέτη θα πρέπει να στραφεί στην παρατήρηση όσο γίνεται μικρότερου αριθμού σταγόνων του ψεκαζόμενου υλικού πάνω στο υπόστρωμα. Κατά συνέπεια, το βασικό χαρακτηριστικό της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε ήταν η δυνατότητα παρατήρησης όσο γίνεται λιγότερων σταγόνων της ψεκαζόμενης σκόνης στο υπό εξέταση υπόστρωμα, με ταυτόχρονη καταγραφή της θερμοκρασίας του υποστρώματος και για διαφορετικές τραχύτητες αυτού. Συγκεκριμένα, η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή των σταγόνων, αποτελείται από οθόνη με σχισμή λίγων χιλιοστών που τοποθετείται ανάμεσα στο όπλο ψεκασμού και τα υποστρώματα. Κάτω από τα υποστρώματα υπήρχαν θερμαντικά στοιχεία τα οποία θέρμαιναν τα υποστρώματα στην επιθυμητή θερμοκρασία. Η ακριβής θερμοκρασία των υποστρωμάτων καταγράφηκε με θερμοστοιχείο K-τύπου που είχε τοποθετηθεί κατάλληλα στη κάτω πλευρά του υποστρώματος. Τα πειράματα έγιναν για τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες υποστρώματος:

1. $T_s = 200^\circ C$
2. $T_s = 240^\circ C$
3. $T_s = 270^\circ C$

Από τις μετρήσεις του θερμοστοιχείου παρατηρήθηκε ότι η θερμοκρασία του υποστρώματος δεν επηρεάζεται από την υψηλή θερμοκρασία του δαυλού του πλάσματος και παραμένει σταθερή στα επιθυμητά επίπεδα. Στο **Σχήμα 42** παρουσιάζεται σχηματικά η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή μικρού αριθμού σταγονιδίων.



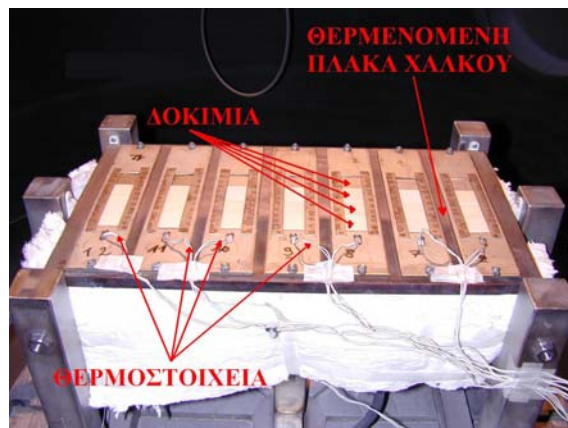
Σχήμα 42

Σχηματική διάταξη συλλογής μικρού αριθμού σταγονιδίων

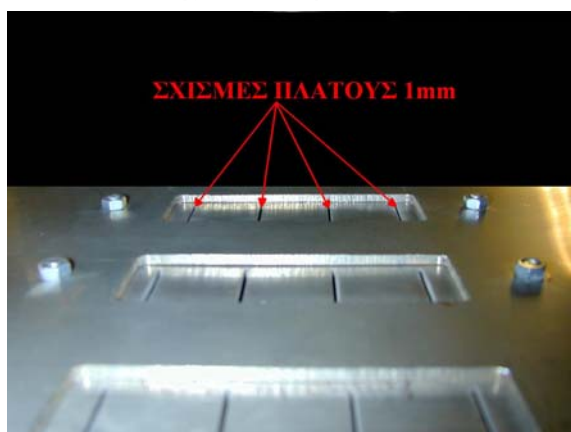
Λεπτομερέστερα η διάταξη παρουσιάζεται στις φωτογραφίες του Σχήματος 43 όπου φαίνεται και ο τρόπος τοποθέτησης των δοκιμών.



Σχήμα 43α: Θερμαντικά στοιχεία της διάταξης συλλογής σταγονιδίων



Σχήμα 43β: Τοποθέτηση των δοκιμών



Σχήμα 43γ: Οθόνη με σχισμές πλάτους 1mm



Σχήμα 43δ: Διάταξη συλλογής μικρού αριθμού σταγονιδίων και όπλο ψεκασμού

Σχήμα 43

Φωτογραφίες από τη διάταξη συλλογής μικρού αριθμού sprats

Για την παραγωγή επικαλύψεων είναι πολύ σημαντικό να επιλεχθούν οι κατάλληλες συνθήκες για τη δημιουργία της φλόγας πλάσματος, καθώς οι παράμετροι πτήσης των σωματιδίων επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα των επικαλύψεων θερμικού ψεκασμού [4,5]. Τα σωματίδια της πούδρας που θα ψεκαστούν θα πρέπει να έχουν την κατάλληλη ταχύτητα και οπωσδήποτε να βρίσκονται σε τηγμένη κατάσταση. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στις διαδικασίες θερμικών ψεκασμών είναι η πιθανή ύπαρξη μεγάλου ποσοστού άτηκτων σωματιδίων της αρχικής πούδρας, τα οποία υποβαθμίζουν τις ιδιότητες (μηχανικές και φυσικές) του επιστρώματος. Επομένως, θα πρέπει οι παράμετροι του πλάσματος όπως είναι τα αέρια δημιουργίας πλάσματος, η αναλογία των αερίων, η ένταση του πλάσματος και άλλες, να επιλεχθούν με μεγάλη προσοχή.

Επίσης, πολύ σημαντικός παράγοντας στις διαδικασίες ψεκασμού είναι η ροή της πούδρας ψεκασμού μέσα στο δαυλό του πλάσματος. Είναι προφανές ότι η

θερμοδυναμική του συστήματος μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα με το πλήθος των σωματιδίων που βρίσκονται μέσα στο δαυλό. Στα πειράματα που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια η ροή της πούδρας είναι αυτή που χρησιμοποιείται και στην παραγωγή. Σύμφωνα με πρόσφατη αναφορά [34] για να μελετηθούν τα splats θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί πολύ χαμηλή ροή πούδρας σαφώς μικρότερη από αυτή που χρησιμοποιείται σε βιομηχανική εφαρμογή. Χρησιμοποιώντας, όμως τελείως διαφορετική ροή πούδρας, η κατάσταση στην οποία βρίσκονται τα σωματίδια είναι εντελώς διαφορετική και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σύγκριση. Στην προκειμένη περίπτωση η πειραματική διάταξη επέτρεψε τη συλλογή μικρού αριθμού splats, ψεκάζοντας με βάση τις πραγματικές συνθήκες. Στον **Πίνακα Π-3** παρουσιάζονται οι παράμετροι ψεκασμού.

ΠΙΝΑΚΑΣ Π-3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΨΕΚΑΣΜΟΥ		
Αέριο Πλάσματος	(l/min)	Ar (80) – H ₂ (10)
Ένταση	(A)	600
Τάση	(V)	71
Όπλο Ψεκασμού		F4
Απόσταση Όπλου Ψεκασμού – Υποστρώματος	(mm)	140
Διάμετρος Αγωγού Τροφοδοσίας Πούδρας	(mm)	1.8
Γωνία Αγωγού Τροφοδοσίας Πούδρας – Όπλου		90°
Ροή Πούδρας	(g/min)	30
Αέριο Προώθησης Πούδρας	(l/min)	Ar (3)

Είναι, επίσης, απαραίτητο να αναφερθεί ότι οι ιδιότητες του υποστρώματος επηρεάζουν σε αρκετά μεγάλο βαθμό τη διαπλάτυση τηγμένων σωματιδίων και συνεπώς τις ιδιότητες των θερμικών επικαλύψεων. Υπάρχουν αναφορές που υποστηρίζουν ότι οι ιδιότητες του υποστρώματος επηρεάζουν σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό τη διαπλάτυση των σταγονιδίων συγκριτικά με τις συνθήκες πτήσης τους [4].

Στον **Πίνακα Π-4** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος και οι συνθήκες ψεκασμού που εφαρμόστηκαν

ΠΙΝΑΚΑΣ Π-4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΨΕΚΑΣΜΟΥ				
Υπόστρωμα	Προετοιμασία υποστρώματος	R_a (μm)	Τεχνική Ψεκασμού	T_s (°C)
Dural	Λείανση & Στίλβωση	0.03	APS	200
	Χημική Προσβολή	0.5		
	Λείανση & Στίλβωση	0.03	APS	240
	Χημική Προσβολή	0.5		
	Λείανση & Στίλβωση	0.03	APS	270
	Χημική Προσβολή	0.5		

B.2.3 ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΩΝ ΤΩΝ SPLATS

Για τη λήψη εικόνων των splat χρησιμοποιήθηκε ένα οπτικό μικροσκόπιο, πάνω στο οποίο προσαρμόστηκε μια ψηφιακή κάμερα, η οποία δίνει τη δυνατότητα να στέλνονται εικόνες, σε πραγματικό χρόνο, στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και πιο συγκεκριμένα στο περιβάλλον εργασίας του «Image Pro Plus».

Καταρχήν για να γίνει σωστή χρήση της διάταξης και πριν ακόμη γίνει η λήψη των εικόνων στον υπολογιστή πρέπει να οριστεί, τόσο στο οπτικό μικροσκόπιο όσο και στο λογισμικό, η κλίμακα της μεγέθυνσης που θα χρησιμοποιηθεί (για splat διαφόρων μεγεθών η κλίμακα αλλάζει). Έτσι, μέσω της εντολής **Measure**→**Calibration**→**Spatial**→**Spatial Calibration** ορίζεται η μεγέθυνση. Με αυτό τον τρόπο μεταφέρεται η εικόνα στην οθόνη του υπολογιστή (στην κατάλληλη κλίμακα) μαζί με ένα πλαίσιο μέσα στο οποίο αναγράφεται η κλίμακα της μεγέθυνσης, δυνατότητα που δίνει η τελευταία εντολή που αναφέρθηκε.

Πριν καταγραφεί οποιαδήποτε μέτρηση, γίνεται μια επεξεργασία της εικόνας ώστε αυτή να έχει, οπτικά, καλύτερη ποιότητα, χρησιμοποιώντας τις λειτουργίες που περιγράφηκαν στις παραγράφους B.1.1, B.1.2 και B.1.3. Στις βασικές λειτουργίες του λογισμικού είναι η τοποθέτηση ενός μαύρου πλαισίου στην περιφέρεια της εικόνας. Παρατηρήθηκε, όμως, ότι το πλαίσιο αυτό επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την εφαρμογή των φίλτρων που έχουν περιγραφεί και τα οποία βελτιώνουν στην ποιότητα της εικόνας. Η εντολή **NTUA user**→**Image Tools**→**Cut Black Border** χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την απομάκρυνση αυτού του πλαισίου. Στη συνέχεια, και στην κάθε εικόνα ξεχωριστά, εφαρμόστηκε μια από τις τελικές επιλογές της εντολής : **NTUA user**→**Enchase Lut** οι οποίες φαίνονται παρακάτω:

NTUA user→**Enchase Lut**→**Best fit**
→**Best fit RGB**
→**Balance lut**
→**Balance lut (white)**

Οι επιλογές αυτές έχουν να κάνουν με το contrast της εικόνας και την οπτική βελτίωση των σκούρων (dark) και φωτεινών (light) τμημάτων της. Λαμβάνοντας υπόψη ακόμη και τον φωτισμό του χώρου στον οποίο πήραμε τις εικόνες παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχει κάποιος κανόνας ως προς την εφαρμογή των εν λόγω επιλογών αλλά χρησιμοποιήθηκε η δοκιμή ώστε να γίνει φανερό πως αποτυπώνεται καλύτερα στην οθόνη του υπολογιστή η κάθε εικόνα.

B.3

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

B.3.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια έχουν διαχωριστεί αρχικά ανάλογα με την επιφανειακή τραχύτητα των υποστρωμάτων ($0.03\mu\text{m}$ ή $0.5\mu\text{m}$) και εν συνεχεία ανάλογα με τη θερμοκρασία προθέρμανσης του υποστρώματος (200°C , 240°C ή 270°C). Η ροή της πούδρας σε όλες τις περιπτώσεις είναι ίδια και ίση με $30\text{ gr}/\text{min}$ όπως και η χρησιμοποιούμενη μέθοδος θερμικού ψεκασμού (APS).

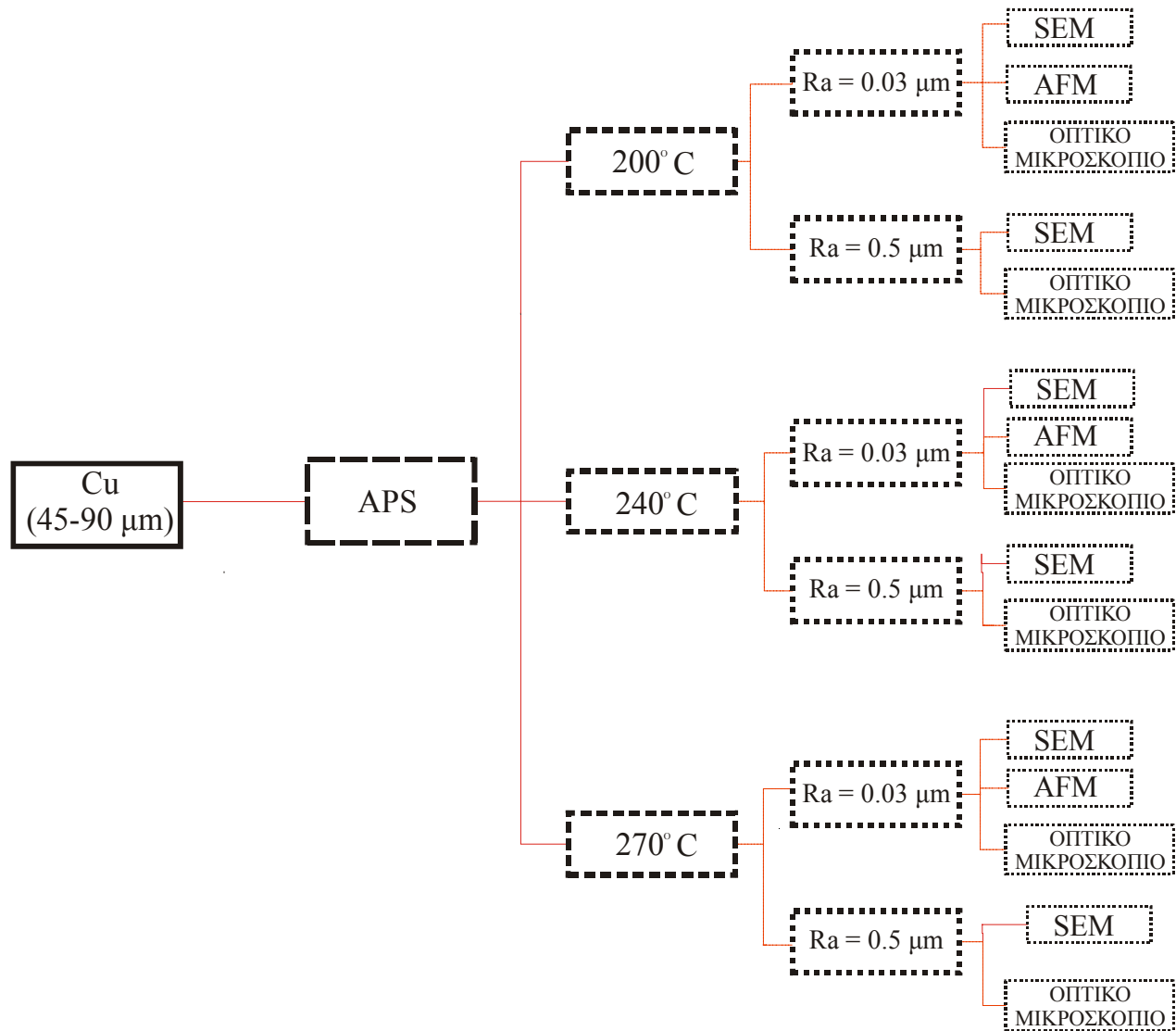
Σε κάθε περίπτωση τα splats παρατηρήθηκαν με οπτικό μικροσκόπιο εφοδιασμένο με το πρόγραμμα ανάλυσης εικόνας Image Pro Plus. Αρχικά, από την επιφάνεια των splats υπολογίστηκε ο Παράγοντας Σχήματος (Shape Factor) ο οποίος συνδέεται άμεσα με τη μορφολογία των splats και συγκεκριμένα με το πόσο κυκλικά είναι. Όπως έχει αναφερθεί για την παραγωγή επιστρωμάτων θερμικού ψεκασμού με βελτιωμένες ιδιότητες θα πρέπει τα splats να έχουν κυκλικό σχήμα. Συνεπώς, ο υπολογισμός του Shape Factor είναι αρκετά σημαντικός καθώς αποτελεί το μέτρο της κυκλικότητας των στερεοποιημένων σωματιδίων.

Στη συνέχεια και για την περίπτωση των λείων υποστρωμάτων ($R_a \approx 0.03\mu\text{m}$), υπολογίστηκε ο βαθμός διαπλάτυνσης (ξ), με δύο τρόπους:

1. Με τη βοήθεια του λογισμικού «Image Pro Plus» (από την παρατήρηση της τομής των splats σε SEM) .
2. Με τη χρησιμοποίηση τρισδιάστατων εικόνων από AFM.

Στη συνέχεια έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού του βαθμού διαπλάτυνσης και σχολιασμός τους.

Ο βαθμός διαπλάτυνσης των splats που είχαν σχηματιστεί στα υποστρώματα με $R_a \approx 0.5\mu\text{m}$ υπολογίστηκε μόνο με την ανάλυση των εικόνων του SEM με το Image Pro Plus. Η υψηλή τραχύτητα του υποστρώματος δεν επέτρεψε τη χρήση του μικροσκοπίου ατομικής δύναμης καθώς είτε εμπόδιζε την κίνηση της ακίδας του AFM είτε προκαλούσε ακόμα και τη θραύση της.



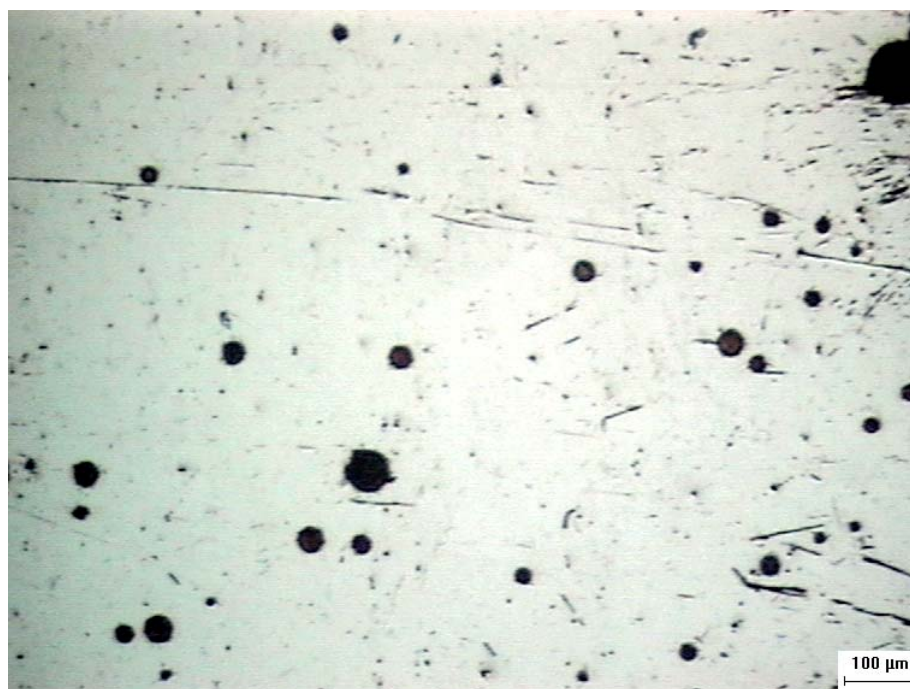
Σχήμα 44: Σχηματικό διάγραμμα κατηγοριοποίησης αποτελεσμάτων

B.3.2 ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΜΕ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ $Ra \approx 0.03 \mu\text{m}$

B.3.2.1 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΩΝ SPLATS ΜΕ ΟΠΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ

Η παρατήρηση με οπτικό μικροσκόπιο έδειξε ότι τα splats ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία του υποστρώματος είχαν κυκλικό σχήμα με μικρές προεκτάσεις στην περιφέρειά τους. Επίσης παρατηρήθηκε ότι δεν υπήρχαν διαφοροποιήσεις στο σχήμα τους ανάλογα με το μέγεθός τους.

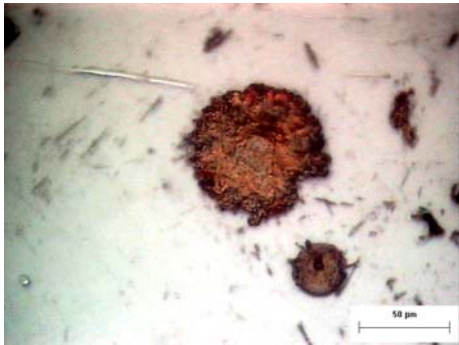
Στο **Σχήμα 45** παρουσιάζεται φωτογραφία από οπτικό μικροσκόπιο για $T_s = 200^\circ\text{C}$, όπου φαίνεται ότι τα splats είναι καλά διαχωρισμένα μεταξύ τους. Επίσης, φαίνεται ότι ο αριθμός των splats είναι αρκετά μεγάλος και επιτρέπει την επεξεργασία πλήθους δεδομένων. Τα δυο αυτά συμπεράσματα ισχύουν για όλες τις περιπτώσεις που θα μελετηθούν παρακάτω.



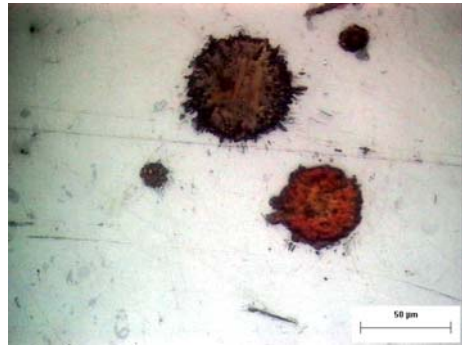
Σχήμα 45

Φωτογραφία οπτικού μικροσκοπίου για $T_s = 200^\circ\text{C}$

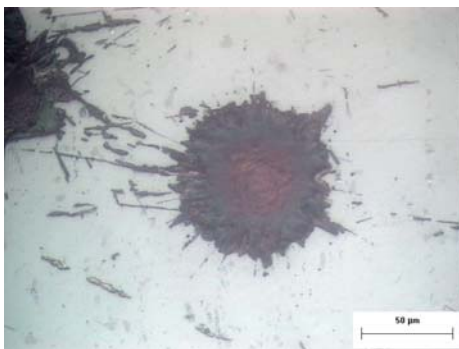
Στη συνέχεια στο **Σχήμα 46** παρουσιάζονται φωτογραφίες των splats για κάθε μια περίπτωση από τις τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες T_s . Χρησιμοποιώντας το οπτικό μικροσκόπιο μελετήθηκαν πάνω από 50 splats για κάθε περίπτωση.



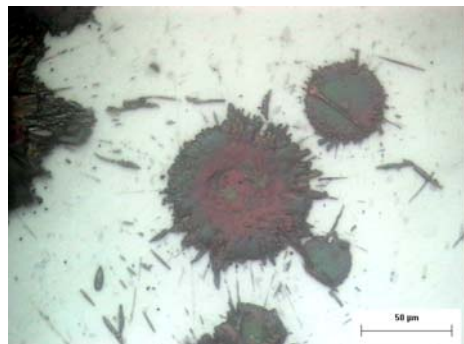
- α -



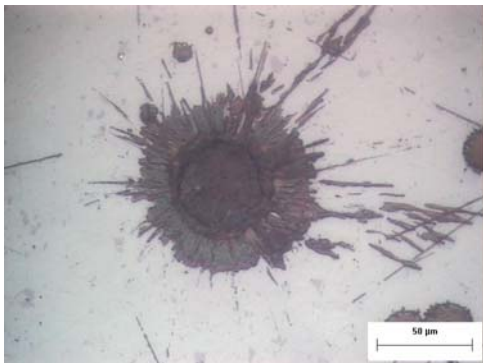
- β -



- γ -



- δ -



- ε -



- στ -

Σχήμα 46

Splats σε υποστρώματα με $R_a \approx 0.03 \mu m$

(α, β): $T_s = 200^\circ C$, (γ, δ): $T_s = 240^\circ C$, (ε, στ): $T_s = 270^\circ C$

Με χρήση του οπτικού μικροσκοπίου και του λογισμικού «Image Pro Plus» υπολογίστηκε ο δείκτης «Παράγοντας Σχήματος» (Shape Factor), για κάθε splat. Η σχέση υπολογισμού είναι η εξής:

$$S.F = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P^2}$$

όπου A η επιφάνεια του splat και P η περίμετρός του. Στο **Σχήμα 47** φαίνεται η χάραξη και η μέτρηση της περιμέτρου του splat όπως έγινε με χρήση του λογισμικού. Ο δείκτης αυτός είναι πάντα μικρότερος της μονάδας και όσο πιο κοντά στην μονάδα τόσο πιο κυκλικό είναι το σχήμα του splat.



Σχήμα 47

Σχηματική αναπαράσταση των στοιχείων του Shape Factor

Στη συνέχεια έγινε ο υπολογισμός της μέσης τιμής του $\overline{S.F}$ από το σύνολο των μεμονωμένων τιμών $S.F$ που προέκυψαν για κάθε splat.

$$\overline{S.F} = \frac{\sum_{i=1}^k (S.F)_i}{k}$$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ Π-5	
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ $\overline{S.F}$	
ΓΙΑ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ $R_a \approx 0.03\mu\text{m}$	
T_s (°C)	$\overline{S.F}$
200	0.85 ± 0.05
240	0.77 ± 0.05
270	0.70 ± 0.05

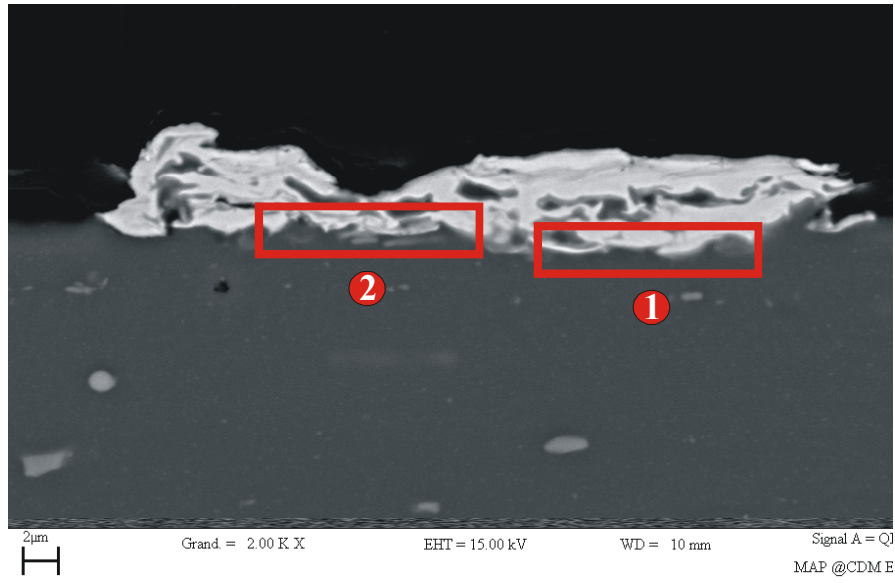
Από τα αποτελέσματα του πίνακα παρατηρείται ότι με αύξηση της θερμοκρασίας ο δείκτης Shape Factor μειώνεται. Αυτό το αποτέλεσμα αρχικά δεν μπορεί να θεωρηθεί σωστό, καθώς όπως έχει παρατηρηθεί η αύξηση της θερμοκρασίας υποστρώματος έχει σαν αποτέλεσμα τη βελτίωση της μορφολογίας των splats [14,35]. Όμως όπως θα φανεί στη συνέχεια, η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο χαμηλό σημείο τήξης του υποστρώματος.

B.3.2.2 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΤΟΜΗΣ ΤΩΝ SPLATS ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM)

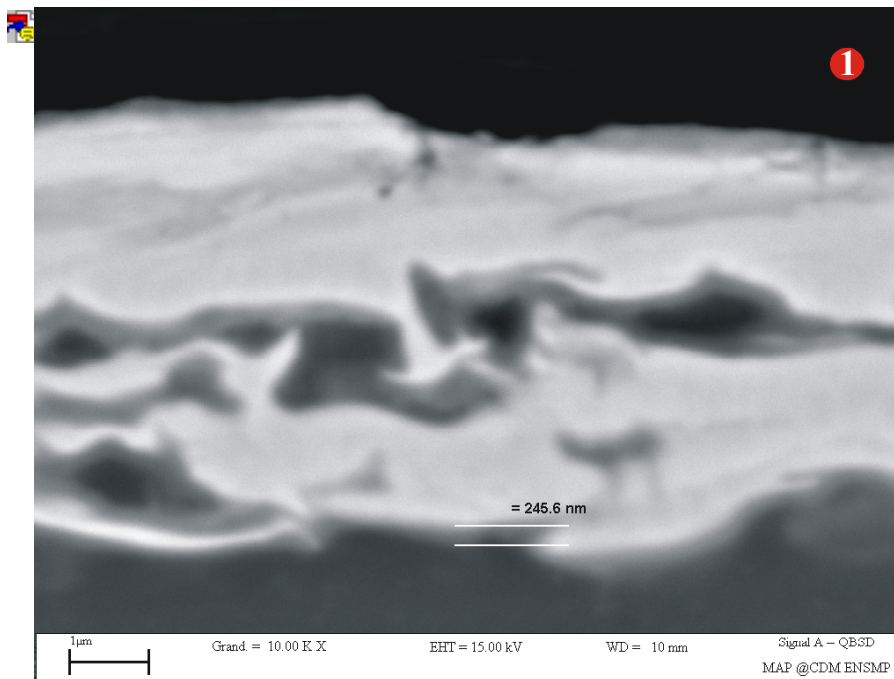
Η μελέτη των splats συνεχίζεται με την παρατήρησή τους στο SEM, προκειμένου αφενός να υπολογιστεί ο βαθμός διαπλάτυνσης και αφετέρου να μελετηθεί η ποιότητα επαφής splat-υποστρώματος. Από τη διεπιφάνεια splat-υποστρώματος θα είναι δυνατή και η επιβεβαίωση της υπόθεσης που έγινε πρωτότερα ότι υπάρχει μερική τήξη του υποστρώματος.

Αρχικά για την περίπτωση όπου η θερμοκρασία του υποστρώματος είναι $T_s = 200^\circ C$ (**Σχήμα 48α**) παρατηρείται ότι στη διεπιφάνεια splat-υποστρώματος δεν εμφανίζονται πόροι, οι οποίοι αποτελούν ένα από τα συνήθη «ελαττώματα» που παρουσιάζονται κατά τη διαπλάτυνση θερμικά ψεκαζομένων σταγονιδίων, ειδικά στην περίπτωση των λείων υποστρωμάτων. Όμως από το ίδιο σχήμα παρατηρείται ότι υπάρχει μερική τήξη του υποστρώματος, καθώς σε συγκεκριμένες περιοχές (κόκκινα πλαίσια 1 και 2) διακρίνεται η υποχώρηση του υποστρώματος και η δημιουργία κρατήρα εντός του οποίου έχει εισέλθει το τηγμένο σταγονίδιο. Η μερική τήξη του υποστρώματος είναι εμφανέστερη στο **Σχήμα 48β**, το οποίο αποτελεί μεγέθυνση της περιοχής του κόκκινου πλαισίου 1 του **Σχήματος 48α**. Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 48β** παρατηρείται ότι μεταξύ του στερεοποιημένου σωματιδίου (λευκού χρώματος) και του υποστρώματος (σκούρο γκρι χρώμα) υπάρχει μια λεπτή ζώνη (ανοιχτό γκρι χρώμα), η οποία αποτελεί και τη ζώνη της μερικής τήξης του υποστρώματος, εντός της οποίας υπάρχει ανάμιξη του υλικού του υποστρώματος και του υλικού του αρχικού τηγμένου σταγονιδίου. Με τη βοήθεια των εργαλείων μέτρησης του «Image Pro Plus» (σελ 63-64) υπολογίστηκε ότι το μέσο πάχος της ζώνης της μερικής τήξης του υποστρώματος στην περίπτωση όπου $T_s = 200^\circ C$ είναι 245.6 nm .

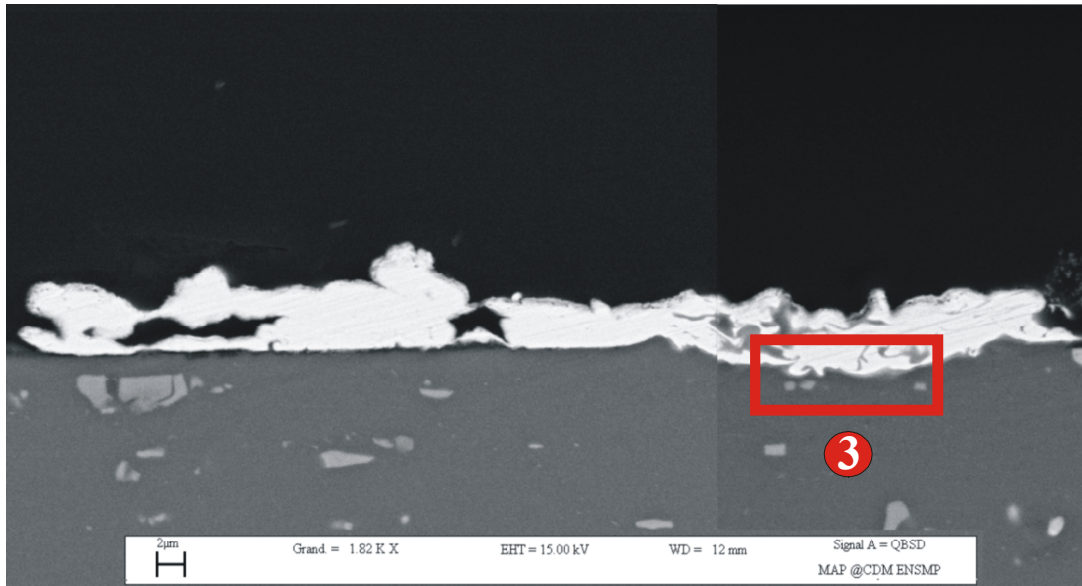
Μερική τήξη του υποστρώματος παρατηρήθηκε επίσης, όπως αναμενόταν, για $T_s = 240^\circ C$ και για $T_s = 270^\circ C$, όπως φαίνεται και στα **Σχήματα 49** και **50**, αντίστοιχα. Ομοίως και σε αυτές τις περιπτώσεις παρατηρείται η υποχώρηση του υποστρώματος, η δημιουργία κρατήρων και η εμφάνιση της ζώνης μερικής τήξης μεταξύ του στερεοποιημένου σωματιδίου και του υποστρώματος. Με τη βοήθεια του προγράμματος ανάλυσης εικόνας βρέθηκε ότι το μέσο πάχος της ζώνης μερικής τήξης ήταν 256.8 nm για $T_s = 240^\circ C$ και 334.9 nm για $T_s = 270^\circ C$. Παρατηρείται λοιπόν, ότι όσο αυξάνεται η T_s , αυξάνεται και η μερική τήξη του υποστρώματος και συνεπώς η μείωση του $\overline{S.F}$ που παρατηρήθηκε (**ΠΙΝΑΚΑΣ Π-5**) είναι φυσιολογική καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί [37] στην περίπτωση που υπάρχει μερική τήξη του υποστρώματος, η αύξηση της T_s έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή splats που έχουν τάση να εμφανίζουν εντονότερο διασκορπισμό.



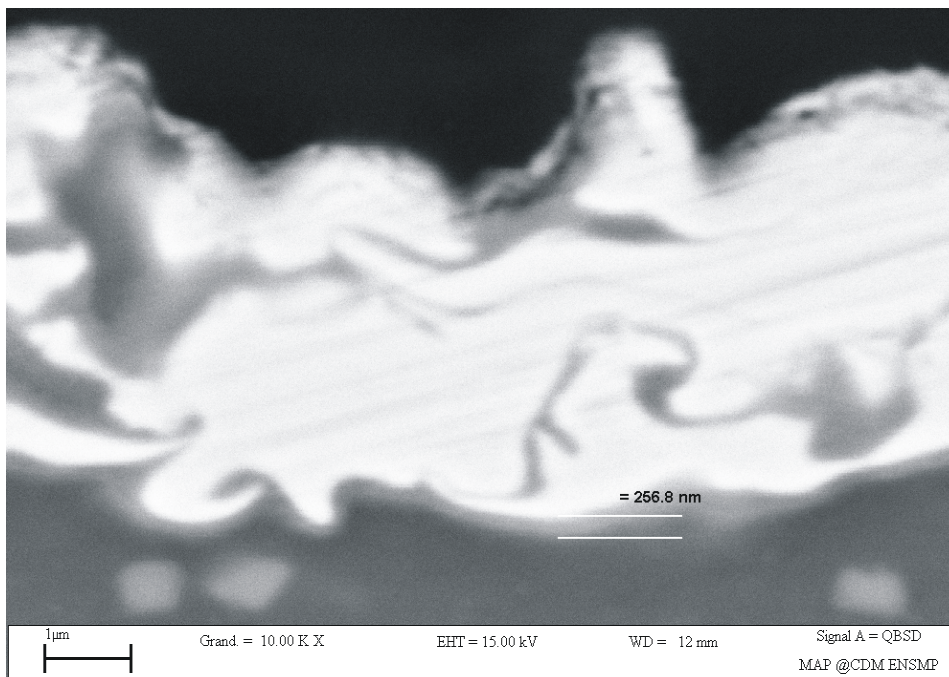
Σχήμα 48α
Φωτογραφία τομής από SEM για $T_S = 200^\circ C$



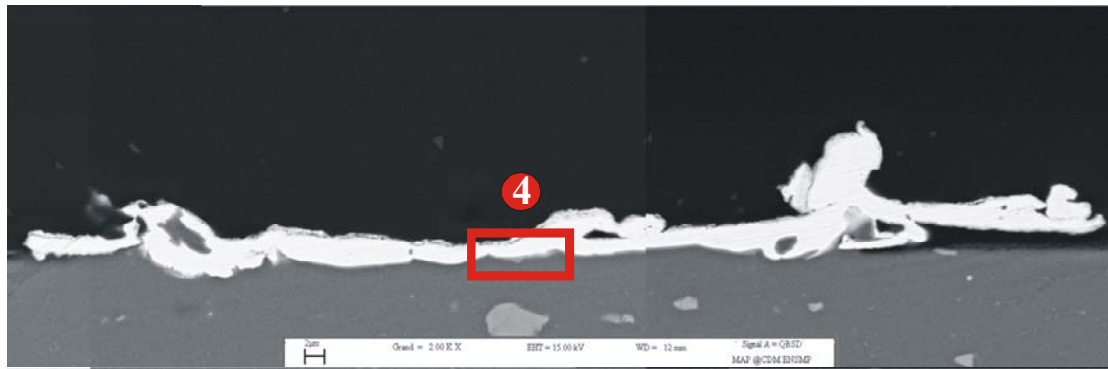
Σχήμα 48β
Μεγέθυνση της περιοχής του κόκκινου πλαισίου 1



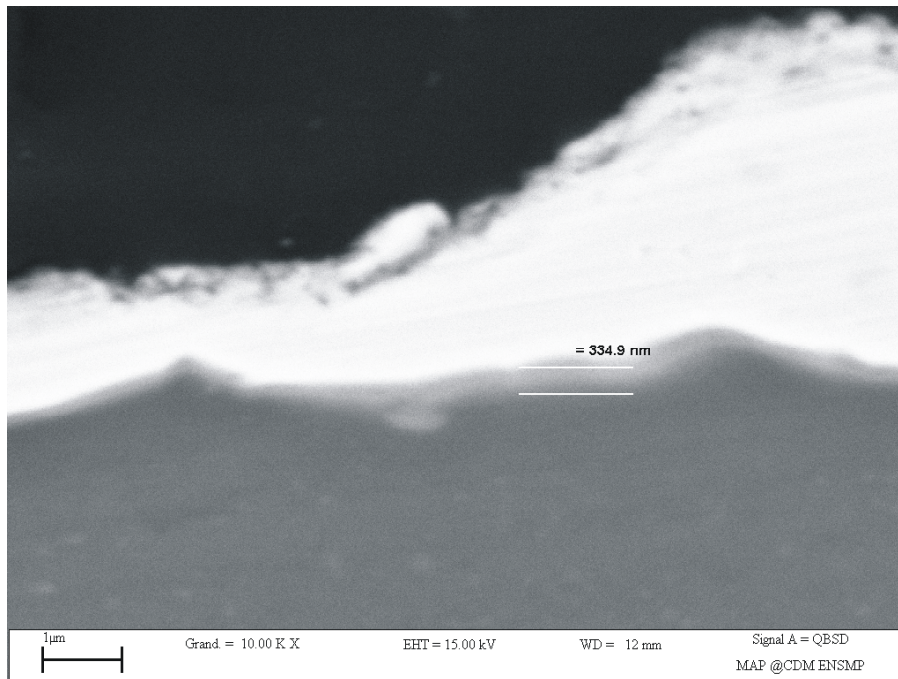
Σχήμα 49α
Φωτογραφία τομής από SEM για $T_s = 240^\circ C$



Σχήμα 49β
Μεγέθυνση της περιοχής του κόκκινου πλαισίου 3



Σχήμα 50α
Φωτογραφία τομής από SEM για $T_s = 270^\circ C$



Σχήμα 50β
Μεγέθυνση της περιοχής του κόκκινου πλαισίου 4

Με τη βοήθεια των φωτογραφιών των τομών των δοκιμίων γίνεται ο υπολογισμός του βαθμού διαπλάτυνσης ξ , ο οποίος δίνεται από τον γενικό τύπο:

$$\xi = \frac{R}{R_o}$$

όπου R_o η ακτίνα του τηγμένου σωματιδίου πριν την πρόσκρουση και R η ακτίνα μετά την πρόσκρουση στο υπόστρωμα.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε, για κάθε ένα splat, είναι η εξής. Αρχικά θεωρείται ότι μετά την πρόσκρουση και τη στερεοποίηση του τηγμένου σταγονιδίου, στο υπόστρωμα προκύπτει splat κυλινδρικού σχήματος, διαμέτρου d και ύψους b_m . Συνεπώς ο όγκος του splat υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_1 = \pi \cdot R^2 \cdot b_m = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot b_m}{4}$$

Από την εικόνα της τομής και με τη χρήση των εργαλείων μέτρησης του λογισμικού «Image Pro Plus» μετρήθηκε η διάμετρος, d , του splat καθώς και η τιμή του μέσου πάχους του, b_m και υπολογίστηκε ο όγκος V_1 .

Επίσης θεωρείται ότι το τηγμένο σωματίδιο, πριν προσκρούσει στο υπόστρωμα έχει σφαιρικό σχήμα, ακτίνας R_o , γεγονός που δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα όπως φάνηκε και από την παρατήρηση της μορφολογίας της αρχικής πούδρας (**Σχήμα 41**, σελ 68). Άρα ο όγκος του αρχικού τηγμένου σταγονιδίου δίνεται από τη σχέση:

$$V_2 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_o^3$$

Επίσης καθώς σε καμία περίπτωση δεν παρατηρήθηκε έντονος διασκορπισμός των splats, θεωρείται η αρχή διατήρησης της μάζας του τηγμένου σταγονιδίου οπότε ισχύει η εξίσωση :

$$V_1 = V_2$$

η οποία τελικά δίνει:

$$R_o = \left(\frac{3 \cdot d^2 \cdot b_m}{16} \right)^{1/3}$$

Τώρα μπορεί να υπολογιστεί ο βαθμός διαπλάτυνσης για το συγκεκριμένο splat και εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία σε όλα τα splat των δοκιμίων υπολογίζεται ο μέσος βαθμός διαπλάτυνσης (ξ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον **Πίνακα Π-6**.

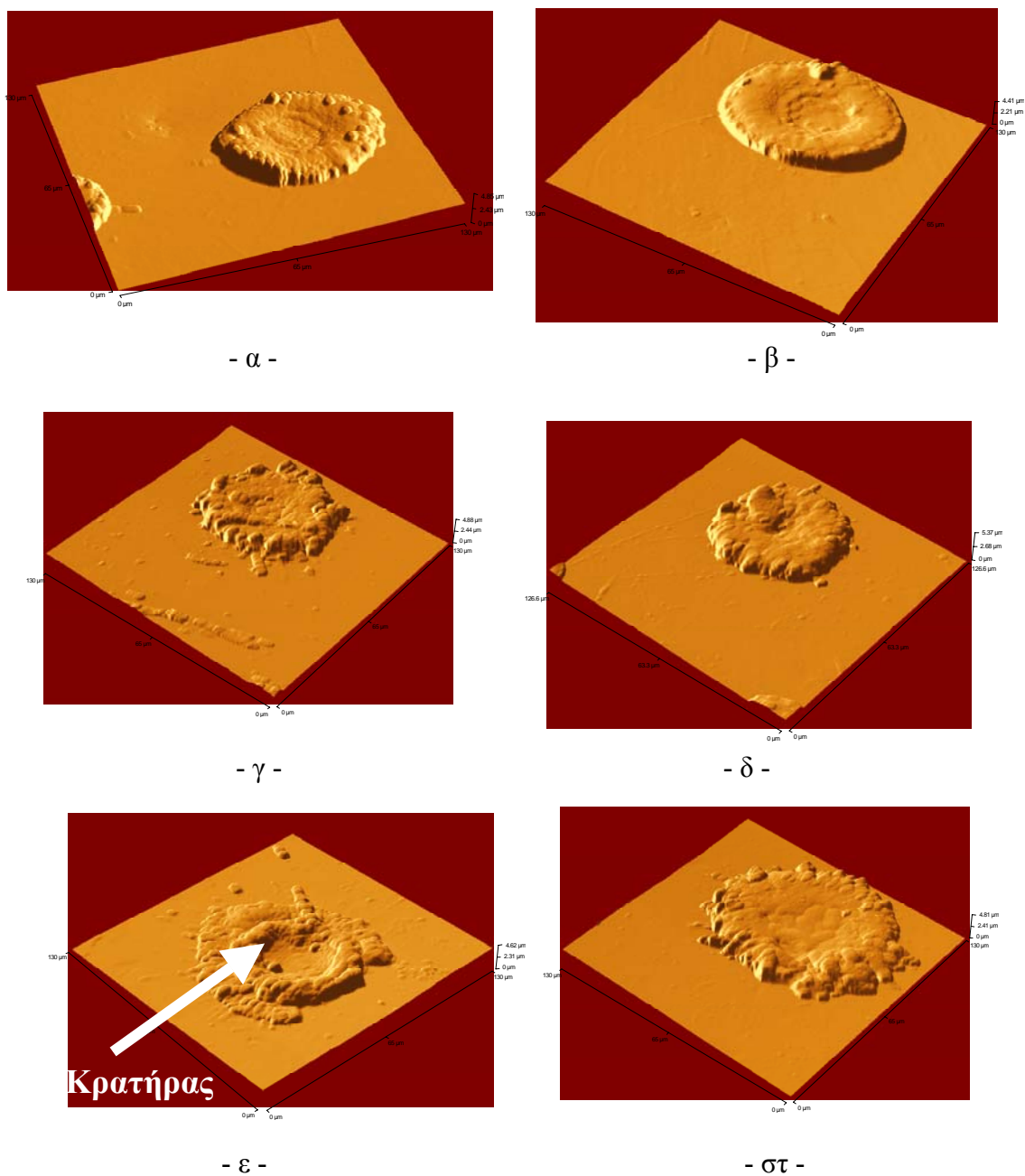
ΠΙΝΑΚΑΣ Π-6
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ (ξ) ΜΕ SEM
ΓΙΑ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ $Ra \approx 0.03\mu\text{m}$

T_s (°C)	(ξ)
200	2.2 ± 0.2
240	2.4 ± 0.2
270	2.6 ± 0.2

Παρατηρείται ότι με αύξηση της T_s , αυξάνεται και ο βαθμός διαπλάτνσης, συμπεριφορά που θεωρείται γενικότερα φυσιολογική. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του υποστρώματος μειώνεται η ροή θερμότητας από το σταγονίδιο που διαπλάτνεται προς το υπόστρωμα και συνεπώς το τηγμένο σταγονίδιο παραμένει σε κατάσταση τήξης για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα να έχει μεγαλύτερο χρόνο στη διάθεσή του προκειμένου να διαπλάτυνθεί.

B.3.2.3 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΩΝ SPLATS ΜΕ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ (AFM)

Τα splats μελετήθηκαν με AFM προκειμένου να υπολογιστεί ο βαθμός διαπλάτυνσής τους και να παρατηρηθεί η τρισδιάστατη μορφή τους. Επίσης με κατάλληλο λογισμικό επεξεργασίας φωτογραφιών AFM έγινε υπολογισμός του βαθμού διαπλάτυνσης προκειμένου να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που προέκυψαν με τη βοήθεια του «Image Pro Plus». Στο **Σχήμα 51** παρουσιάζονται χαρακτηριστικά δείγματα από στερεοποιημένα σωματίδια ανάλογα με τη θερμοκρασία του υποστρώματος.



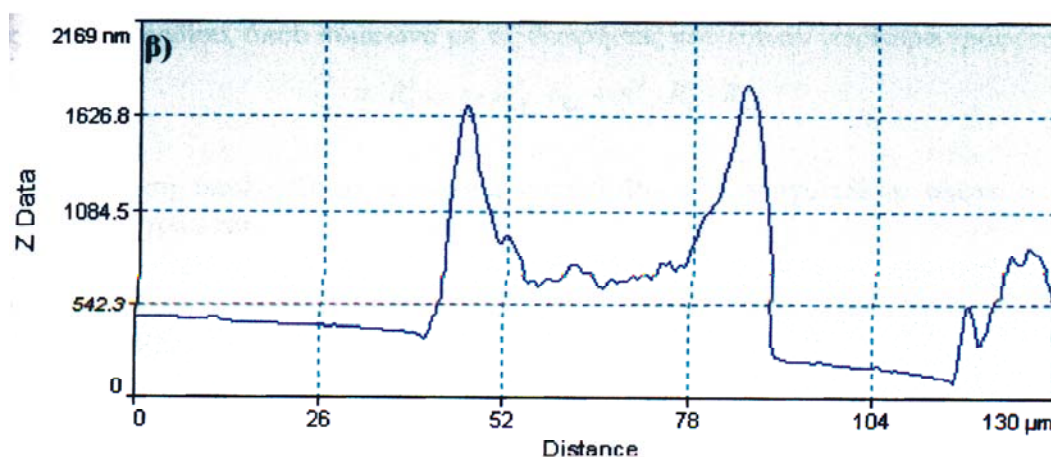
Σχήμα 51

Τρισδιάστατη απεικόνιση των splats με AFM

(α, β): $T_s = 200^\circ C$, (γ, δ): $T_s = 240^\circ C$, (ε, στ): $T_s = 270^\circ C$

Στο **Σχήμα 51ε** φαίνεται ότι στο κεντρικό τμήμα του splat έχει δημιουργηθεί ένας σχετικά μεγάλος κρατήρας, η δημιουργία του οποίου αποδίδεται στη μερική τήξη του υποστρώματος, που παρατηρήθηκε και από την τομή των σωματιδίων (**Σχήματα 48, 49, 50**, σελ 80-82). Σε αυτήν την περιοχή όπου το υπόστρωμα υποχωρεί λόγω μερικής τήξης υπάρχει ανάμιξη του υλικού του υποστρώματος με το υλικό της αρχικού σταγονιδίου

Για τον υπολογισμό του ξ θεωρείται ότι τόσο κατά τη διάρκεια της πτήσης των τηγμένων σωματιδίων όσο και κατά την πρόσκρουσή τους στο υπόστρωμα, δεν υπάρχει απώλεια μάζας. Επίσης, θεωρείται ότι το αρχικό σωματίδιο είναι σφαίρα με ακτίνα R_o , γεγονός που δεν απέχει από την πραγματικότητα, καθώς όπως ήδη παρουσιάστηκε στο **Σχήμα 41** τα αρχικά σωματίδια έχουν σφαιρικό σχήμα. Παρατηρείται ότι τα splats αποτελούνται από μια κεντρική περιοχή και από ένα εξωτερικό δακτύλιο. Η τελευταία αυτή διαπίστωση επιβεβαιώνεται και από το **Σχήμα 52**, το οποίο παρουσιάζει το προφίλ ενός splat, όπως αυτό αποτυπώθηκε με το λογισμικό του AFM.



Σχήμα 52

Προφίλ splat κατά μήκος της μπλε γραμμής

Θεωρείται ότι το τελικό splat αποτελείται από έναν κεντρικό δίσκο, τελικού πάχους b_{sd} και τελικής ακτίνας R_{sd} και από μια στεφάνη τελικής ακτίνας R_{sr} και τελικού πάχους b_{sr} , όπως φαίνεται στο **Σχήμα 53**.

Για τον υπολογισμό του βαθμού διαπλάτυνσης χρησιμοποιείται η αρχή διατήρησης της μάζας του σταγονιδίου, όπου σύμφωνα με τις θεωρήσεις που έγιναν νωρίτερα γράφεται:

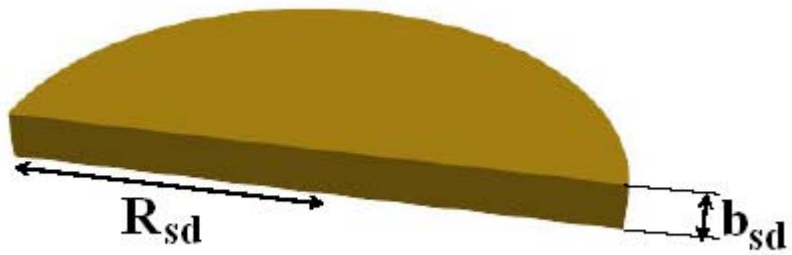
$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_o^3 = \pi \cdot R_{sd}^2 \cdot b_{sd} + \pi \cdot R_{sr}^2 \cdot b_{sr}$$

Από την εξίσωση υπολογίζεται η αρχική ακτίνα R_o του σταγονιδίου, οπότε ο βαθμός διαπλάτυνσης, ξ , δίνεται από τη σχέση:

$$\xi = \frac{R_s}{R_o}$$

όπου $R_s = R_{sd} + 2 \cdot R_{sr}$

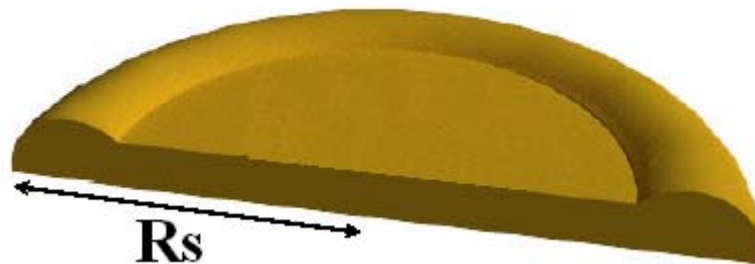
(α)



(β)



(γ)



Σχήμα 53

- α) Το κεντρικό δισκίο του splat
- β) Η εξωτερική στεφάνη του splat
- γ) Το πλήρες σχήμα του splat

Με βάση λοιπόν τις μετρήσεις από το AFM υπολογίστηκε ο μέσος βαθμός διαπλάτυνσης για τις τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες του υποστρώματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον **Πίνακα Π-7**.

ΠΙΝΑΚΑΣ Π-7
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ (ξ) ΜΕ AFM
ΓΙΑ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ $R_a \approx 0.03\mu\text{m}$

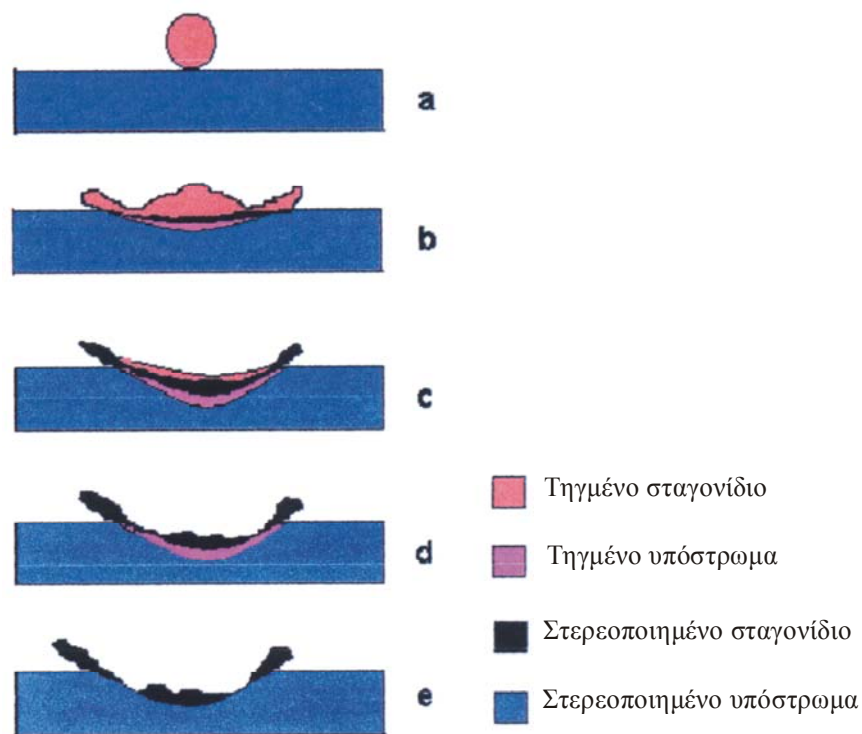
T_s (°C)	(ξ)
200	3.0 ± 0.2
240	3.2 ± 0.2
270	2.9 ± 0.2

Από τον Πίνακα Π-7 παρατηρείται ότι όταν η T_s αυξάνεται από 200°C σε 240°C , υπάρχει αύξηση του βαθμού διαπλάτυνσης (ξ). Αυτή η συμπεριφορά θεωρείται, γενικότερα, φυσιολογική καθώς το σταγονίδιο παραμένει σε κατάσταση τήξης για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και επομένως διαπλατώνεται περισσότερο, όπως έχει εξηγηθεί και νωρίτερα. Όταν όμως η θερμοκρασία του υποστρώματος αυξάνεται ακόμη περισσότερο και φθάνει στους 270°C παρατηρείται ότι ο βαθμός διαπλάτυνσης μειώνεται. Αυτό οφείλεται στη μερική τήξη του υποστρώματος που όπως φάνηκε από το Σχήμα 50 (σελ 82) είναι εντονότερη για $T_s=270^\circ\text{C}$, καθώς στην προκειμένη περίπτωση το μέσο πάχος την ζώνης μερικής τήξης ήταν 334.9 nm , το οποίο ήταν μεγαλύτερο σε σύγκριση με τα αντίστοιχα πάχη στις δυο χαμηλότερες θερμοκρασίες προθέρμανσης του υποστρώματος. Έχει αποδειχθεί [36] ότι στην περίπτωση όπου υπάρχει μερική τήξη του υποστρώματος, η στερεοποίηση του splat δεν ξεκινά από τη διεπιφάνεια splat-υποστρώματος, όπως συμβαίνει στην περίπτωση όπου το υπόστρωμα δεν παρουσιάζει τήξη, αλλά από το μέσο του splat (Σχήμα 54c) και με αρχική κατεύθυνση την ελεύθερη επιφάνεια του σταγονιδίου (Σχήμα 54d) ενώ τελευταίο στερεοποιείται το τμήμα του splat που βρίσκεται σε επαφή με το υπόστρωμα (Σχήμα 54e). Οπότε, στην περίπτωση της υψηλότερης θερμοκρασίας υποστρώματος επειδή υπάρχει εντονότερη τήξη του υποστρώματος, η ποσότητα του τηγμένου σταγονιδίου που εισέρχεται εντός του δημιουργούμενου κρατήρα είναι μεγαλύτερη. Όμως η ακίδα του μικροσκοπίου ατομικής δύναμης δεν μπορεί να «αντιληφθεί» το πραγματικό πάχος του splat. Συγκεκριμένα, αφού το splat έχει στερεοποιηθεί και γίνεται η μέτρηση με το μικροσκόπιο ατομικής δύναμης, η ακίδα του τοποθετείται λίγο πριν τα όρια του στερεοποιημένου σταγονιδίου προκειμένου να σαρώσει ολόκληρη την επιφάνεια του και να ληφθεί η τρισδιάστατη απεικόνισή του. Η ακίδα (διαμέσου του λογισμικού του AFM) λαμβάνει ως σημείο αναφοράς, δηλαδή το μηδέν, το αρχικό σημείο του υποστρώματος με το οποίο έρχεται σε επαφή και το οποίο δεν εμφανίζει μερική τήξη. Όταν λοιπόν, η ακίδα εισέρχεται στην περιοχή όπου υπάρχει μερική τήξη, ακριβώς επειδή η ακίδα κατεβαίνει κάτω από το σημείο που έχει θεωρήσει ως μηδέν δεν μπορεί να αντιληφθεί το πραγματικό πάχος του splat. Ακριβώς για αυτό το λόγο υπάρχει απόκλιση (ΠΙΝΑΚΑΣ Π-8) μεταξύ του βαθμού διαπλάτυνσης που υπολογίζεται από την τομή του splat που παρατηρήθηκε με SEM και από την τρισδιάστατη απεικόνιση του AFM και για θερμοκρασίες $T_s=200^\circ\text{C}$ και $T_s=240^\circ\text{C}$.

ΠΙΝΑΚΑΣ Π-8
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ (ξ) ΑΠΟ SEM ΚΑΙ AFM

T_s (°C)	(ξ) από SEM	(ξ) από AFM	Απόκλιση (%)
200	2.2 ± 0.2	3.0 ± 0.2	26.6
240	2.4 ± 0.2	3.2 ± 0.2	25.0
270	2.6 ± 0.2	2.9 ± 0.2	10.4

Στην περίπτωση λοιπόν όπου υπάρχει μερική τήξη του υποστρώματος οι μετρήσεις που προκύπτουν από το μικροσκόπιο ατομικής δύναμης δεν μπορούν να θεωρηθούν απολύτως σωστές. Θα πρέπει λοιπόν σε αυτήν την περίπτωση ο βαθμός διαπλάτυνσης να υπολογίζεται με βάση την παρατήρηση της τομής του splat με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης όπου διακρίνεται το πραγματικό πάχος του splat, και το AFM να χρησιμοποιείται για την τρισδιάστατη απεικόνιση του splat.



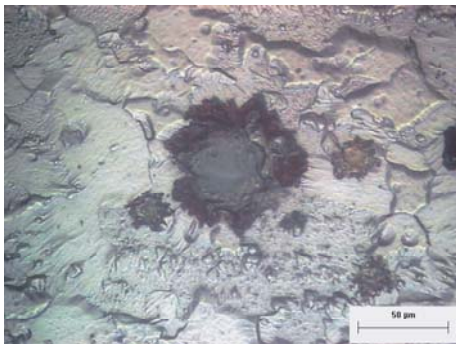
Σχήμα 54

Μηχανισμός στερεοποίησης με μερική τήξη του υποστρώματος

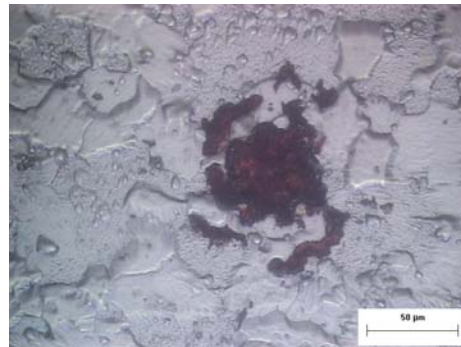
B.3.3 ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΜΕ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ $R_a \approx 0.5 \mu m$

B.3.3.1 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΩΝ SPLATS ΜΕ ΟΠΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ

Η παρατήρηση με οπτικό μικροσκόπιο έδειξε ότι τα splats ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία του υποστρώματος είχαν κυκλικό σχήμα με μικρές προεκτάσεις στην περιφέρειά τους. Σε σύγκριση με τα splats σε υποστρώματα με $R_a \gg 0.03mm$, για τις αντίστοιχες T_s , τα συγκεκριμένα splat παρουσιάζονται περισσότερο διασκορπισμένα. Επίσης παρατηρήθηκε ότι δεν υπήρχαν διαφοροποιήσεις στο σχήμα τους ανάλογα με το μέγεθός τους. Χρησιμοποιώντας το οπτικό μικροσκόπιο μελετήθηκαν πάνω από 50 splats για κάθε περίπτωση.



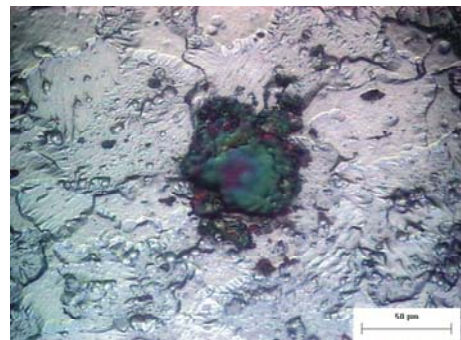
- α -



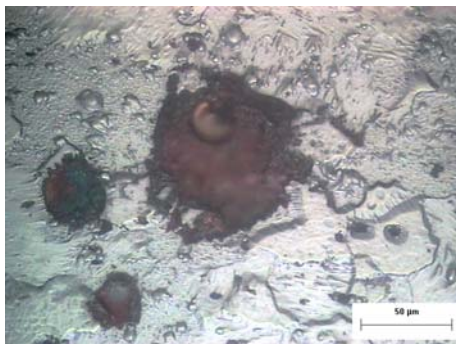
- β -



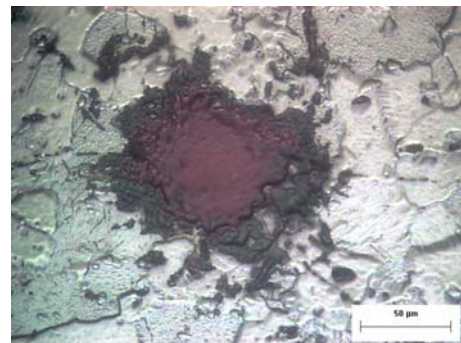
- γ -



- δ -



- ε -



- στ -

Σχήμα 55

Splats σε υποστρώματα με $R_a \approx 0.5 \mu m$

(α, β): $T_s = 200^\circ C$, (γ, δ): $T_s = 240^\circ C$, (ε, στ): $T_s = 270^\circ C$

Με χρήση του οπτικού μικροσκοπίου και του λογισμικού «Image Pro Plus» υπολογίστηκε ο δείκτης «Παράγοντας Σχήματος» (Shape Factor), για κάθε splat. Στη συνέχεια έγινε ο υπολογισμός της μέσης τιμής του $\overline{S.F}$ από το σύνολο των μεμονωμένων τιμών S.F που προέκυψαν για κάθε splat. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

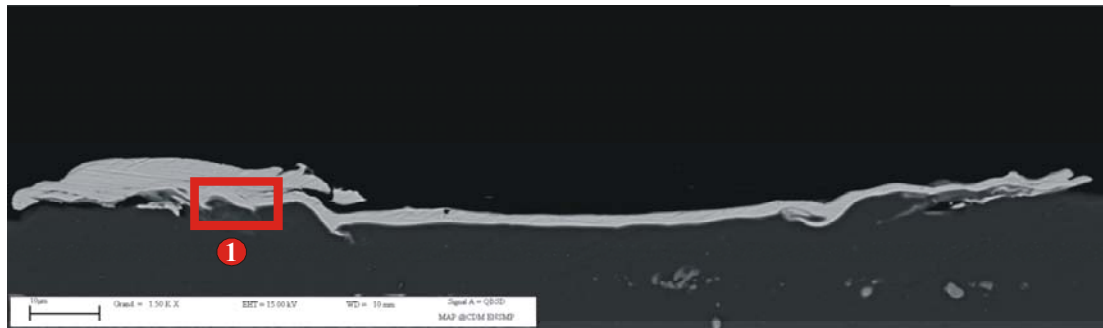
ΠΙΝΑΚΑΣ Π-9 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ $\overline{S.F}$ ΓΙΑ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ $R_a \approx 0.5\mu m$	
T_s (°C)	$\overline{S.F}$
200	0.52 ± 0.05
240	0.42 ± 0.05
270	0.46 ± 0.05

Παρατηρείται, επίσης ότι οι τιμές του S.F σε υποστρώματα με $R_a \approx 0.5\mu m$ είναι μικρότερες από αυτές σε υποστρώματα με $R_a \approx 0.03\mu m$, για τις αντίστοιχες θερμοκρασίες. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη μεγαλύτερη τραχύτητα του υποστρώματος που προκαλεί διασκορπισμό των splat, με αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή S.F.

B.3.3.2 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΤΟΜΗΣ ΤΩΝ SPLATS ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM)

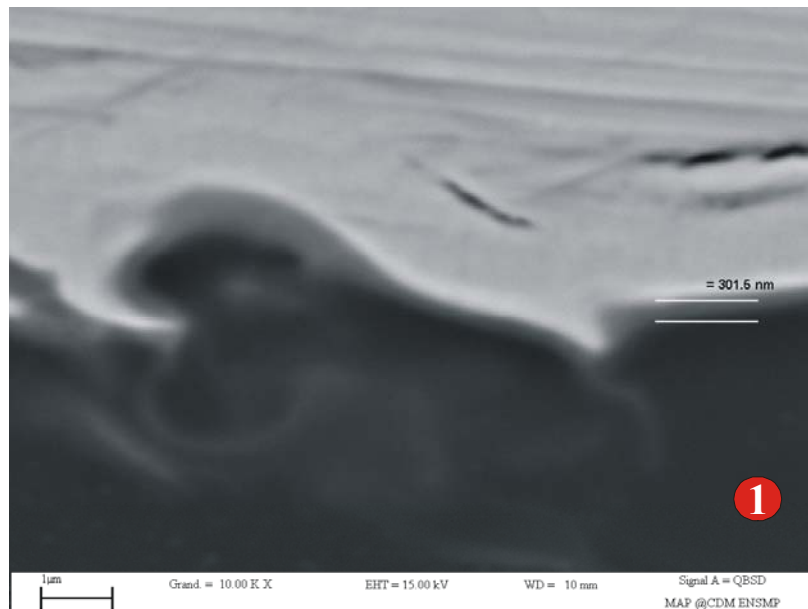
Η μελέτη των splats συνεχίζεται με την παρατήρησή της τομής τους στο SEM, προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός του βαθμού διαπλάτυνσης και να μελετηθεί η διεπιφάνεια splat-υποστρώματος.

Από τα Σχήματα 56, 57, 58 παρατηρείται ότι για όλες τις T_s υπάρχει υποχώρηση του υποστρώματος λόγω της μερικής τήξης του, όπως ακριβώς είχε παρατηρηθεί και στην περίπτωση των λείων υποστρωμάτων (Σχήματα 48, 49, 50, σελ 80-82). Από το Σχήμα 56β παρατηρείται ότι μεταξύ splat και υποστρώματος υπάρχει μια ζώνη (ανοιχτό γκρι χρώμα), η οποία αποτελεί τη ζώνη μερικής τήξης του υποστρώματος με μέσο πάχος 301.5 nm . Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του υποστρώματος αυξάνει και το μέσο πάχος της ζώνης μερικής τήξης του υποστρώματος και για $T_s = 240^\circ \text{C}$ είναι 368.4 nm ενώ για $T_s = 270^\circ \text{C}$ είναι 401.9 nm .



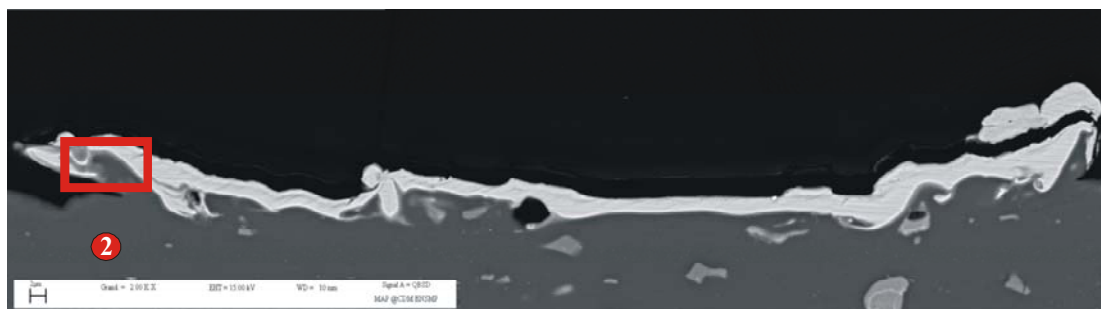
Σχήμα 56α

Φωτογραφία τομής από SEM για $T_s = 200^\circ \text{C}$

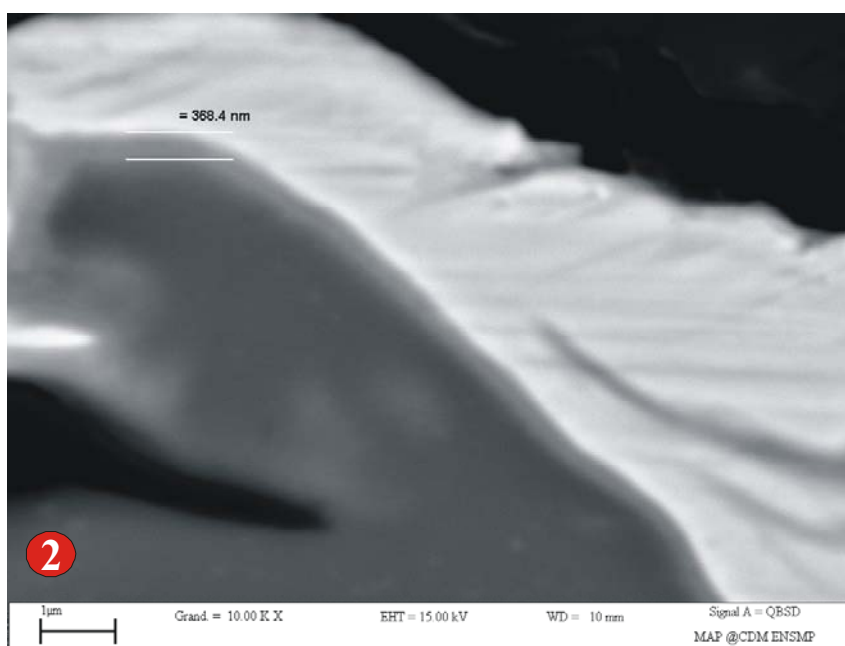


Σχήμα 56β

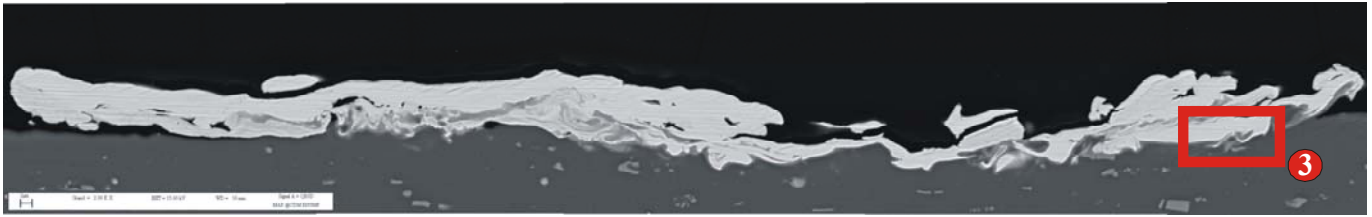
Μεγέθυνση της περιοχής του κόκκινου πλαισίου 1



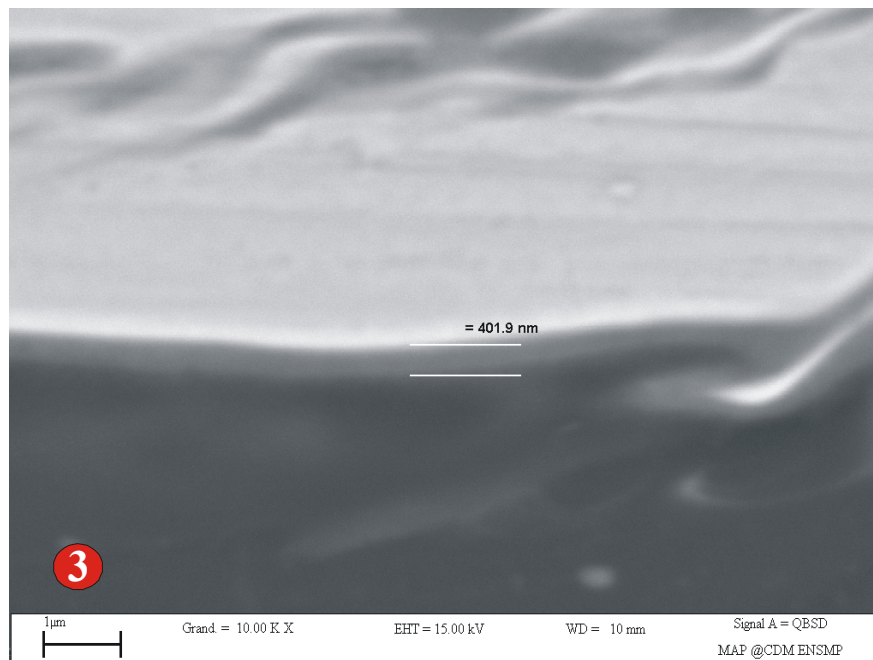
Σχήμα 57α
Φωτογραφία τομής από SEM $T_S = 240^\circ C$



Σχήμα 57β
Μεγέθυνση της περιοχής του κόκκινου πλαισίου 2



Σχήμα 58α
 Φωτογραφία τομής SEM για $T_s = 270^\circ C$



Σχήμα 58β
 Μεγέθυνση της περιοχής του κόκκινου πλαισίου 3

Θεωρώντας και πάλι την αρχή διατήρησης της μάζας του σταγονιδίου και με τη βοήθεια των φωτογραφιών των τομών από τα δοκίμια γίνεται ο υπολογισμός του βαθμού διαπλάτυνσης (ξ), ο οποίος δίνεται από τον γενικό τύπο:

$$\xi = \frac{R}{R_0}$$

όπου R_o η ακτίνα του τηγμένου σωματιδίου πριν την πρόσκρουση και R η ακτίνα μετά την πρόσκρουση στο υποστρώμα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω **Πίνακα Π-10**

Για $T_s = 270^\circ C$ παρατηρείται ότι ο βαθμός διαπλάτυνσης, (ξ), μειώνεται και παίρνει τιμή (2.1 ± 0.2). Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να αποδοθεί στην έντονη τήξη του υποστρώματος, φαινόμενο που από ένα σημείο και μετά υπερκαλύπτει τις επιδράσεις των άλλων φαινομένων

ΠΙΝΑΚΑΣ Π-10 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ (ξ) ΜΕ SEM ΓΙΑ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ $R_a \approx 0.5\mu m$	
T_s ($^\circ C$)	(ξ)
200	2.0 ± 0.2
240	2.2 ± 0.2
270	2.1 ± 0.2

Παρατηρείται λοιπόν, ότι όπως και στη λεία επιφάνεια (**ΠΙΝΑΚΑΣ Π-6**, σελ. 84), κατά όμοιο τρόπο και στην τραχεία επιφάνεια, η αύξηση της θερμοκρασίας υποστρώματος από $200^\circ C$ σε $240^\circ C$ έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του βαθμού διαπλάτυνσης λόγω του μεγαλύτερου χρόνου που απαιτείται για τη στερεοποίηση των τηγμένων σταγονιδίων. Όμως στην προκειμένη περίπτωση κατά την αύξηση της θερμοκρασία υποστρώματος από τους $240^\circ C$ στους $270^\circ C$ ο βαθμός διαπλάτυνσης, μειώνεται. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στην ταυτόχρονη επίδραση της τραχύτητας του υποστρώματος που θέτει εμπόδια στη ροή του τηγμένου σωματιδίου και στη μερική τήξη του υποστρώματος.

Από τη σύγκριση του βαθμού διαπλάτυνσης μεταξύ των λείων υποστρωμάτων ($R_a \approx 0.03\mu m$, **ΠΙΝΑΚΑΣ Π-6**) και των υποστρωμάτων με αυξημένη τραχύτητα ($R_a \approx 0.5\mu m$, **ΠΙΝΑΚΑΣ Π-10**), παρατηρείται ότι για όλες τις T_s , ο βαθμός διαπλάτυνσης (ξ) μειώνεται με την αύξηση της τραχύτητας και αυτό οφείλεται στα «εμπόδια» που θέτει η αυξημένη τραχύτητα στη διαπλάτυνση του τηγμένου σταγονιδίου.

B.4 ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την πειραματική έρευνα που παρουσιάστηκε για τη διαπλάτυνση τηγμένων σταγονιδίων κατά το σχηματισμό επιστρωμάτων με τεχνική ψεκασμού πλάσματος, υπό συνθήκες που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανική κλίμακα, μελετώντας την ταυτόχρονη επίδραση της θερμοκρασίας και της επιφανειακής τραχύτητας του υποστρώματος, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

1. Σε υποστρώματα με $R_a \approx 0.03\mu m$ τα splats, ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία του υποστρώματος, είχαν κυκλικό σχήμα με μικρές προεκτάσεις στην περιφέρειά τους και δεν υπήρχαν διαφοροποιήσεις στο σχήμα τους ανάλογα με το μέγεθός τους. Από την άλλη πλευρά για $R_a \approx 0.5\mu m$ τα splats παρουσιάζονται περισσότερο διασκορπισμένα, αλλά σε καμία περίπτωση δεν παρουσιάζεται έντονος διασκορπισμός.
2. Σχετικά με τον «Παράγοντα Σχήματος» (Πίνακας Π-11), που υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας οπτικό μικροσκόπιο εφοδιασμένο με το «Image Pro Plus», παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας υποστρώματος έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται ο «Παράγοντας Σχήματος», τόσο στην περίπτωση όπου $R_a \approx 0.03\mu m$ όσο και για $R_a \approx 0.5\mu m$, κάτι το οποίο σημαίνει ότι σταδιακά τα splats χάνουν την κυκλικότητά τους. Μια τέτοια συμπεριφορά αποδίδεται στη μερική τήξη του υποστρώματος. Επιπλέον, για σταθερή T_s παρατηρήθηκε ότι και με αύξηση της επιφανειακής τραχύτητας του υποστρώματος ο S.F μειώνεται. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η αύξηση της επιφανειακής τραχύτητας προκαλεί μεγαλύτερο διασκορπισμό των splat, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο S.F.

ΠΙΝΑΚΑΣ Π-11 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ S.F ΓΙΑ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ $R_a \approx 0.03\mu m$ ΚΑΙ $R_a \approx 0.5\mu m$		
	$R_a \approx 0.03\mu m$	$R_a \approx 0.5\mu m$
T_s (°C)	S.F	S.F
200	0.85 ± 0.05	0.52 ± 0.05
240	0.77 ± 0.05	0.46 ± 0.05
270	0.70 ± 0.05	0.42 ± 0.05

3. Όσον αφορά στη μελέτη της τομής των splat με SEM, παρατηρήθηκε ότι τόσο σε λεία υποστρώματα $R_a \approx 0.03\mu m$ όσο και σε υποστρώματα με αυξημένη τραχύτητα $R_a \approx 0.5\mu m$ τα splats έχουν διαπλατυνθεί ομοιόμορφα, η επαφή τους με το υπόστρωμα είναι αρκετά καλή και δεν εμφανίζονται πόροι στη διεπιφάνειά τους. Επίσης, όσο αυξάνεται η T_s , αυξάνεται και η μερική τήξη του υποστρώματος με αποτέλεσμα τη μείωση του $\overline{S.F}$ (ΠΙΝΑΚΑΣ Π-11). Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι στην περίπτωση των λείων υποστρωμάτων ο βαθμός διαπλάτυνσης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας υποστρώματος (ΠΙΝΑΚΑΣ Π-12), γεγονός που αποδίδεται στη μείωση της ροής θερμότητας από το splat προς το υπόστρωμα και συνεπώς στο μεγαλύτερο χρόνο διαπλάτυνσης των splats. Στην περίπτωση των υποστρωμάτων με $R_a \approx 0.5\mu m$ ο βαθμός διαπλάτυνσης αυξάνεται καθώς αυξάνεται η T_s από $200^\circ C$ σε $240^\circ C$, συμπεριφορά που θεωρείται φυσιολογική καθώς το σταγονίδιο παραμένει σε κατάσταση τήξης για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και επομένως διαπλάτυνεται περισσότερο. Στην περίπτωση $R_a \approx 0.5\mu m$ και όταν η T_s αυξάνεται από $240^\circ C$ σε $270^\circ C$ παρατηρήθηκε ότι ο βαθμός διαπλάτυνσης μειώνεται και δεν αυξάνεται όπως θα αναμενόταν, γεγονός που οφείλεται στην ταυτόχρονη επίδραση των «εμποδίων» που θέτει η τραχιά επιφάνεια στη διαπλάτυνση του τηγμένου σταγονιδίου καθώς και στην τήξη του υποστρώματος. Επίσης παρατηρείται ότι για την ίδια T_s μεταξύ του υποστρώματος με $R_a \approx 0.03\mu m$ και $R_a \approx 0.5\mu m$, σε κάθε περίπτωση, ο βαθμός διαπλάτυνσης μειώνεται με την αύξηση της τραχύτητας και αυτό οφείλεται στα «εμπόδια» που θέτει η αυξημένη τραχύτητα στη διαπλάτυνση του τηγμένου σταγονιδίου.

ΠΙΝΑΚΑΣ Π-12
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ (ξ) ΑΠΟ SEM
ΓΙΑ $R_a \approx 0.03\mu m$ ΚΑΙ ΓΙΑ $R_a \approx 0.5\mu m$

	$R_a \approx 0.03\mu m$	$R_a \approx 0.5\mu m$
T_s ($^\circ C$)	(ξ)	(ξ)
200	2.2 ± 0.2	2.0 ± 0.2
240	2.4 ± 0.2	2.2 ± 0.2
270	2.6 ± 0.2	2.1 ± 0.2

4. Η μελέτη με AFM έδειξε ότι η αύξηση της T_s από 200°C σε 240°C οδηγεί σε αύξηση του βαθμού διαπλάτυνσης. Αυτή η συμπεριφορά θεωρείται, γενικότερα, φυσιολογική καθώς το σταγονίδιο παραμένει σε κατάσταση τήξης για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και επομένως διαπλατύνεται περισσότερο. Όμως, στην προκειμένη περίπτωση υπάρχει και η μερική τήξη του υποστρώματος, που όπως φάνηκε από τα **Σχήματα 50, 51ε** είναι εντονότερη για $T_s=270^{\circ}\text{C}$. Έχει αποδειχθεί [36] ότι στην περίπτωση που το υπόστρωμα τήκεται σε μεγάλο βαθμό, η στερεοποίηση του splat δεν ξεκινά από τη διεπιφάνεια splat – υποστρώματος αλλά από τη διεπιφάνεια splat – αέρα (**Σχήμα 59**). Σε αυτό ακριβώς το φαινόμενο αποδίδεται η μείωση που παρατηρείται στο βαθμό διαπλάτυνσης καθώς η T_s αυξάνει από 240°C σε 270°C . Επίσης, παρατηρείται απόκλιση ανάμεσα στις τιμές του (ξ), όπως αυτές υπολογίστηκαν από AFM και από SEM (με βοήθεια του «Image Pro Plus») καθώς η ακίδα του μικροσκοπίου ατομικής δύναμης δεν μπορεί να «αντιληφθεί» το πραγματικό πάχος του splat. Στην περίπτωση λοιπόν όπου υπάρχει μερική τήξη του υποστρώματος οι μετρήσεις που προκύπτουν από το μικροσκόπιο ατομικής δύναμης δεν μπορούν να θεωρηθούν απολύτως σωστές. Θα πρέπει λοιπόν σε αυτήν την περίπτωση ο βαθμός διαπλάτυνσης να υπολογίζεται με βάση την παρατήρηση της τομής του splat με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης όπου διακρίνεται το πραγματικό πάχος του splat, και το AFM να χρησιμοποιείται για την τρισδιάστατη απεικόνιση του splat.

ΠΙΝΑΚΑΣ Π-13
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ (ξ)
ΑΠΟ SEM ΚΑΙ ΑΠΟ AFM
ΓΙΑ $R_a \approx 0.03\mu\text{m}$

	SEM	AFM
T_s ($^{\circ}\text{C}$)	(ξ)	(ξ)
200	2.2 ± 0.2	3.0 ± 0.2
240	2.4 ± 0.2	3.2 ± 0.2
270	2.6 ± 0.2	2.9 ± 0.2

B.5 ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Το λογισμικό «Image Pro Plus» συνέβαλε στην παρατήρηση των δισδιάστατων εικόνων των splats, τόσο αυτών που η λήψη τους έγινε με τη διάταξη H/Y – κάμερα – οπτικό μικροσκόπιο όσο και των εικόνων από SEM, και στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τη μορφολογία και τη διαπλάτυνσή τους. Με το «Image Pro Plus» ήταν εφικτό να μετρηθούν δυο πολύ σημαντικοί παράγοντες για το χαρακτηρισμό των splats, ο «Παράγοντας Σχήματος» (S.F) και ο βαθμός διαπλάτυνσης (ξ). Αρχικά από την επιφάνεια των splats υπολογίστηκε ο Παράγοντας Σχήματος, ο οποίος αποτελεί το μέτρο της κυκλικότητάς τους. Η παραγωγή κυκλικών splats έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή επιστρωμάτων με βελτιωμένες ιδιότητες. Επίσης, με τη χρήση του εν λόγω λογισμικού σε τομή των splats, υπολογίστηκε ο βαθμός διαπλάτυνσης των σταγονιδίων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όπου υπήρξε τήξη του υποστρώματος, το «Image Pro Plus» φάνηκε να πλεονεκτεί στον υπολογισμό του βαθμού διαπλάτυνσης σε σύγκριση με τον υπολογισμό που πραγματοποιήθηκε με το AFM, το οποίο δεν μπορούσε να αντιληφθεί την υποχώρηση του υποστρώματος. Ωστόσο, μειονέκτημα αποτελεί η απουσία δυνατότητας απεικόνισης της τρισδιάστατης εικόνας του splat, η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη μελέτη του φαινομένου της στερεοποίησης. Σε κάθε περίπτωση, λοιπόν, για την εξαγωγή πλήρων και ασφαλών συμπερασμάτων σε τέτοιου είδους μελέτες είναι απαραίτητη η συνδυασμένη χρήση, τόσο του «Image Pro Plus» όσο και του AFM για την ολοκληρωμένη μελέτη της διαπλάτυνσης των τηγμένων σωματιδίων.

Γ. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. R. C. Dykhuizen, "Review of Impact and Solidification of Molten Thermal Spray Droplets", *Journal of Thermal Spray Technology*, 3(4), 1994, p.351-361.
2. N. Z. Mehdizadeh, S. Chandra, and J. Mostaghimi, "Effect of Substrate Temperature and Roughness on Coating Formation", *Tagungsband Conference Proceedings*, (Ed) Erich Lugscheider, Essen 2002, *Proceedings of the International Thermal Spray Conference*, p.830-837.
3. J. P. Delplangue, R. H. Rangel, "An improved model for droplet solidification on a flat surface", *Journal of Materials Science*, 32(6), (1997), p.1519-153.
4. Lech Pawlowski, "The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings", John Wiley & Sons Ltd, England, 1995, p.28-46, p. 108-130
5. G. Sundararajan, G. Sivakumar, D. Srinivasa Rao, "The Interrelationship Between Particle Velocity and Temperature, Splat Formation and Deposition Efficiency in Detonation Sprayed Alumina Coatings", *Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millennium* (Ed) C.C. Berndt, K.A. Khor and E.F. Lugscheider, Published by ASM International, Materials Park, Ohio, USA 2001, *Proceedings of the International Thermal Spray Conference*, p.849-858.
6. M. Fukumoto, S. Katoh, I.Okane, "Splat Behavior of Plasma Sprayed Particles on Flat Substrate Surface", *Proceedings of International Thermal Spray Conference*, Kobe, Japan, A. Ohmori Ed, Japan High Temperature Society, 1995, p.353-358
7. X. Y. Jiang, J. Matejcek, S. Sampath, "Substrate temperature effects on splat formation, microstructure development and properties of plasma sprayed coatings Part II: Case study for molybdenum", *Materials Science and Engineering*, A272, 1999, p.189-198.
8. S. Sampath, X. Jiang, "Splat formation and microstructure development during plasma spraying: Deposition Temperature Effects", *Materials Science and Engineering* A304-306, (2001) p.144-150.
9. C. Moreau, P. Gougeon, M. Lamontagne, "Influence of Substrate Preparation on the Flattening and Cooling of Plasma-Sprayed Particles", *Journal of Thermal Spray Technology*, 4(1), 1995, p.25-33.
10. M. Fukumoto, I. Ohgitani, M. Shiba, T. Yasui, "Effect of Substrate Surface Change by Heating in Transition in Flattening Behavior of Thermal Sprayed Droplets", *Proceeding of International Thermal Spraying Conference*, Osaka, Japan, 2004 (Πρακτικά σε Cd-Rom).

11. M. Fukumoto and Y. Huang, “Flattening Mechanism in Thermal Sprayed Nickel Particle Impinging on Flat Substrate Surface”, Journal of Thermal Spray Technology, 8(3), 1999, p.427-432.
12. Γ. Παπάνος, Σ. Οικονόμου, Ν. Πέτσας, Μ. Βαρδαβούλιας, και Δ. Παντελής, Χ. Σαράφογλου. “Ανάπτυξη κεραμομεταλλικών επικαλύψεων με τεχνολογίες θερμικού ψεκασμού για χρήση σε ελατήρια εμβόλων”, 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Πάτρα 29-31 Μαΐου 2003, p.183-186
13. <http://www.sulzermetco.com/eprise/Sulzermetco/Sites/Products/AboutThermalSpray/about.html>
14. D. K. Christoulis, D. I Pantelis, F. Borit, V. Guipont, M. Jeandin, “Effect of Substrate Roughness and Temperature on Splat Formation in Plasma Sprayed Aluminium Bronze”, Proceedings of 18th Surface Modifications Technology (SMT18), November 15-17 2004, Dijon, France (In Press).
15. <http://www.flamesprayinc.com/process.htm>.
16. Δ. Παντελής, Σημειώσεις για το μάθημα “Κατεργασίες Υλικών με Δέσμες Μεγάλης Ενέργειας” του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών», p.137-140.
17. <http://www.matscieng.sunysb.edu/tsl/thermal/article1.html>
18. <http://www.sulzermetco.com/eprise/Sulzermetco/Sites/Products/AboutThermalSpray/airplasma.html>
19. http://www.thomas-sourmail.org/coatings/processes_TS.html
20. Κουμπούρα Μαρία, “Η Τεχνική του Ψυχρού Ψεκασμού”, Διπλωματική εργασία της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Επιβλέπων Καθηγητής: Παντελής Δημήτρης, Μάρτιος 2004.
21. A.A. Syed, A. Denoirjeau, P. Deniorjau, J. C. Labbe, P. Fauchais, “In Flight Oxidation of Metallic Particles in Plasma Sprayings”, Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology, (Ed) C. Moreau and B. Mample, ASM International, Ohio, USA 2003, p. 985 – 992.
22. K. Volenik, V. Novale, J. Dubsy, P. Chraska, K.Nentus, “Properties of Alloy Steel Coatings Oxidized During Plasma Spray”, Materials Science & Engineering A, 234 – 236, 1997, p. 493 - 496
23. Δρ. Μιχ. Βαρδαβούλια, Προϊστ. Τμήματος Κεραμικών Επικαλύψεων και Τριβολογίας. (Κεραμικές Επικαλύψεις Θερμικού Ψεκασμού), “Εισαγωγή μιας Νέας Τεχνολογίας στην Ελληνική Βιομηχανία”, ΕΔ – ΤΕΥΧΟΣ 3 – ΙΟΥΛΙΟΣ - ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 1996
24. H. JONES, “Cooling and freezing and substrate impact of droplets formed by rotary atomisation”, Journal of Physics D: Applied Physics, 4, 1971, p.1657-1660.

25. J. Madejski, "Solidification of Droplets on a Cold Surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 19, 1976, p. 1009-1013
26. G. Trapaga, J. Szekely, "Mathematical Modeling of the Isothermal Impingement of Liquid Droplets in Spraying Processes", *Metallurgical Transactions*, 22B, (1991), p.901-914.
27. G. Trapaga, E. F. Matthys, J. J. Valencia, J. Szekely, "Fluid Flow, Heat Transfer and Solidification of Molten Metal Droplets. Impinging on Substrate: Comparison of Numerical and Experimental Results", *Metallurgical Transactions*, 23B, (1992), p.701-718.
28. Zhang H., "Theoretical analysis of spreading and solidification of molten droplet during thermal spray deposition", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, p2499-2508, (1999)
29. Y.P. Wan, H. Zhang, X.Y. Jiang, S. Sampath, V. Prasad, "Role of Solidification, Substrate Temperature and Reynolds Number on Droplet Spreading in Thermal Spray Deposition: Measurements and Modeling", *Journal of Heat Transfer*, 123, 2001, p.382-389.
30. C. Moreau, P. Cielo, M. Lamontagne, S. Dallaire, J.D. Krapez, M. Vardelle, "Temperature Evolution of Plasma-Sprayed Niobium Particles Impacting on a Substrate", *Thermal Spray Research and Applications, Proceeding of the 3th National Thermal Spray Conference*, Long Beach, PA, USA, 1990, p.19-26.
31. S. Fantassi, M. Vardelle, A. Vardelle and P. Fauchais, "Influence of the Velocity of Plasma Sprayed Particles on Splat Formation", *Journal of Thermal Spray Technology*, 2(4), 1993, p.379-384.
32. G. Montavon, C. Coddet, C.C. Berndt and S-H. Leigh, "Microstructural Index to Quantify Thermal Spray Deposit Microstructure Using Image Analysis", *Journal of Thermal Spray Technology*, f(2), 1998, p.229-241.
33. "Image Pro Plus: The Proven Solution for Image Analysis", *Media Cybernetics*, USA, 1998.
34. P. Fauchais, M. Fukumoto, A. Vardelle, M. Vardelle, "Knowledge Concerning Splat Formation: An invited Review", *Journal of Thermal Spray Technology*, 13(3), p. 337-360
35. S. Oki, "Splat Morphology in Spray Pattern of Plasma Spraying", *Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millennium*, (Ed.) C.C Berndt, K.A. Khor and E. F. Lugscheider, Published by ASM International, Materials Park, Ohio, USA, p. 835-840
36. L. Li, X. Y. Wang, A. Vaidya and S. Sampath, G. Wei and H. Zhang, "Substrate Melting During Thermal Spray Splat Quenching Case Study for Molybdenum Droplets on Various Substrates", *Thermal Spray 2003, Advancing the Science & Applying the Technology*, (Ed.), C. Moreau and B. Marple, Published by ASM International, Materials Park, Ohio, USA 2003, p.1041-1046

37. M. F. Morks, Y. Tsunekawa, M. Okumiya, "Splat Morphology and Microstructure of Plasma Sprayed Cast Iron with Different Preheat Substrate Temperature", *Journal of Thermal Spray Technology*, 11(2), 2002, p.226-232
38. M. Fukumoto, E. Nishioka, T. Matsubara, "Flattening and Solidification of a Metal Droplet on a Flat Substrate Held at Various Temperatures", *Surface and Coatings*, 120-121, 1999, p. 131-137

Δ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- I. Παρακάτω παρουσιάζεται το πιστοποιητικό της εταιρίας Sulzer Metco για τα χαρακτηριστικά της πούδρας χαλκού.

SULZER

Sulzer Metco Europe GmbH
Postfach 1465 · D-65783 Hattersheim
Am Eisenen Steg 18
D-65795 Hattersheim/M.
Telefon: +49 (0) 61 90 809-0
Telefax: +49 (0) 61 90 3009
www.sulzermetco.com

Inspection Certificate

EN 10204 - 3.1B

Customer No.: 1100405

06/15/03
Page 1 of 1

ECOLE DES MINES
CENTRE DES MATERIAUX - C 2 P
RN 446 (PROCHE SNECMA)
FR-91000 EVRY

Product: METCO 55
Lot No.: 330294

Customer PO.: N. 056 580 484 - C 2 P
Sulzer Metco PO.: 200038862
Quantity: 165 lb

Ship date: 15.05.2003
Shippm.Doc.No.: 800061527

Chemical Analysis	Method	Result (wt.-%)
Cu	ICP	99.8
Sieve Analysis (mesh/micron)	Method	Result (wt.-%)
+140 (106)	ASTM 9214	0.1
+170 (90)		2.3
+200 (75)		21.2
-325 (45)		8.7

Approved Specification
INTERNAL SPECIFICATION

It is hereby certified that the material described above has been inspected, tested and unless otherwise stated, conforms to all applicable requirements of the contract order and specifications referenced on this certificate.

Inspections are performed by the NADCAP approved laboratories of the SULZER METCO manufacturing sites (Troy, MI and Hicksville, NY); results are then entered in the global CAQ-system and the certificates are issued by the European Distribution Center in Hattersheim (Germany).

Certificate is issued by use of the CAQ-System and according to EN10204 valid without signature.
Responsible person: Ute Ebersbach, QA.

Bank:
Dresdner Bank AG Hattersheim
(BLZ 500 800 00) Kto. 794 602 800

Sitz der Gesellschaft
Hattersheim (Main)
Amtsgericht Frankfurt (Main) HRB 8731
Geschäftsführer: Paul Müller-Planteur

II. Παρουσιάζεται το εξώφυλλο του αναλυτικού οδηγού του λογισμικού «Image-Pro Plus»

IMAGING SOFTWARE

The
S Proven
Solution
for Image
Analysis

**IMAGE-PRO[®] PLUS
REFERENCE GUIDE
FOR WINDOWS[™]**

Introduction

File

Edit

Acquire

Enhance

Image-Pro[®]
PLUS

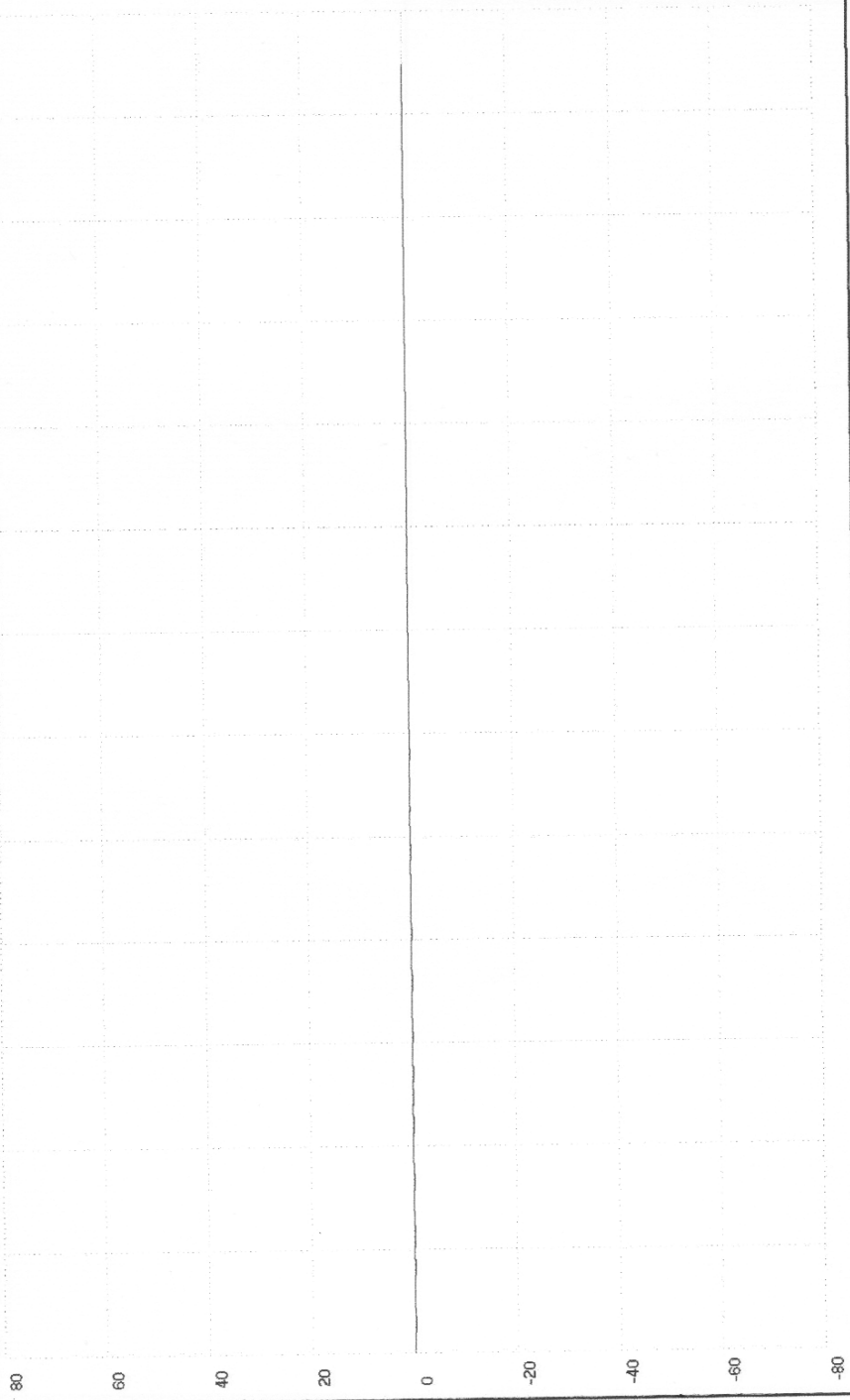
The Proven Solution[™]

**IMAGE ANALYSIS SOLUTIONS
THAT ARE FAST, ACCURATE
AND EASY TO USE
FROM THE LEADER IN
IMAGING TECHNOLOGY...
MEDIA CYBERNETICS**

III. Η μέτρηση της τραχύτητας των δοκιμίων από ντουραλουμίνιο έγινε με τη συσκευή «TR-200 Handheld Roughness Tester». Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά δυο μετρήσεις της τραχύτητας για τις επιφάνειες με $R_a = 0.03\mu m$ και δυο για τις επιφάνειες με $R_a = 0.5\mu m$

TE200 Handheld Roughness Tester Profile

CutOff: 2.5mm Standard: ISO Access: 1l Range: +/-40um Filter: RC Pickup: mirror
Vh: 100 Vv: 1000
Ra = 0.040um Rq = 0.052um Rz = 0.239um Ry = 0.279um Rt = 0.279um Rm = 0.160um S = 0.0480mm Sm = 0.1041mm
Sk- = -0.642



WorkPieces: Operator: Print : 1l Unit: mm Date: 2005-2-11

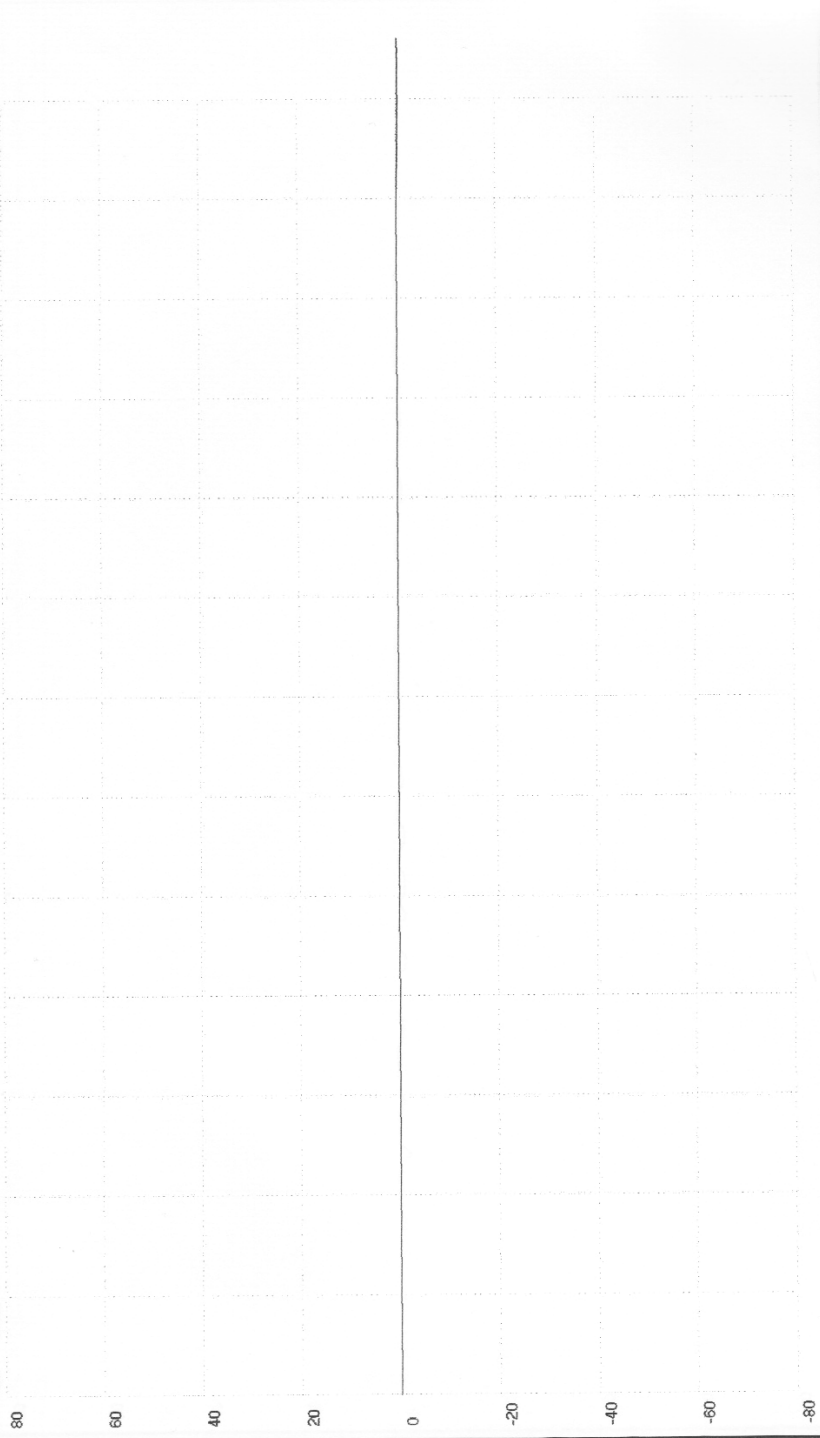
TR-200 Handheld Roughness Tester - Profile

CutOff: 2.5mm Standard: ISO Access: 1l Range: +/-40um Filter: RC Pickup: mirror

Vh: 109 Vv: 1000

Ra = 0.082um Rq = 0.083um Rz = 0.129um Ry = 0.400um Rt = 0.400um Rp = 0.059um Rm = 0.340um S = 0.2500mm Sm = 0.3571mm

Sk- = -3.127

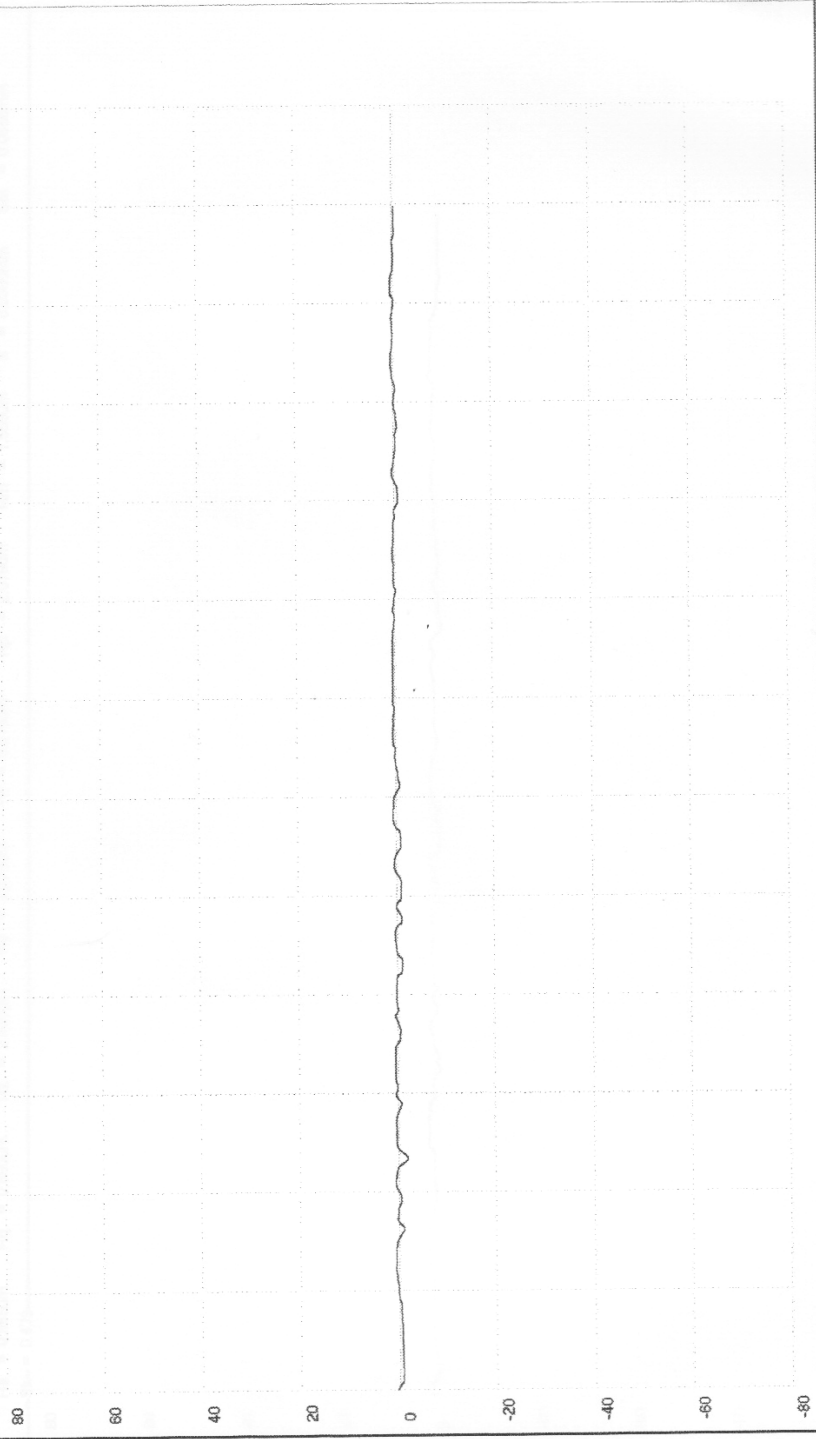


WorkPiece: Operator: Print : 1l Unit: mm Date: 2005-2-11

IR-200 Handheld Roughness Tester - Profile

CutOff: 0.8mm Standard: ISO Access: 1l Range: +/-40um Filter: RC Pickup: dural

Vh: 300 Vv: 1000
Ra = 0.437um Rq = 0.517um Rz = 1.950um Ry = 2.740um Rt = 2.740um Rp = 0.740um Rm = 2.000um S = 0.0347mm Sm = 0.0444mm
SK = -0.826



WorkPiece:

Operator:

Print : 1l

Unit: mm

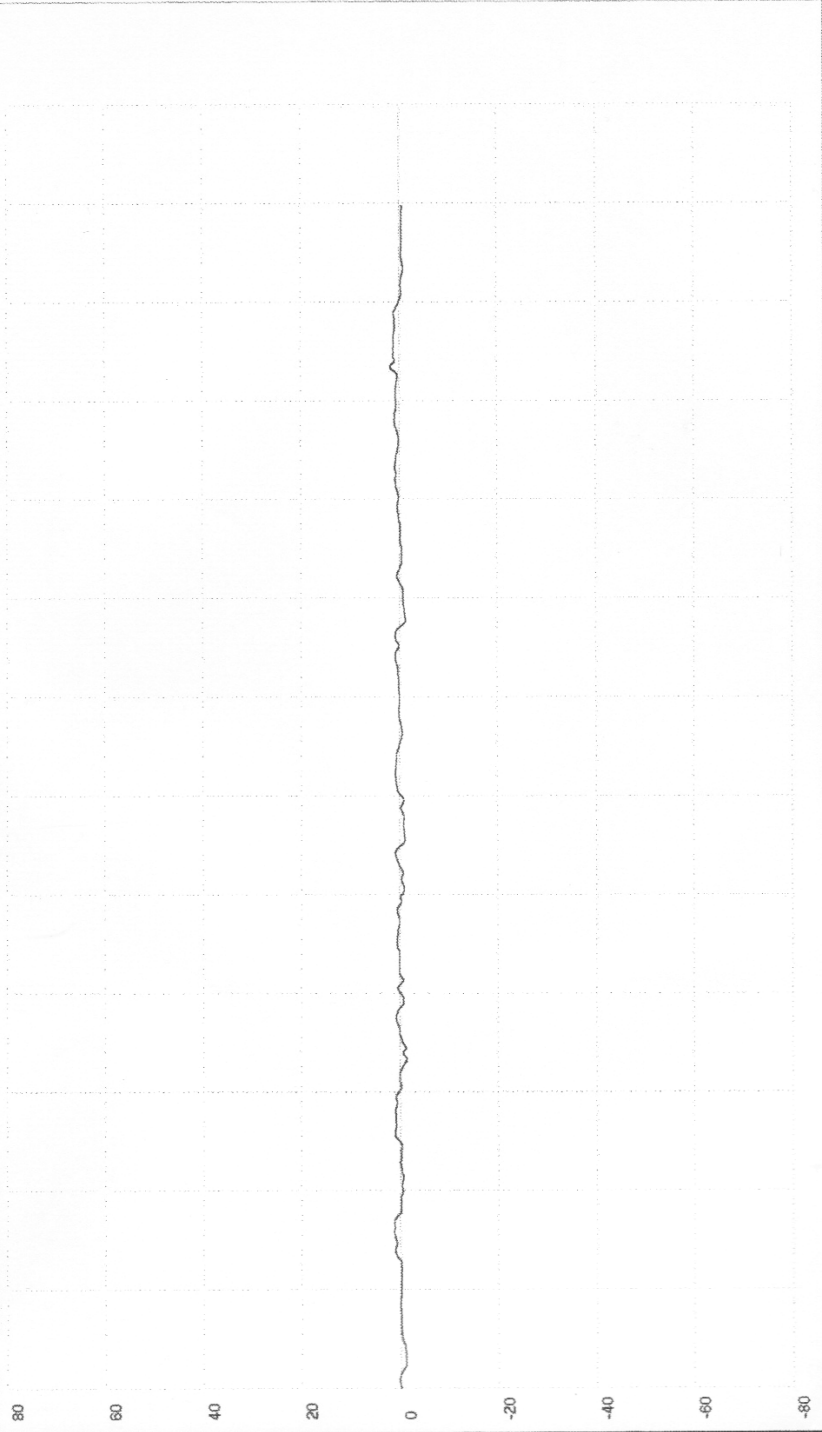
Date: 2005-2-21

IR-200 Handheld Roughness Tester - Profile

CutOff: 0.8mm Standard: ISO Access: 1l Range: +/-40um Filler: RC Pickup: dural

Vh: 300 Vv: 1000

Ra = 0.565um Rq = 0.690um Rz = 2.480um Rt = 3.579um Rp = 2.019um Rm = 1.559um S = 0.0380mm Sm = 0.0686mm
Sk- = 0.479



WorkPiece:

Operator:

Print : 1l

Unit: mm

Date: 2005-2-21

IV. Παράδειγμα διαδικασίας υπολογισμού του $\overline{S.F}$ από ένα σύνολο πειραματικών μετρήσεων.

ΠΙΝΑΚΑΣ Π-5

APS – 205°C – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ (16)

Splat Number	d (μm)	A (μm ²)	P (μm)	S.F
1	23.547	469.186	82.085	0.875
2	26.468	586.483	89.554	0.919
3	29.483	709.076	100.758	0.878
4	21.653	429.903	82.578	0.792
5	23.284	472.828	81.017	0.905
6	21.738	403.310	76.562	0.865
7	21.116	386.979	78.602	0.787
8	30.832	788.524	103.140	0.931
9	44.302	1631.228	153.217	0.873
10	31.527	810.593	104.972	0.924
11	32.333	862.455	107.781	0.933
12	30.338	772.966	103.614	0.905
13	36.879	1115.366	132.001	0.804
14	26.607	577.214	87.893	0.939
15	26.324	555.697	88.168	0.898
16	22.486	434.097	75.978	0.945
17	22.673	464.552	83.366	0.840
19	45.305	1763.752	171.601	0.753
20	36.014	1032.276	124.508	0.837
21	37.961	1264.000	142.322	0.784
22	43.141	1510.952	176.598	0.609
25	33.101	850.979	109.351	0.894
39	45.474	1617.655	160.421	0.790

Ο αριθμός, k , που θα συμβάλει στον υπολογισμό του μέσου όρου δεν ταυτίζεται με το σύνολο των μετρήσεων που έχουν γίνει (40 μετρήσεις). Αυτό συμβαίνει γιατί κατά την διάρκεια των μετρήσεων βρέθηκαν splat με μέση διάμετρο $d_p < 45\mu\text{m}$. Για να βρεθεί αν κάθε splat πρέπει να συμβάλλει στον υπολογισμό του $\overline{S.F}$ ακολουθεί η εξής διαδικασία:

1. Προφανώς για κάθε splat ισχύει $\xi_m = \frac{d}{d_o}$. Γνωρίζοντας το ξ_m και έχοντας

τις μετρήσεις του d , εύκολα υπολογίζεται η τιμή: $d_o = \frac{d}{\xi_m}$

2. Γίνεται έλεγχος αν η τιμή του d_o είναι μέσα στα όρια που δίνει η εταιρία, δηλαδή αν ισχύει $45\mu m \leq d_o \leq 90\mu m$. Αν ναι, τότε το συγκεκριμένο sprat συμβάλλει στον υπολογισμό του $\overline{S.F}$.