



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ"

**ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ
ΑΦΡΩΝ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ (FRICTION
STIR PROCESSING)**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΕΝΔΡΙΝΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Δ. Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ"

**ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ
ΑΦΡΩΝ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ (FRICTION
STIR PROCESSING)**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΕΝΔΡΙΝΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Δ. Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. ΚΟΥΛΟΧΕΡΗΣ, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Α. ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Δημήτριο Ε. Μανωλάκο, Καθηγητή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, για την ανάθεση της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας, καθώς μου έδωσε με αυτόν τον τρόπο τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα αλλά και ένα συνεχώς εξελισσόμενο πεδίο εφαρμογών, εκείνο των μεταλλικών αφρών.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω προσωπικά τον υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Ιωάννη Παπαντωνίου για την μεταξύ μας συνεργασία, την καθοδήγηση από μεριάς του όπως επίσης και για την παροχή πολύτιμων γνώσεων που συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας.

Σημαντική ήταν η συμβολή της Διπλωματούχου Μηχανικού Μεταλλείων-Μεταλλουργού ΕΜΠ κ.Κυριακοπούλου Έλενας καθώς και του τεχνικού προσωπικού του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.

Ευχαριστίες οφείλω ακόμη να αποδώσω στην κ. Καρανδρίκα Θεοδώρα, για την κατανόηση και συμπαράσταση καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης του μεταπτυχιακού μου έργου, και στον Παπαχρήστου Παντελή για τον συμβουλευτικό του ρόλο και της στοχευμένες παρατηρήσεις του.

Τέλος, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την ανεξάντλητη υπομονή και την αδιάλειπτη στήριξή της με κάθε τρόπο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι μεταλλικοί αφροί αποτελούν κυψελοειδή υλικά, τα οποία διακρίνονται για το χαμηλό τους βάρος σε συνδυασμό με τις μηχανικές, χημικές και θερμοηλεκτρικές τους ιδιότητες. Ανάλογα με τον τύπο του πορώδους τους και τις ιδιότητες του μητρικού τους υλικού ανταποκρίνονται κάθε φορά σε ένα συγκεκριμένο εύρος εφαρμογών, όπου συνδυάζουν την μείωση του βάρους με την απορρόφηση ενέργειας και την παροχή ηχομόνωσης. Η ικανότητά τους να ανταποκρίνονται σε σημαντικούς εν εξελίξει κλάδους, όπως εκείνοι της αυτοκινητοβιομηχανίας και της αεροναυπηγικής, οδήγησε το επιστημονικό ενδιαφέρον προς την αναζήτηση οικονομικότερων και αποδοτικότερων μεθόδων παρασκευής τους.

Στην προσπάθεια αυτή πραγματοποιήθηκαν ενέργειες για την παρασκευή των μεταλλικών αφρών μέσω της κατεργασίας δια τριβής με ανάδευση. Η διαδικασία περιλαμβάνει την δημιουργία σύνθετου επιφανειακού υλικού παρουσία αφριστικού παράγοντα, το οποίο στην συνέχεια θερμαίνεται έτσι ώστε να προκύψει η πορώδης δομή. Με την εν λόγω μέθοδο παρασκευής καθίσταται εφικτή η τοπική κατεργασία και ενίσχυση του μετάλλου, πράγμα το οποίο δεν ήταν δυνατό να συμβεί με τις κλασικές μεθόδους παρασκευής.

Στην μεταπτυχιακή αυτή εργασία μελετήθηκε η παρασκευή συνθετικού επιφανειακού υλικού με διασπορά μικροσωματιδίων καρβιδίου του πυριτίου (SiC) και υδριδίου του τιτανίου (TiH_2) σε πλάκα κράματος αλουμινίου AA5083-H111, με την χρήση της κατεργασίας δια τριβής με ανάδευση (FSP). Η προσθήκη του μίγματος καρβιδίου-υδριδίου στην πλάκα κατέστη δυνατή ύστερα από την διάνοιξη αυλακών κατά μήκος του δοκιμίου, παράλληλα στη φορά πρόωσης.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε η πρώτη σειρά πειραμάτων βάσει της οποίας παρασκευάστηκε το σύνθετο υλικό, με διαφορετικό αριθμό επαναλήψεων για κάθε έναν από τους εξεταζόμενους αύλακες. Το υλικό που προέκυψε από την διαδικασία εξετάστηκε είτε στην πρόδρομη μορφή του είτε κατόπιν θερμικής του κατεργασίας. Οι παρατηρήσεις στην ζώνη ανάδευσης του προδρόμου υλικού παρατέθηκαν στην μελέτη του αφροποιημένου δοκιμίου, με στόχο την διερεύνηση της ανεπαρκούς ανάπτυξης του πορώδους του.

Στην συνέχεια εκτελέστηκε μια δεύτερη σειρά πειραμάτων για μικρότερο βάθος αυλακών, όπου σημειώθηκε βελτίωση στην ζώνη ανάδευσης των προδρόμων υλικών αλλά και στην δομή των αφροποιημένων δοκιμίων. Ενδεικτικό στοιχείο των παραπάνω αποτελεί το διάγραμμα μεταβολής του μεγίστου ύψους τους κατά την αφροποίηση, όπου η απόκριση παρουσιάζεται ομαλότερη σε σχέση με εκείνης της πρώτης σειράς.

Κατόπιν εύρεσης της βέλτιστης γεωμετρίας και του καλύτερου δυνατού αριθμού επαναλήψεων, εξετάστηκε εκ νέου η παρασκευή του σύνθετου μεταλλικού υλικού για δοκίμιο μεγαλύτερης επιφάνειας, έτσι ώστε να διαπιστωθεί εάν η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε βιομηχανικό επίπεδο. Με την παρασκευή του σύνθετου υλικού και την θερμική κατεργασία των δοκιμίων του για τρεις διαφορετικούς χρόνους, ακολούθησαν μετρήσεις της σκληρότητας στο πρόδρομο υλικό και στον μεταλλικό αφρό του βέλτιστου χρόνου. Οι τιμές της σκληρότητας που υπολογίστηκαν και από τις δύο μορφές συγκρίθηκαν με την σκληρότητα του αρχικού κράματος.

ABSTRACT

Metal foams are cellular materials which distinguish themselves due to their mechanical, chemical, thermal and electrical properties. According to the porous type and the properties of their base material, metal foams are used for a specific range of applications each time, providing weight reduction, energy absorption and sound blocking solutions. Their exceptional response against the necessities of significant domains such as automotive and aerospace industry, has directed the scientific interest into searching for more economical and efficient ways to produce metal foams.

Throughout that process, scientific groups have studied the production of metal foams using the Friction Stir Processing (FSP) technique. The reported technique consist of the creation of the composite surface layer, containing a foaming agent, and its thermal processing in order for the cellular structure to appear. This method of creating metal foams permits the local reinforcement of the metal, which was unreachable for the classic methods so far.

In the current thesis, the production of a composite surface layer was examined, during which a mix of microsized particles of silicon carbide (SiC) and titanium hydride (TiH₂) were dispersed on bulk aluminum alloy AA5083–H111 using FSP. The implantation of the mix was achieved via grooves which were constructed along the plate, parallel to the rolling direction.

Initially it was attempted to produce composites using FSP while changing the number of passes from one groove to another. Then, the composites were split in order to examine its stir zone in their actual form, or study their porous structure after being foamed. The observations that were made in both forms, were correlated so that the cause of the inadequate stir of the elements, in the majority of the composites, could be clarified.

A second series of experiments was carried out with reduction of the groove depth, providing enhanced dispersion stir zones in composite materials, as well as more homogeneous structures in the metal foams, compared to the results of the previous series. As a matter of fact the expansion during foaming of the composites in the second series, showed a more stable response in comparison to those in the first.

Having found the optimal parameters for groove depth and number of passes, the technique was tested for a bigger surface of the material in order to investigate whether the whole process is industrially feasible. Parts of the composite were heated for three different periods of time and then measurements of the hardness were performed for both composite material and the three metal foams. All values of hardness were compared to the hardness of the alloy in its pure form.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	3
1.1 Αλουμίνιο	3
1.2 Σύνθετα υλικά	9
1.1.1 Σύνθετικά υλικά μεταλλικής μήτρας (Metal Matrix Composites - MMC)	9
1.3 Πορώδη υλικά	10
1.4 Μεταλλικοί αφροί	11
1.4.1 Ιδιότητες μεταλλικών αφρών	13
1.4.2 Δομή αφρών	22
1.4.3 Πυρηνοποίηση	25
1.4.4 Μέθοδοι παρασκευής μεταλλικών αφρών	28
1.4.5 Μέθοδοι χαρακτηρισμού κυψελοειδών υλικών	45
1.4.6 Εφαρμογές μεταλλικών αφρών	53
1.5 Διεργασία συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding)	65
1.5.1 Απαραίτητες συνθήκες	67
1.5.2 Ζώνες μικροδομής	67
1.5.3 Παράμετροι συγκόλλησης - επεξεργασίας	69
1.6 Κατεργασία δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Processing)	74
1.7 Διεθνής Βιβλιογραφία	76
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο	87
2.1 Εισαγωγή	87
2.2 Παρουσίαση υλικών	88
2.3 Περίληψη διαδικασίας 1^{ης} & 2^{ης} σειράς πειραμάτων	91
2.4 Πειραματική ακολουθία	92
Προετοιμασία πλακών	92
Ανάμειξη κόνεων	92
Κατεργασία δια τριβής με ανάδευση (FSP)	93
Κοπή και λείανση προδρόμων δοκιμίων	94

Αφροποίηση δοκιμίων	95
Λείανση - Στίλβωση	96
Χημική προσβολή	98
Οπτική στερεοσκοπία	99
Οπτική μικροσκοπία	99
Σκληρομέτρηση	100
2.5 Πειραματικές συνθήκες	102
1 ^η Σειρά πειραμάτων	102
<i>Ανάλυση αποτελεσμάτων 1^{ης} σειράς</i>	<i>104</i>
2 ^η Σειρά πειραμάτων	115
<i>Ανάλυση αποτελεσμάτων 2^{ης} σειράς</i>	<i>116</i>
3 ^η Σειρά πειραμάτων	125
<i>Ανάλυση αποτελεσμάτων 3^{ης} σειράς</i>	<i>127</i>
2.6 Σκληρομέτρηση	131
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο	135
3.1 Συμπεράσματα	135
3.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	136
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	137

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1.1 Αλουμίνιο

Το αλουμίνιο (Al) λόγω της χαμηλής του πυκνότητας (2.7 gr/cm^3) κατατάσσεται στην κατηγορία των ελαφρών μετάλλων, όπως το μαγνήσιο (Mg) και το τιτάνιο (Ti). Μετά τον σίδηρο και τον χάλυβα αποτελεί το σημαντικότερο μέταλλο στον τομέα της βιομηχανίας και η χρήση του, τόσο σε καθαρή μορφή όσο σε κράματα, συνεχώς αυξάνεται. Το γεγονός αυτό συνδέεται άμεσα με τις κατάλληλες ιδιότητες που προσφέρει στις κατασκευαστικές εφαρμογές, όπως το υψηλό μέτρο ελαστικότητας (E/ρ) και η μηχανική του αντοχή (σ_{TS}/ρ), η οποία σε μερικά κράματα φτάνει το όριο θραύσης των 70 kP/mm^2 . Η παραγωγή του αλουμινίου από βωξίτη απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, όμως η εξοικονόμηση από την εύκολη ανακύκλωσή του, λόγω του χαμηλού σημείου τήξης του, είναι σημαντική.

Σε καθαρή μορφή το αλουμίνιο παρουσιάζεται ελαφρύ και ιδιαίτερα όλκιμο. Πέρα από το ποσοστό καθαρότητας του αλουμινίου, οι ιδιότητες των κραμάτων του επηρεάζονται από τις μηχανικές αλλά και θερμικές κατεργασίες τις οποίες υφίστανται. Όσον αφορά την θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα του εν λόγω μετάλλου, αξίζει να σημειωθεί πως υστερεί μονάχα έναντι εκείνης του χαλκού, του αργύρου και του χρυσού. Ωστόσο, με δεδομένη την μεγαλύτερη ανά μονάδα βάρους αγωγιμότητά του, το αλουμίνιο θεωρείται καλύτερος αγωγός και των τριών.

Παρόλο που το αλουμίνιο και τα κράματά του αντιδρούν έντονα με το οξυγόνο, το λεπτό στρώμα (Al_2O_3) που δημιουργείται στην επιφάνειά τους από την ταχεία αντίδραση εμποδίζει την περαιτέρω οξείδωση του μετάλλου. Το συγκεκριμένο στρώμα δυσχεραίνει τις συνθήκες κατά την συγκόλληση του αλουμινίου και των κραμάτων του, όχι όμως και την μηχανουργική κατεργασιμότητά τους [1, 2].

Κράματα αλουμινίου

Τα κράματα του αλουμινίου χωρίζονται σε κράματα διαμόρφωσης και κράματα χύτευσης. Σε κάθε μια από τις δύο κατηγορίες, τα επιμέρους κράματα χωρίζονται σε εκείνα που μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία και σε εκείνα που είναι αδύνατη και οι ιδιότητες τους εξαρτώνται από το ποσοστό ενδοτράχυνσης που έχουν υποστεί. Στα κράματα

αλουμινίου συναντώνται συνήθως προσθήκες του πυριτίου, του χαλκού, του μαγνησίου, του μαγγανίου, του ψευδαργύρου και του σιδήρου [1, 2].

<i>Προσθήκη</i>	<i>Ιδιότητες στο κράμα αλουμινίου</i>
Πυρίτιο	Αυξάνει την χυτευσιμότητα, την αντοχή σε διάβρωση και ελαφρώς την μηχανική αντοχή του μετάλλου. Συναντάται σε ποσοστό από 3.5 – 13%.
Χαλκός	Βελτιώνει την μηχανική αντοχή καθώς και τις μηχανουργικές ιδιότητες του κράματος. Το ποσοστό παρουσίας του κυμαίνεται από 4 έως 12%.
Μαγνήσιο	Επιφέρει αύξηση στην σκληρότητα, τη μηχανική και διαβρωτική αντοχή.
Μαγγάνιο	Βελτιώνει την ολκιμότητα και σε συνδυασμό με τον σίδηρο την χυτευσιμότητα.
Ψευδάργυρος	Μειώνει την χυτευσιμότητα, αλλά αυξάνει την σκληρότητα και σε συνδυασμό με το μαγνήσιο χρησιμοποιείται για την αύξηση της μηχανικής αντοχής.
Σίδηρος	Αυξάνει την αντοχή και την σκληρότητα, ενώ παράλληλα μειώνει τις πιθανότητες από ρωγματώσεις κατά την χύτευση.

Εικόνα 1.1.1 - Οι κύριες προσθήκες των κραμάτων αλουμινίου και οι επιδράσεις τους.

Ονοματολογία κραμάτων αλουμινίου

Η ονοματολογία των κραμάτων αλουμινίου τόσο στα κράματα διαμόρφωσης όσο και στα κράματα χύτευσης παρέχει πληροφορίες για την περιεκτικότητα του κράματος. Οι κωδικές ονομασίες τους, σύμφωνα με την Aluminium Association, αποτελούνται από δύο μέρη τα οποία διαχωρίζονται με παύλα. Το πρώτο μέρος αποτελείται από τέσσερις αριθμούς και για τα δύο κράματα, με διαφορετική όμως ερμηνεία για το κάθε ένα.

Πιο συγκεκριμένα, για τα κράματα διαμόρφωσης ο πρώτος αριθμός αντιστοιχεί στο κύριο στοιχείο προσθήκης, ενώ ο δεύτερος χρησιμοποιείται για να δηλώσει τροποποιήσεις στα όρια περιεκτικότητας των ακαθαρσιών. Οι δύο τελευταίοι αριθμοί για την σειρά 1XXX αναφέρονται στο δεκαδικό ποσοστό για καθαρότητα αλουμινίου υψηλότερη του 99%, ενώ στις υπόλοιπες σειρές υποδηλώνει την ειδική κατηγορία κράματος της οικείας ομάδας.

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΥΡΙΑ ΠΡΟΣΘΗΚΗ
1XXX	Αλουμίνιο ελάχιστης καθαρότητας 99.00%
2XXX	Χαλκός
3XXX	Μαγγάνιο
4XXX	Πυρίτιο
5XXX	Μαγνήσιο
6XXX	Μαγνήσιο και πυρίτιο
7XXX	Ψευδάργυρος
8XXX	Άλλα στοιχεία
9XXX	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά

Εικόνα 1.1.2 - Κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου.

Για την κατηγορία των χυτευτών κραμάτων, ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει και πάλι την κύρια προσθήκη στο κράμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.1.3. Στην συγκεκριμένη κατηγορία, ο δεύτερος και ο τρίτος αριθμός αντιστοιχεί στην ειδική κατηγορία κράματος της ειδικής ομάδας ενώ ο τέταρτος, ο οποίος χωρίζεται με κόμμα από τους άλλους τρεις, αφορά την τελική μορφολογία του κράματος. Αν πρόκειται για κράμα του οποίου η τελική μορφολογία έχει προκύψει με απ' ευθείας χύτευση, ο αριθμός παίρνει την τιμή 0, ενώ σε αντίθετη περίπτωση παίρνει την τιμή 1 (πλίνθωμα).

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΥΡΙΑ ΠΡΟΣΘΗΚΗ
1XX.X	Αλουμίνιο ελάχιστης καθαρότητας 99.00%
2XX.X	Χαλκός
3XX.X	Πυρίτιο και χαλκός ή μαγνήσιο
4XX.X	Πυρίτιο
5XX.X	Μαγνήσιο
6XX.X	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά
7XX.X	Ψευδάργυρος
8XX.X	Κασσίτερος

9ΧΧ.Χ	Άλλα στοιχεία
-------	---------------

Εικόνα 1.1.3 - Κράματα χύτευσης αλουμινίου.

Το δεύτερο μέρος των δύο ειδών κραμάτων αλουμινίου είναι κοινό και αναφέρεται στην μηχανική ή θερμική κατεργασία που έχουν υποστεί.

Κράματα αλουμινίου που δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία

Τα κράματα διαμόρφωσης που δεν υφίστανται θερμική κατεργασία για την σκλήρυνση της δομής τους είναι εκείνα που ανήκουν στις σειρές 1000, 3000 και 5000. Προκειμένου να επιτευχθεί η σκλήρυνσή τους υπόκεινται σε κατεργασίες σκλήρυνσης με την δημιουργία οριακών στερεών διαλυμάτων, αλλά κατά κύριο λόγο μέσω της μετέπειτα ενδοτράχυνσής τους. Στην Εικόνα 1.1.4 παρατίθενται στοιχεία για την συγκεκριμένη κατηγορία κραμάτων καθώς και οι χρήσεις τους.

ΚΩΔΙΚΟΣ ΚΡΑΜΑΤΟΣ	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ			ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ*	ΧΡΗΣΕΙΣ
	$\sigma_{0,2}$	σ_n	ϵ		
	(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	
1060-0	28	70		-	Σε βιομηχανίες χημικές, τροφίμων, κρυσταλλικής. Για κατασκευή δεξαμενών.
1060-H16	90	110		-	
1060 - H18	125	130		-	
					Συνήθη προϊόντα, όπου δεν απαιτούνται αυξημένες αντοχές. Επενδύσεις κτηρίων.
1100 - 0	35	80		30	Τόιες χρήσεις με τη σειρά 1100, έχουν όμως καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.
1100 - H14	90	130		50	
1100 - H18	130	150		60	
					Όπως και η σειρά 3003.
3003 - 0	40	110		45	
3003 - H14	145	155		62	
3003 - H18	185	200		70	
					Στην οικοδομική και τη σωληνοργία. Περιέχουν 1,4% Mg.
3004 - 0	70	180		65	
3004 - H14	200	245		110	
3004 - H18	250	285		115	
					Στη σωληνοργία και λεβητοποιία. Περιέχουν 2,5% Mg και 0,25% Cr.
5050 - 0	55	145		60	
5050 - H34	65	190		110	
5050 - H38	200	220		120	
					Για συγκολλητές κατασκευές και σωλίνες, που λειτουργούν σε θαλάσσιο περιβάλλον. Περιέχουν 2,7% Mg - 0,8% Mn - 0,12% Cr.
5052 - 0	90	190		110	
5052 - H34	210	265		120	
5052 - H38	255	280		135	
5454 - 0	115	240		135	
5454 - H34	240	300		140	
5454 - H38	275	340		150	

*Σε 5×10^8 κύκλους

Εικόνα 1.1.4 - Μέσες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων και χρήσεις των κραμάτων που δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής μέσω θερμικής κατεργασίας.

Κράματα που υφίστανται σκλήρυνση δομής μέσω θερμικής κατεργασίας

Αφορά τα κράματα των σειρών 2000, 6000 και 7000, με μηχανικές ιδιότητες και εφαρμογές που παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.1.5.

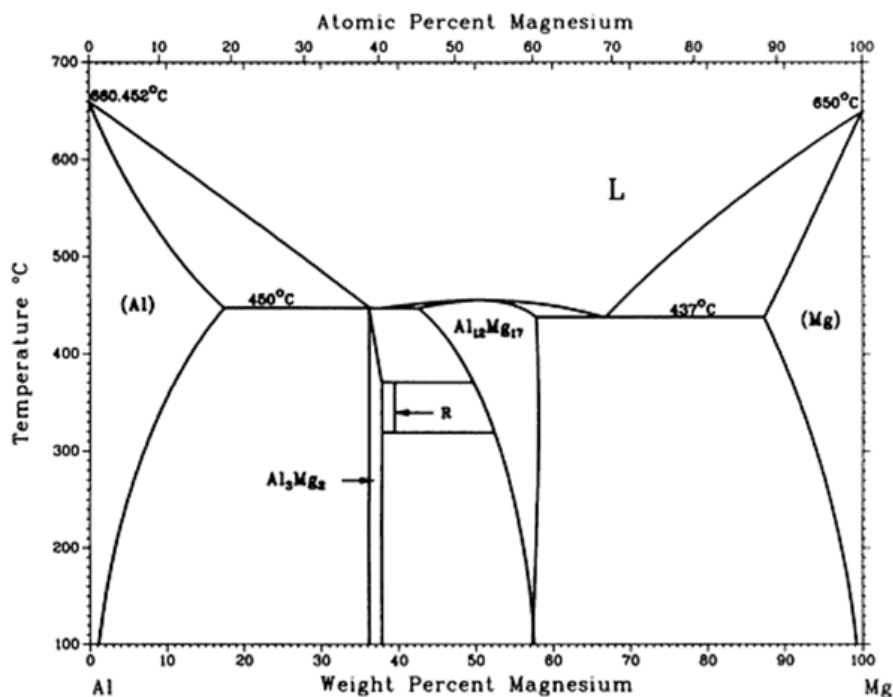
ΚΩΔΙΚΟΣ ΚΡΑΜΑΤΟΣ	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ			ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ*	ΧΡΗΣΕΙΣ
	$\sigma_{0,2}$	σ_{ts}	ϵ		
	(MP _{0,2})	(MP _{ts})	(%)	(MP _α)	
2014 - O	100	200	20	90	Δομικά στοιχεία αεροσκαφών και πλασίων φορτηγών. Περιέχουν 4,4% Cu - 0,5% Mg - 0,8%Mn - 0,8%Mn.
2014 - T4	290	420	18	140	
2014 - T6	430	480	12	125	
2024 - O	100	200	20	90	Στην αεροναυπηγική, σε σκελετούς οικοδομών, κοιλίες, αθλητικά είδη. Περιέχουν 4,4%Cu - 1,5%Mg - 0,6%Mn.
2024 - T4	320	460	18	140	
2024 - T6	390	475	10	125	
6061 - O	55	125	25	50	Σε αμαξώματα αυτοκινήτων και φορτηγών, στην οικοδομική, σε πολώνες και αγωγούς. Περιέχουν 1%Mg - 0,6%Si - 0,2%Cr - 0,3%Cu.
6061 - T4	150	245	22	90	
6061 - T6	275	410	17	100	
6070-O70	145	20	65		Σε συγκολλητές κατασκευές και στη ναυπηγική. Περιέχουν 0,8%Mg - 1,4%Si - 0,7%Mn - 0,3%Cu.
6070 - T6	365	400	12	100	
7005 - O	85	200	20	-	Για υλικά οδικών και σιδηροδρομικών μεταφορών. Περιέχουν 4,5%Zn - 1,4%Mg - 0,12%Cr - 0,4%Mn - 0,15%Zr.
7005 - T6	295	360	13	155	
7075 - O	105	230	17	-	Στην αεροναυπηγική, στην κατασκευή όπλων, βολβίδων, αθλητικών ειδών. Περιέχουν 5,6%Zn - 2,5%Mg - 1,6%Cu - 0,3%Cr.
7075 - T6	500	70	11	160	

*Σε 5×10^8 κύκλους.

Εικόνα 1.1.5 - Μέσες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων και χρήσεις των κραμάτων που υφίστανται σκλήρυνση δομής μέσω θερμικής κατεργασίας.

Σειρά 5000

Η εν λόγω σειρά αφορά κράματα αλουμινίου με κύρια προσθήκη το μαγνήσιο έως 4%. Το μεγαλύτερο μέρος του μαγνησίου βρίσκεται σε στερεό διάλυμα, ενώ το υπόλοιπο συμβάλλει στην μεσομεταλλική ένωση Mg_2Al_3 που είναι σκληρή και εύθραυστη. Η μέτρια μηχανική τους αντοχή αυξάνεται με ενδοτράχυνση, η οποία όμως δρα εις βάρος της ολκιμότητάς τους. Ακόμη, τα κράματα αυτής της σειράς εμφανίζουν καλή συγκολλητότητα και υψηλή διάβρωση σε θαλάσσιο περιβάλλον.



Εικόνα 1.1.6 - Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του συστήματος Al – Mg.

1.2 Σύνθετα υλικά

Σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται τα υλικά που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη, τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους με διακριτή επιφάνεια. Τα σύνθετα υλικά, με βάση την μητρική φάση, ταξινομούνται σε υλικά μεταλλικής μήτρας, υλικά κεραμικής μήτρας και σε υλικά πολυμερούς μήτρας [3].

1.1.1 Συνθετικά υλικά μεταλλικής μήτρας (Metal Matrix Composites - MMC)

Τα συνθετικά υλικά μεταλλικής μήτρας αφορούν υλικά των οποίων η μήτρα είναι ένα όλκιμο μέταλλο. Αποτελούνται από μέταλλα χαμηλής πυκνότητας, όπως το αλουμίνιο ή το μαγνήσιο, ενισχυμένα με σωματίδια ή ίνες κεραμικών υλικών όπως το καρβίδιο του πυριτίου και ο γραφίτης. Η διαδικασία παραγωγής των MMC περιλαμβάνει συνήθως δύο στάδια: την ενσωμάτωση και την σύνθεση. Αμέσως μετά ακολουθεί η διεργασία της μορφοποίησης [3, 4].

Συγκριτικά με τα συμβατικά μέταλλα εμφανίζουν ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες, παρουσιάζονται άφλεκτα και είναι ανθεκτικά σε υψηλότερες θερμοκρασίες χρήσης. Η φάση ενίσχυσης των MMC είναι ιδιαίτερα σημαντική και πέραν από τις μηχανικές ιδιότητες, καθορίζει το κόστος αλλά και τις ιδιότητες του κράματος. Η φάση ενίσχυσης μπορεί να βρίσκεται σε μορφή κόκκων, βελόνων ή συνεχών και ασυνεχών ινών και το ποσοστό της στο κράμα ποικίλει από 10 – 60% [3].

Τα συνθετικά υλικά με την χρήση κόκκων μπορούν να ανταγωνιστούν τις ιδιότητες των μετάλλων χωρίς ενίσχυση, παρουσιάζοντας μεγαλύτερη ακαμψία και αντοχή σε θλίψη. Όσο για την περίπτωση των ινών αλλά και εκείνη των βελόνων, οι ιδιότητες παρουσιάζονται ακόμη πιο βελτιωμένες, ωστόσο το κόστος υπερβαίνει κατά πολύ εκείνο των κόκκων [4].

Τα τελευταία χρόνια τα MMC εισήχθησαν στην αυτοκινητοβιομηχανία και συγκεκριμένα σε εξαρτήματα μηχανών, λόγω του χαμηλού βάρους και τις αντίστασής τους σε φθορά και παραμόρφωση, τα οποία αποτελούνται από κράματα αλουμινίου ενισχυμένα με αλουμίνα και ίνες άνθρακα. Επιπλέον, στον τομέα της αεροναυπηγικής τα συγκεκριμένα υλικά χρησιμοποιήθηκαν, μέσα από κράματα αλουμινίου, με ίνες βορίου για την ενίσχυση του διαστημικού λεωφορείου και με συνεχείς ίνες γραφίτη για το τηλεσκόπιο Hubble [3].

1.3 Πορώδη υλικά

Με τον όρο πορώδη υλικά αναφέρεται κανείς στα υλικά τα οποία παρουσιάζουν οπές στο εσωτερικό τους. Κύριο χαρακτηριστικό των υλικών αυτών αποτελεί το πορώδες που εμφανίζουν, δηλαδή το ποσοστό του όγκου που καταλαμβάνουν οι οπές ως προς τον συνολικό όγκο του υλικού.

Τα υλικά με υψηλό πορώδες αποτελούσαν ανέκαθεν αντικείμενο μελέτης της επιστήμης των υλικών, λόγω του συνδυασμού φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων που προσέφεραν. Μεταξύ άλλων η χαμηλή τους πυκνότητα, η μεγάλη απορροφητικότητα ενέργειας και η διαπερατότητα που τα χαρακτηρίζει, επιτρέπει σε αυτά να αλληλεπιδρούν με την υπόλοιπη φύση αρμονικά. Αυτό άλλωστε είναι γνωστό από τα πορώδη υλικά που συναντάει κανείς στη φύση, όπως το ξύλο, το κοράλι και τα κόκκαλα, η θέση των οποίων στο φυσικό περιβάλλον, σύμφωνα με τον Ashby, μόνο τυχαία δεν είναι.

Πέραν όμως των πολυμερών που υπάρχουν στη φύση με τα παραπάνω γνωρίσματα, συναντώνται και στο πεδίο της μηχανικής τεχνητά υλικά, τα οποία αποτελούνται κατά κύριο λόγο από μέταλλα και συνθέτουν τους μεταλλικούς αφρούς. Πρόκειται για υλικά που χαρακτηρίζονται τόσο για τις ιδιότητες των μετάλλων που περιέχουν στη δομή τους, όσο και για εκείνες που προστίθενται χάριν της πορώδους φύσης τους [5, 6, 7].

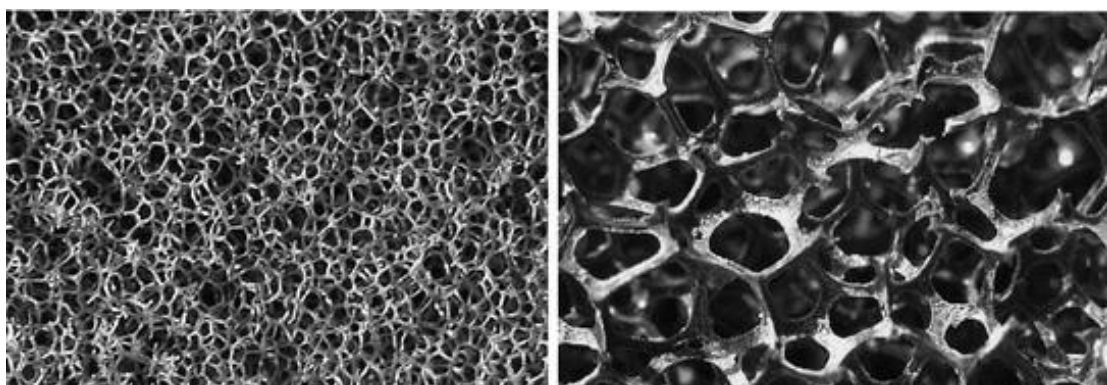
1.4 Μεταλλικοί αφροί

Οι μεταλλικοί αφροί, κατά βάση στερεοί αφροί, αποτελούν υλικά με κυψελοειδή δομή και υψηλό πορώδες (από 75 – 90%), τα οποία εμφανίζουν αρκετούς συνδυασμούς φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων. Ενδεικτικά αναφέρονται το εξαιρετικά χαμηλό βάρος τους, η υψηλή ακαμψία και διαπερατότητα σε συνδυασμό με την θερμική μόνωση που παρέχουν.

Η έννοια αφρός που αποδίδεται στα εν λόγω υλικά οφείλεται στην ομοιόμορφη διασπορά της αέριας φάσης σε υγρή ή στερεή κατά την δημιουργία φυσαλίδων. Το μεγαλύτερο μέρος του όγκου ενός μεταλλικού αφρού καταλαμβάνεται από την υγρή και αέρια κατάσταση, που βρίσκεται μέσα και γύρω από τους πόρους, ενώ το συμπληρωματικό που καλείται μήτρα του υλικού βρίσκεται σε στερεή κατάσταση. Οι αφροί που προέρχονται από άφλεκτα μεταλλικά υλικά δύναται να παραμείνουν άφλεκτοι και είναι κυρίως ανακυκλώσιμοι ως προς το βασικό υλικό τους. Ο συντελεστής της θερμικής διαστολής τους παραμένει ο ίδιος με το μέταλλο βάσης, ενώ η θερμική αγωγιμότητα είναι πιθανό να μειωθεί.

Τα μεταλλικά πορώδη υλικά εμφανίζονται είτε με την μορφή ανοικτών πόρων, όπου οι οπές του υλικού δημιουργούν ένα εσωτερικό δίκτυο επικοινωνίας, είτε με την μορφή κλειστών πόρων όπου οι οπές είναι ανεξάρτητες η μία από την άλλη, αφού μεταξύ τους μεσολαβεί στερεής φάσης τοίχωμα [6, 7].

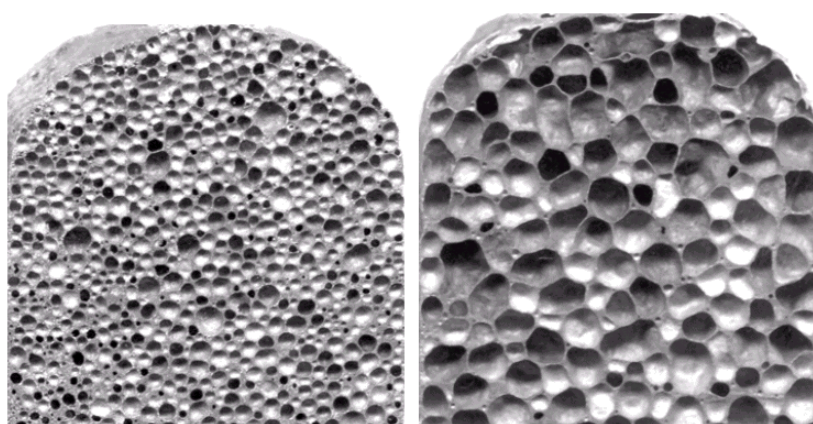
Ανοικτού τύπου



Εικόνα 1.4.1 - Αφροί με ανοικτό πορώδες.

Οι μεταλλικοί αφροί ανοικτού τύπου ή αλλιώς μεταλλικοί σπόγγοι χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανταλλαγή θερμότητας, την απορρόφηση ενέργειας και την διάχυση ρευστών. Η μεγάλη επιφάνεια που προσφέρουν σε σχέση με το πολύ χαμηλό τους βάρος και η δυνατότητα μερικών μεταλλικών σπόγγων να ενώνονται με το υδρογόνο (H) κατά την χημική αντίδραση, τα καθιστά κατάλληλα για την δημιουργία καταλυτών. Στις περιπτώσεις όπου οι πόροι είναι τόσο μικροί ώστε να είναι αδύνατη η οποιαδήποτε επέμβαση σε αυτούς, οι εν λόγω μεταλλικοί αφροί χρησιμοποιούνται ως φίλτρα στην χημική βιομηχανία.

Κλειστού τύπου



Εικόνα 1.4.2 - Αφροί με κλειστό πορώδες.

Οι μεταλλικοί σπόγγοι κλειστού τύπου αρχικά χρησιμοποιήθηκαν ως αποσβεστήρες κρούσεων όπως και τα κεραμικά υλικά, αλλά για μεγαλύτερα φορτία. Το χαμηλό τους βάρος, συγκριτικά με αυτό του συμπαγούς υλικού, αντιστοιχεί μόλις στο 10 – 25% της αρχικής πυκνότητας κυρίως του αλουμινίου. Όπως συμβαίνει και με τους υπόλοιπους μεταλλικούς αφρούς, είναι ανακυκλώσιμοι και άφλεκτοι, ενώ ξεχωρίζουν χάριν της ιδιότητάς τους να επιπλέουν [6, 12].

1.4.1 Ιδιότητες μεταλλικών αφρών

Οι μεταλλικοί αφροί αποτελούν πορώδη υλικά που διακρίνονται για τις μοναδικές ιδιότητές τους, λόγω του μεταλλικού τους πλέγματος αλλά και της κυψελοειδούς δομής που φέρουν. Η χαμηλή τους πυκνότητα, η μειωμένη αντοχή τους σε σχέση με τα υλικά από τα οποία προέρχονται, η περιορισμένη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα που παρουσιάζουν, αλλά και η ικανότητά τους να παραμένουν άφλεκτοι και μη τοξικοί είναι μόνο μερικές από αυτές. Εν συνεχεία, γίνεται μία παρουσίαση των μηχανικών, φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των πορώδων μετάλλων [6, 7, 11].

Μηχανικές ιδιότητες

Η χρήση των μεταλλικών αφρών στις διάφορες εφαρμογές καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις μηχανικές τους ιδιότητες. Οι σημαντικότερες αυτών είναι: i) το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus), ii) η τάση σταθεροποίησης του υλικού (plateau stress) και iii) η μόνιμη παραμόρφωσή του (onset strain of densification).

Οι παράμετροι που καθορίζουν τις μηχανικές ιδιότητες των μεταλλικών αφρών είναι:

- Οι ιδιότητες του μητρικού μετάλλου
- Η σχετική πυκνότητα του αφρού
- Ο τύπος του πορώδους (ανοικτού ή κλειστού τύπου)

- Η διαβάθμιση του ποσοστού της μάζας - οι ανομοιομορφίες στην κατανομή της μάζας
- Το μέγεθος και η κατανομή των πόρων
- Το σχήμα των πόρων και η ανισοτροπία του σχήματός τους
- Η διασυνδεσιμότητα των κυτταρικών τοιχωμάτων
- Η εμφάνιση ατελειών λόγω ρηγμάτωσης ή παραμόρφωσης των πόρων

Η μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των μεταλλικών αφρών αποσκοπεί στον προσδιορισμό της μηχανικής τους αντοχής, χαρακτηριστικό που υποδεικνύει το πεδίο εφαρμογής τους. Όσο μεγαλύτερη ομοιομορφία παρουσιάζει η δομή του πορώδους υλικού τόσο μεγαλύτερη εμφανίζεται η μηχανική του αντοχή. Με βάση την παραπάνω παρατήρηση, ατέλειες όπως η συσσώρευση υλικού στους κόμβους των κελιών, οι συγχωνεύσεις κελιών, οι πτυχωτικές αναδιπλώσεις, οι κυρτωτικές διαβαθμίσεις και η ανομοιομορφή κατανομή της πυκνότητας αναμένεται να υποβαθμίσουν την μηχανική συμπεριφορά του πορώδους υλικού [5, 6, 13, 17].

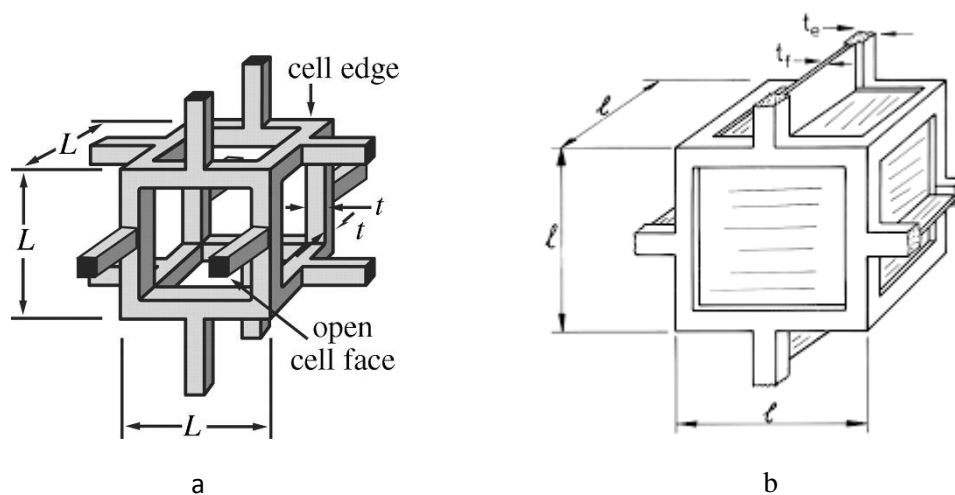
Η εισαγωγή τασιενεργών σωματιδίων στην δομή του βασικού μετάλλου μπορεί να τροποποιήσει σε μεγάλο βαθμό τις μηχανικές του ιδιότητες. Τα συγκεκριμένα σωματίδια δύνανται είτε να αντιδράσουν με το ενεργό μέταλλο ώστε να παραχθεί στερεό διάλυμα, είτε να παραμείνουν ανενεργά και να συσσωρευτούν μεταξύ των πόρων ή στα κυτταρικά τοιχώματα. Με αυτόν τον τρόπο, η παρένθεση των τασιενεργών σωματιδίων στην μεταλλική μήτρα αναμένεται να αυξήσει την μέση διάμετρο των πόρων.

Μία άλλη παράμετρος που επηρεάζει την αντοχή ενός μεταλλικού αφρού είναι η εξωτερική του επιφάνεια και αυτό γιατί λειτουργεί σαν μέσο σκλήρυνσης. Αν η πυκνή εξωτερική επιφάνεια αφαιρεθεί με κατεργασία κοπής, η τιμή της αντοχής του δοκιμίου αναμένεται να είναι χαμηλότερη σε σχέση με πριν. Αντίστροφη συμπεριφορά παρατηρείται στις περιπτώσεις όπου η εξωτερική επιφάνεια ενισχύεται με φύλλα μετάλλων (αλουμινίου, σιδήρου) στην προσπάθεια να καταστεί ο αφρός ανθεκτικότερος. Κατά αντιστοιχία, τα

πορώδη μέταλλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικό πλήρωσης του εσωτερικού των σωλήνων, με στόχο την επέκταση των επιπέδων αντοχής και ακαμψίας [6, 7, 9].

Μοντέλο Gibson-Ashby

Για τον καθορισμό των καταστατικών εξισώσεων μεταξύ της δομής των αφρών και των μηχανικών ιδιοτήτων τους, αναπτύχθηκαν διάφορα αριθμητικά μοντέλα με πιο διαδεδομένο εκείνο των Gibson-Ashby. Οι παράμετροι εξέτασης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η σχετική πυκνότητα, ο τύπος δομής του αφρού και οι ιδιότητες του υλικού βάσης του. Σύμφωνα με τους Gibson-Ashby, η δομή του αφρού θεωρείται ότι αποτελείται από περιοδικά κατανεμημένες κυβικές μοναδιαίες κυψελίδες, οι οποίες με την σειρά τους αποτελούνται από τετραγωνικές δοκίδες ίσου πάχους.



Εικόνα 1.4.1.1 - α) Ανοικτού και β) κλειστού τύπου κυψελίδα.

Για τα δύο είδη που εμφανίζονται στην Εικόνα 1.4.1.1, η παραμόρφωση επιτυγχάνεται με διαφορετικό τρόπο. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των αφρών ανοικτού τύπου πραγματοποιείται μέσω της κάμψης των δοκών, ενώ σε εκείνη του κλειστού τύπου συμπεριλαμβάνεται και η τάνυση της επίπεδης επιφάνειας του κελιού. Με δεδομένα τα παραπάνω, τα μέτρα ελαστικότητας και οι τάσεις πλαστικής παραμόρφωσης αντίστοιχα υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους:

- Μέτρα ελαστικότητας ανοικτού τύπου

$$\frac{E_f}{E_s} = C_1 \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^2$$

όπου E_f το μέτρο ελαστικότητας του αφρού, E_s το μέτρο ελαστικότητας συμπαγούς μετάλλου, C_1 η σταθερά που εξαρτάται από την δομή-μορφολογία του κελιού, ρ_f η πυκνότητα του αφρού και ρ_s η πυκνότητα του συμπαγούς μετάλλου.

- Μέτρο ελαστικότητας κλειστού τύπου

$$\frac{E_f}{E_s} \approx \varphi^2 \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^2 + (1 - \varphi) \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \right) + \frac{p_o(1 - 2\nu_f)}{E_s \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)}$$

όπου φ το κλάσμα στερεού στις ακμές των κυττάρων και ν_f ο λόγος Poisson του αφρού.

- Τάση πλαστικής παραμόρφωσης ανοικτού τύπου

$$\frac{\sigma_{pl,f}}{\sigma_{y,s}} \approx 0,3 \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{ή} \quad \frac{\sigma_{pl,f}}{\sigma_{y,s}} \approx 0,23 \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} \left[1 + \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

όπου $\sigma_{pl,f}$ η τάση Plateau του αφρού και $\sigma_{y,s}$ η τάση διαρροής του συμπαγούς μετάλλου.

- Τάση παραμόρφωσης κλειστού τύπου

$$\frac{\sigma_{pl,f}}{\sigma_{y,s}} \approx 0,3 \left(\varphi \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} + (1 - \varphi) \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \right) + \frac{P_o - P_{atm}}{\sigma_{y,s}}$$

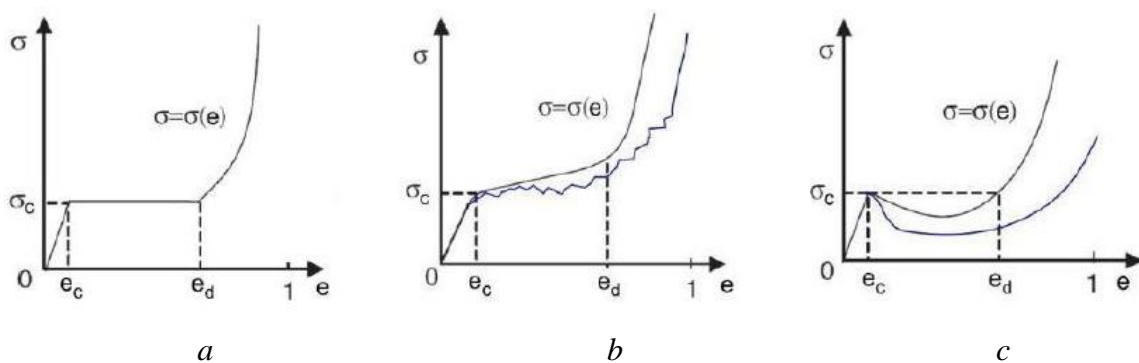
όπου P_o η πίεση του αερίου που περιέχεται στον αφρό και P_{atm} η ατμοσφαιρική πίεση.

Για την μελέτη της μηχανικής τους απόκρισης οι μεταλλικοί αφροί υποβάλλονται σε δοκιμές θλίψεως, αντίθετα με τα συμπαγή μέταλλα που υπόκεινται σε δυναμική απόκριση μονοαξονικού εφελκυσμού, λόγω της κυψελοειδούς τους μορφής [6, 9,10, 14, 17].

Μονοαξονική θλιπτική παραμόρφωση των μεταλλικών αφρών

Κατά την μονοαξονική θλιπτική παραμόρφωση οι κυψελίδες των πορωδών μετάλλων παραμορφώνονται ανάλογα με τον τύπο της δομής τους, όπως εξηγήθηκε από τους Gibson-Ashby. Η ιδανική συμπεριφορά, ανεξαρτήτως τύπου, παρατηρείται όταν η κατάρρευση των τοιχωμάτων των κελιών πραγματοποιείται ταυτόχρονα με την πλαστική παραμόρφωση.

Προκειμένου να εξετάσει κανείς μηχανικά την απόκριση των κυψελοειδών μετάλλων στην μονοαξονική θλίψη, αρκεί να παρατηρήσει την συμπεριφορά των δοκιμίων μέσα από το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα, για τους μεταλλικούς αφρούς διακρίνονται τρεις διαφορετικές κατηγορίες (Εικόνα 1.4.1.2) : η ελαστική-πλαστική απόκριση, η απόκριση με χαρακτηριστικά ενδοτράχυνσης και η απόκριση με χαρακτηριστικά χαλάρωσης παραμόρφωσης.



Εικόνα 1.4.1.2 - a) Ελαστική-πλαστική απόκριση, b) Απόκριση με χαρακτηριστικά ενδοτράχυνσης, c) Απόκριση με χαρακτηριστικά χαλάρωσης παραμόρφωσης.

Στα διαγράμματα των παραπάνω κατηγοριών οι καμπύλες απόκρισης εμφανίζουν τρεις διακριτές περιοχές. Αρχικά παρατηρείται μια σχεδόν γραμμική συμπεριφορά της παραμόρφωσης, η οποία στην συνέχεια σταθεροποιείται και στην τελευταία φάση αυξάνεται απότομα. Τα αντίστοιχα διαστήματα αλλαγής της συμπεριφοράς του αφρού ονομάζονται ελαστική περιοχή, περιοχή σταθεροποίησης (plateau) και περιοχή πύκνωσης.

Στην ελαστική περιοχή η γραμμικότητα της σχέσης υποδηλώνει την αναστρέψιμη παραμόρφωση του αφρού. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως το δοκίμιο δύναται να επανέλθει

στην προγενέστερη μορφή του με αντίστοιχη μείωση της επιβαλλόμενης τάσης. Κατά τόπους βέβαια είναι πιθανό να ξεπεραστεί το όριο διαρροής της τάσης, με την επερχόμενη παραμόρφωση να είναι μη αναστρέψιμη (πλαστική). Η εμφάνιση του παραπάνω φαινομένου μπορεί να αποδοθεί στην πολυπλοκότητα και την ανομοιογένεια του πορώδους και οδηγεί στην μείωση του μέτρου ελαστικότητας. Γι' αυτό τον λόγο το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από την κλίση του γραμμικού τμήματος στην ελαστική περιοχή ή από την κλίση της καμπύλης που δίνει την αποφόρτιση του αφρού ύστερα από την φόρτίσή του μέχρι την πλαστική περιοχή.

Στην πλαστική περιοχή (περιοχή plateau), το δοκίμιο του πορώδους υλικού αρχίζει να παραμορφώνεται μη αναστρέψιμα με λυγισμό και κάμψη των κυτταρικών τοιχωμάτων. Η περιοχή plateau εκτείνεται από την τάση θλίψης σ_c μέχρι την παραμόρφωση ε_d . Η απόσταση που καλύπτει η πλαστική περιοχή εξαρτάται από την ομοιομορφία και διακύμανση της δομής, την σχετική πυκνότητα του αφρού και την κυτταρική μορφολογία. Ανάλογα με την απόκριση του μεταλλικού υλικού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.4.1.2, σχηματίζεται η κλίση της περιοχής plateau. Στην περίπτωση της ελαστικής-πλαστικής απόκρισης, η κλίση είναι μηδενική και η τάση σταθεροποιείται. Στις περιπτώσεις της ενδοτράχυνσης/χαλάρωσης η κλίση μεταβάλλεται με αντίστοιχη αυξανόμενη/μειούμενη τιμή της τάσης.

Με την επιβολή μεγαλύτερης τάσης από εκείνη που αντιστοιχεί στην παραμόρφωση ε_d , οι πόροι κλείνουν και παρατηρείται πύκνωση του υλικού. Η κλίση της καμπύλης στην περιοχή αυτή αυξάνεται απότομα και στις τρεις περιπτώσεις μηχανικής απόκρισης. Η τιμή της τάσης για τον μηχανισμό της ενδοτράχυνσης εναλλάσσεται συνεχώς λίγο πριν το υλικό εμφανίσει ψαθυρότητα, ενώ για τον μηχανισμό χαλάρωσης παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά όταν η κλίση της τάσης εντός της περιοχής αυξηθεί ραγδαία. Τόσο στην περιοχή plateau όσο και σε εκείνη της πύκνωσης, οι περιπτώσεις μεταλλικών αφρών με χαρακτηριστικά ενδοτράχυνσης-χαλάρωσης παραμόρφωσης δύνανται να παρουσιάσουν ψαθυρή συμπεριφορά εξαιτίας της απόκρισης του συνόλου του πορώδους και όχι λόγω ψαθυρότητας του ίδιου του υλικού [9, 10, 14].

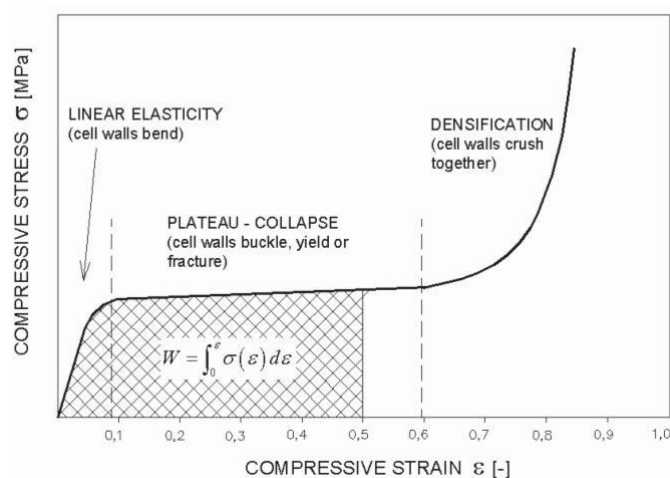
Απορρόφηση ενέργειας

Κατά την επιβολή τάσης σε ένα ιδανικό πορώδες υλικό, η απορροφούμενη από αυτό ενέργεια υπολογίζεται από το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για ελαστικοπλαστική

απόκριση. Το ποσό της ενέργειας αντιστοιχεί στο εμβαδόν του ορθογωνίου παραλληλογράμμου που καθορίζεται από την μέγιστη τιμή τάσης σ_d και την παραμόρφωση ϵ_d .

Το έργο που απαιτείται για να παραμορφωθεί ένα δεδομένο πορώδες δοκίμιο μέχρι ένα συγκεκριμένο ποσοστό, αντιστοιχεί στο ολοκλήρωμα της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης μέχρι την τιμή παραμόρφωσης ϵ_0 , το οποίο ορίζεται ως εξής:

$$W = \int_0^{\epsilon_0} \sigma(\epsilon) d\epsilon$$



Εικόνα 1.4.1.3 - Απορροφούμενη ενέργεια από τα κυψελοειδή υλικά.

Με βάση τα προαναφερθέντα, ως απόδοση απορρόφησης ενέργειας η ορίζεται ο λόγος της ενέργειας που απορροφάται από ένα υλικό προς την ενέργεια που θα απορροφούσε εάν αποκρινόταν ιδανικά. Κατά συνέπεια:

$$\eta = \frac{A_{\text{real}}}{A_{\text{ideal}}} = \frac{\int_0^{\epsilon_d} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\sigma_d \epsilon_d}$$

όπου η ο συντελεστής απόδοσης, A_{real} το ποσό ενέργειας που απορροφάται από το πραγματικό υλικό και A_{ideal} το ποσό ενέργειας που θα απορροφούσε το ιδεατό υλικό.

Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ενός μεταλλικού αφρού επηρεάζεται από την σχετική του πυκνότητα, το όριο αντοχής του, την μορφολογία των κυττάρων του αλλά και τις

διαστάσεις του. Ένας άλλος παράγοντας που καθορίζει το παραπάνω έργο είναι το είδος της επιβαλλόμενης φόρτισης που μπορεί να πραγματοποιείται είτε στατικά είτε δυναμικά [6, 8, 9, 14].

Φυσικές ιδιότητες

Κάποιες από τις φυσικές ιδιότητες των μεταλλικών αφρών οφείλονται στο μεταλλικό τους πλέγμα, γι' αυτό συναντώνται και στα συμπαγή μέταλλα, ενώ άλλες αποδίδονται στην κυψελοειδή τους μορφή γεγονός που τα ξεχωρίζει από τα δεύτερα και διευρύνει το φάσμα εφαρμογής τους.

Η θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα των κυψελοειδών μετάλλων κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα σε σχέση με τα μέταλλα υψηλής πυκνότητας, λόγω του ότι μεγάλο μέρος του όγκου τους καταλαμβάνεται από αέρια. Επιπλέον, το στρώμα οξειδίου που καλύπτει την μεγάλη επιφάνεια αυτών μειώνει ακόμη περισσότερο την αγωγιμότητα για τους αφρούς, γεγονός που τους καθιστά κατάλληλους ως μονωτές για τις αντίστοιχες εφαρμογές. Οι μεταλλικοί σπόγγοι παρουσιάζουν σταθερή συμπεριφορά σε θερμοκρασία χαμηλότερη του σημείου τήξης του μετάλλου βάσης τους, ενώ κατά την διαστολή τους παρατηρείται πολύ μικρή διόγκωση.

Μία άλλη σημαντική ιδιότητα των μεταλλικών αφρών είναι η ανάκλαση των ηχητικών κυμάτων στα τοιχώματα του πορώδους τους. Με αυτόν τον τρόπο η ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική στο εσωτερικό και ο ήχος εξασθενεί. Σαν μονωτές ήχου οι αφροί ανοικτού τύπου πλεονεκτούν έναντι των κλειστών. Από την άλλη, οι δεύτεροι έχουν μεταξύ άλλων την ικανότητα να επιπλέουν στο νερό [6, 8].

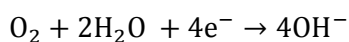
Χημικές ιδιότητες

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως τα πορώδη μέταλλα είναι άφλεκτα, ενώ παράλληλα κατά την αύξηση της θερμοκρασίας τους δεν εκπέμπουν τοξικές ουσίες. Χάριν της συγκεκριμένης ιδιότητάς τους αλλά και της μεγάλης ανακυκλωσιμότητάς τους, τα παραπάνω υλικά χαρακτηρίζονται ως οικολογικά.

Πέραν όμως των προαναφερθέντων ιδιοτήτων, όπως για τα συμπαγή μέταλλα έτσι και για τα κυψελοειδή, με την πάροδο του χρόνου παρατηρείται αρνητική επίδραση του περιβάλλοντος σε αυτά με την μορφή διάβρωσης. Το ηλεκτροχημικό αυτό φαινόμενο δύναται να ενεργήσει στην εξωτερική επιφάνεια των μεταλλικών αφρών και να επιφέρει την υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους. Η διάβρωση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με την παρουσία αερίων σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, είτε με την παρουσία υγρού διαλύματος όπου παρατηρούνται οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις.

Στην πρώτη περίπτωση, η οποία καλείται ξηρή διάβρωση, από την χημική αντίδραση μεταξύ αερίου και μετάλλου σχηματίζεται ένα στρώμα οξειδίου στην επιφάνεια του δεύτερου, με αποτέλεσμα την απώλεια υλικού και την τροποποίηση των ιδιοτήτων του. Κατά την υγρή διάβρωση τα άτομα του μεταλλικού υλικού χάνουν ηλεκτρόνια, τα οποία μετασχηματίζονται σε ιόντα στο υγρό διάλυμα, τον ηλεκτρολύτη, όπου σχηματίζουν σταθερές ενώσεις με τα ετερώνυμα ιόντα.

Στην υγρή διάβρωση δύο είναι οι χαρακτηριστικές θερμοδυναμικές καταστάσεις, η άνοδος και η κάθοδος. Στην πρώτη παρατηρείται απώλεια μάζας του μετάλλου το οποίο εισέρχεται στο διάλυμα, ενώ στην δεύτερη το μέταλλο προστατεύεται. Οι δυο καταστάσεις μπορούν να συνυπάρξουν ταυτόχρονα εξαιτίας των διαφορών στην μικροδομή του μετάλλου ή της ανομοιογένειας και ετεροτροπίας του περιβάλλοντος. Η οξειδοαναγωγική αντίδραση που πραγματοποιείται κατά την υγρή διάβρωση μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο ημιαντιδράσεις, την οξειδωτική και την αναγωγική. Οξειδωτική αντίδραση παρατηρείται κατά την πρόσληψη οξυγόνου ή απομάκρυνση υδρογόνου, ενώ αναγωγική παρατηρείται όταν συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο. Τα οξειδωτικά μέσα προσλαμβάνουν ηλεκτρόνια και προκαλούν οξείδωση σε μία ένωση καθώς τα ίδια ανάγονται, ενώ τα αναγωγικά οξειδώνονται με απώλεια ηλεκτρονίων καθώς ανάγουν μια άλλη ένωση. Η κυρίαρχη αντίδραση σε περιβάλλον παρουσίας οξυγόνου είναι η αντίδραση απορρόφησης οξυγόνου



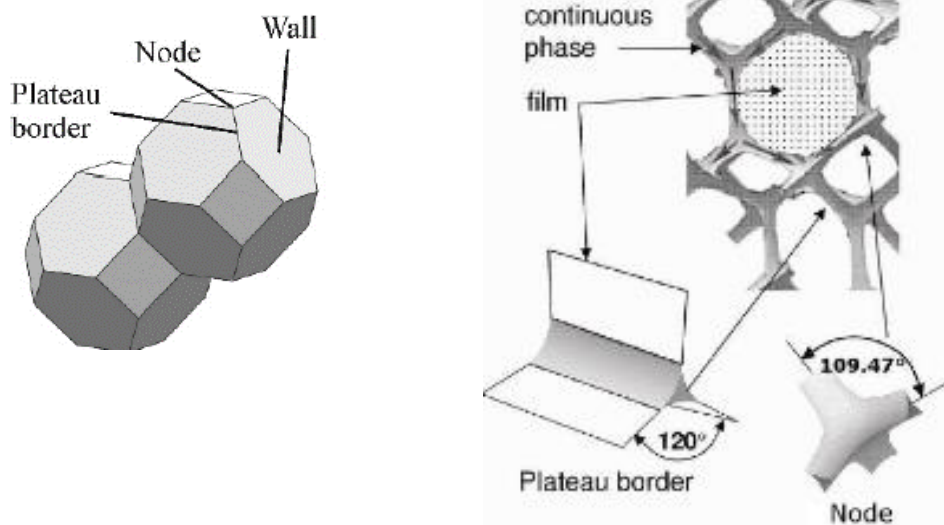
Αντίθετα, σε περιβάλλον υδρογόνου η βασική αντίδραση είναι εκείνη της παραγωγής υδρογόνου:



καθώς η περιοχή ανόδου συνεχίζει να διαβρώνεται [15].

1.4.2 Δομή αφρών

Για την δημιουργία στερεών αφρών είναι αναγκαία η συσσώρευση αερίου με την μορφή φυσαλίδων εντός του υγρού μίγματος. Σε θεωρητικό επίπεδο οι εν λόγω φυσαλίδες εξετάζονται ως κύτταρα εντός του αφρού, τα οποία πλαισιώνονται από τα κυτταρικά τοιχώματα (Cell walls), τα όρια Plateau και του κόμβους (Nodes). Τα κυτταρικά τοιχώματα αποτελούν τις επιφάνειες που διαχωρίζουν δύο φυσαλίδες, με μήκος περίπου ίσο με την διάμετρο της μέσης φυσαλίδας, πλάτος αρκετά μικρότερο αυτής και καμπυλότητα αισθητά μικρότερη της μέσης καμπυλότητας δύο γειτονικών φυσαλίδων. Οι περιοχές όπου τα κυτταρικά τοιχώματα συνορεύουν καλούνται όρια Plateau, τα οποία με την σειρά τους αλληλοσυνδέονται ακανόνιστα και στο σημείο διασταύρωσής τους δημιουργούν τους κόμβους. Αξίζει να σημειωθεί πως για την δημιουργία ενός κόμβου απαιτούνται τουλάχιστον 4 όρια Plateau.

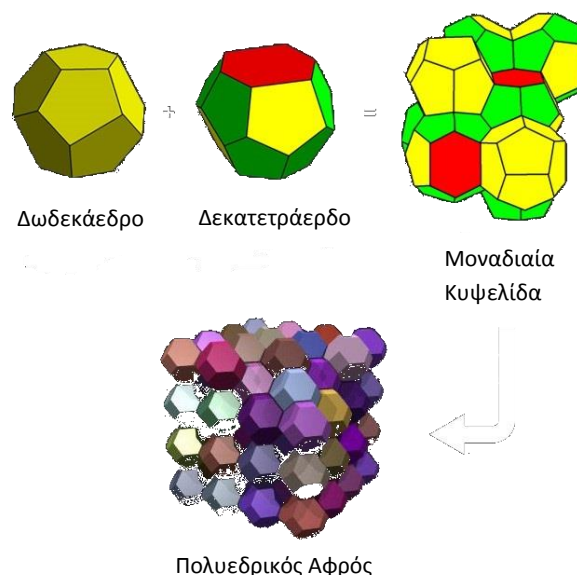


Εικόνα 1.4.2.1 - Σχηματική αναπαράσταση της κυψελοειδούς δομής.

Η κυτταρική δομή των αφρών καθορίζεται από την εσωτερική επιφανειακή ενέργεια, η οποία είναι επιθυμητό να είναι η ελάχιστη δυνατή, καθώς επίσης και την σύνδεση των κυττάρων του με την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη πληρότητα του χώρου. Με δεδομένες τις δύο παραπάνω παραμέτρους, το μοντέλο του Kelvin κατάφερε να παρουσιάσει την δομή ενός ιδεατού αφρού ελαχιστοποιώντας, για τα μέχρι τότε δεδομένα, την ενέργεια του κυττάρου. Στην συνέχεια, το μοντέλο του Kelvin υπερκεράστηκε από εκείνο των Weaire-

Rhelan. Έπειτα από αρκετές τεχνικές μοντελοποίησης, όπου το ζητούμενο ήταν η ελαχιστοποίηση της επιφανειακής ενέργειας του κυττάρου του αφρού, το μοντέλο Weaire- Rhelan (με 2 είδη πολυέδρων και 8 φυσαλίδες ανά κύτταρο) αποδείχθηκε το πιο σταθερό. Οι έρευνες ωστόσο για την εύρεση ενός ακόμη ακριβέστερου μοντέλου συνεχίζονται, καθώς δεν έχει αποδειχθεί πως το επικρατών μοντέλο είναι το βέλτιστο.

Η απεικόνιση των φυσαλίδων (Εικόνα 1.4.2.2) ως πολύεδρα που καταλαμβάνουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χώρο κατά την σύνδεσή τους αντικατοπτρίζει την δομή ενός ιδεατού αφρού, που όπως είναι σαφές δεν ταυτίζεται με τους αφρούς στην πραγματικότητα.



Εικόνα 1.4.2.2 - Σχηματική αναπαράσταση της δομής των πορωδών υλικών.

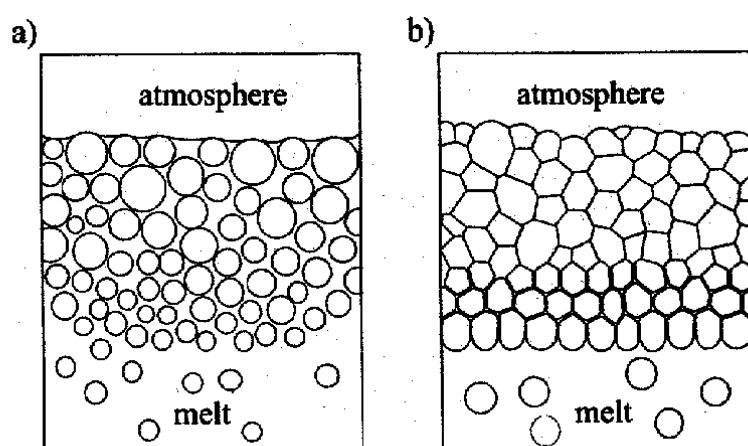
Για την κατανόηση της φύσης των μεταλλικών αφρών είναι αναγκαία η διάκριση μεταξύ δύο οριακών καταστάσεων στο εσωτερικό των πορωδών υλικών, στις οποίες τα μείγματα παρουσιάζουν διαφορετική διάταξη, δομή και κατά συνέπεια συμπεριφορά.

Στην υψηλά υγρή κατάσταση οι φυσαλίδες παρατάσσονται απομονωμένα στο χώρο και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους ελάχιστα ή και καθόλου. Τα κυτταρικά τοιχώματα έχουν συρρικνωθεί τόσο ώστε να θεωρούνται σημεία και οι φυσαλίδες παρουσιάζονται σαν σφαιρίδια. Σε κατάσταση πέραν της υγρής (αφρός με κλάσμα υγρού >64%) οι φυσαλίδες

πλέουν στο μίγμα με σχετική ευκολία και στον περιβάλλοντα χώρο τους συναντούν υγρές ή στερεές μάζες.

Αντίθετα, στην ξηρή κατάσταση η φάση του κλάσματος του υγρού προσεγγίζει την μηδενική τιμή και αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι το υγρό στοιχείο βρίσκεται μονάχα στις συνοριακές γραμμές των πόρων, οι οποίοι σχηματίζουν ακανόνιστα πολύεδρα. Στην συγκεκριμένη κατάσταση ο αφρός υπακούει στους νόμους Plateau και Euler, κατά τους οποίους οι όψεις το πολύ τριών φυσαλίδων συναντώνται σε μια ακμή κυττάρου και το μέγιστο τρεις ακμές διασταυρώνονται σε έναν κόμβο.

Στην πραγματικότητα οι αφροί βρίσκονται σε μία κατάσταση ενδιάμεση των δύο προαναφερθέντων. Για την ακρίβεια πλησιάζουν αυτή των “ξηρών αφρών” με ελαφρώς πιο παχιά τείχη και κόμβους.



Εικόνα 1.4.2.3 - Σχηματική αναπαράσταση (α) σφαιρικής-ιδεατής, (β) πολυεδρικής δομής του αφρού.

Κατά την αφροποίηση των μετάλλων η διαδικασία είναι πολυπλοκότερη και η σταθεροποίηση του τελικού προϊόντος δεν επιτυγχάνεται το ίδιο ομαλά με τα υπόλοιπα πορώδη υλικά. Η παρουσία των τασιενεργών μορίων, όπως οι πρωτεΐνες και τα πολυμερή, λειτουργούν ως σταθεροποιητικοί παράγοντες στους υδατώδεις και οργανικούς αφρούς, κάτι που όμως δεν είναι δυνατόν να συμβεί αντίστοιχα στους μεταλλικούς. Επιπλέον, η διαδικασία κατά την οποία το υγρό στοιχείο αποβάλλεται από τον αφρό (drainage) πραγματοποιείται με ταχύτερο ρυθμό στα μέταλλα, καθότι οι πυκνότητές τους είναι σημαντικά μεγαλύτερες σε

σύγκριση με τα ιζώδη τους. Κατά συνέπεια, η κατάρρευση των τοιχωμάτων του κυττάρου δύναται να επιτευχθεί γρηγορότερα για την περίπτωση των μετάλλων.

Παρά τις παραπάνω ιδιαιτερότητες η παραγωγή στερεών μεταλλικών αφρών έχει επιτευχθεί με την παρουσία σωματιδίων, που χάρη στα χαρακτηριστικά που διαθέτουν καταφέρνουν να διαχωρίσουν τις επιφάνειες στερεού-υγρού ή τις επιφάνειες δύο υγρών στην περίπτωση γαλακτώματος. Κατά κύριο λόγο τα προαναφερθέντα σωματίδια επιδρούν στους αφρούς σε συνδυασμό με την παρουσία τασιενεργών μορίων χωρίς όμως να δεσμεύονται από αυτή, διότι δύνανται από μόνα τους να εξασφαλίσουν ικανοποιητική ευστάθεια του μίγματος [5, 16].

1.4.3 Πυρηνοποίηση

Η πυρηνοποίηση των φυσαλίδων πραγματοποιείται αφού το εκτονούμενο αέριο έχει διαλυθεί στο λιωμένο μίγμα. Για τη ανάπτυξη ενός πυρήνα φυσαλίδας απαιτείται η κατανάλωση μεγάλου μέρους της επιφανειακής ενέργειας, για αυτό και στις περισσότερες περιπτώσεις η πυρηνοποίηση γίνεται με την παρουσία καταλυτών όπως μόρια, οξείδια κ.ά. Αυτού του είδους η πυρηνοποίηση καλείται ετερογενής και συναντάται πιο συχνά, καθότι η ενέργεια που απαιτείται στην περίπτωση αυτή για την δημιουργία επιφάνειας της φυσαλίδας αντισταθμίζεται μερικώς ή εξ' ολοκλήρου από την επιφάνεια του υγρού που «καταστρέφεται».

Κατά την διαμόρφωση μεταλλικών αφρών (IFM) παρατηρείται ότι η συγκέντρωση του αερίου δύναται να παρουσιάσει τοπικά μέγιστα στις περιοχές που συναντώνται τα μόρια του αφριστικού παράγοντα, όπου η ενέργεια για την δημιουργία του πυρήνα είναι μικρή. Αν η πυκνότητα του πυρήνα είναι πολύ μικρή, η μέση διάμετρος των κυττάρων του αναμένεται να είναι μεγάλη. Για την δημιουργία ποιοτικών κυτταρικών κατασκευών είναι απαραίτητη η μεγάλη πυκνότητα πυρήνα, χωρίς ωστόσο η συγκεκριμένη συνθήκη να μπορεί από μόνη της να εγγυηθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Διόγκωση-Επέκταση φυσαλίδας

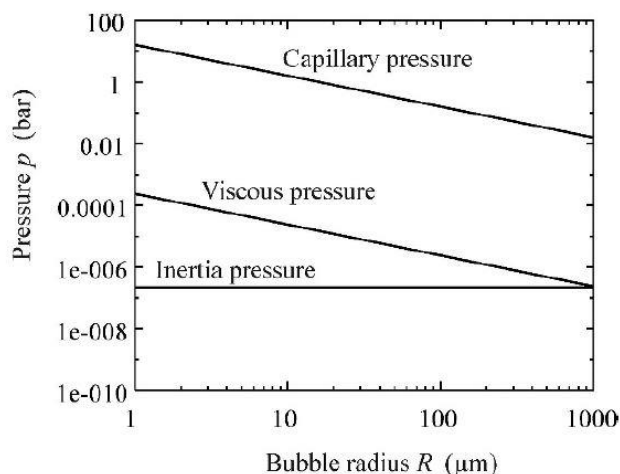
Η αύξηση του όγκου της φυσαλίδας πρέπει να κατασταλεί πριν την στερεοποίηση του μίγματος, προκειμένου να μπορέσει η φυσαλίδα να «παγιδευτεί» στον αφρό. Με άλλα λόγια, πρέπει η διαφορά πίεσης εντός και εκτός της φυσαλίδας να διασφαλίζει την αποφυγή της κατάρρευσής της πριν εκείνη εγκλωβιστεί.

Αν παρατηρήσει κανείς το πόσο γρήγορα «ταξιδεύουν» οι φυσαλίδες του νερού σε ένα μπουκάλι που μόλις έχει ανοιχθεί, μπορεί να αντιληφθεί την επίδραση των πιέσεων λόγω αδράνειας, λόγω ιξώδους του νερού και λόγω επιφανειακών τάσεων στην τελική κατάρρευση των φυσαλίδων. Για την μελέτη των διαφόρων ειδών πιέσεων, θεωρούμε μια φυσαλίδα ακτίνας R ενός ασυμπίεστου ρευστού με ιξώδες ν και πίεση (εξωτερική) p_0 . Ο τύπος που δίνει την συνολική πίεση (εσωτερική και εξωτερική) στην φυσαλίδα προκύπτει από την ισότητα του Rayleigh,

$$\underbrace{\rho R \ddot{R} + \frac{3}{2} \rho \dot{R}^2}_{\text{Inertia pressure}} + \underbrace{4\rho\nu \frac{\dot{R}}{R}}_{\text{Viscous pressure}} + \underbrace{\frac{2\sigma}{R}}_{\text{Capillary pressure}} = \underbrace{P_i - P_0}_{\text{Bubble overpressure}}$$

όπου P_i η εξωτερική πίεση που ασκεί η φυσαλίδα και εναντιώνεται στην αύξηση του όγκου της και σ η επιφανειακή τάση.

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, η διαφορά εσωτερικής-εξωτερικής πίεσης στη φυσαλίδα εξαρτάται από την πίεση αδράνειας (Inertia Pressure), την πίεση ιξώδους (Viscous Pressure) και την πίεση από τα τριχοειδή αγγεία (Capillary Pressure). Στα υγρά μέταλλα οι τρεις μορφές πιέσεων που προαναφέρθηκαν μπορούν να επιφέρουν καθυστέρηση της επέκτασης της φυσαλίδας και μάλιστα, κυρίαρχο ρόλο σε αυτή τη διαδικασία κατέχει η τελευταία μορφή πίεσης, όπως γίνεται αντιληπτό από το παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 1.4.3.1 - Επίδραση των πιέσεων κατά την επέκταση της φυσαλίδας ($\dot{R} = 2.5 \text{ mm/s}$, $v = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$, $\sigma = 0.8 \text{ N/m}$, $\rho = 2.4 \text{ g/cm}^3$).

Στα υγρά-αέρια οι φυσαλίδες αναδύονται αρκετά γρήγορα και αυτό το φαινόμενο μπορεί να οδηγήσει σε μια σημαντική διακύμανση της πυκνότητας κατά την διαμόρφωση των μεταλλικών αφρών. Στα μόνιμα υγρά-αέρια οι φυσαλίδες, λόγω βαρύτητας, φτάνουν σε μια σταθερή ταχύτητα όταν η ωθούσα δύναμη ισορροπήσει με την πλευστότητα. Όταν η παραμόρφωση της φυσαλίδας είναι αμελητέα, η ταχύτητα με την οποία αναδύεται η φυσαλίδα δίνεται από τον τύπο του Stokes:

$$v = \frac{gR^2}{3\nu}$$

Βάσει του προηγούμενου τύπου, όπου η ταχύτητα είναι ανάλογη του τετραγώνου της ακτίνας, καθίσταται προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα μιας φυσαλίδας τόσο γρηγορότερα αυτή αναδύεται. Η απόσταση δε που δύναται να καλύπτει η φυσαλίδα υπολογίζεται από το παρακάτω ολοκλήρωμα:

$$d = \int_0^{t_f} v(R(t))dt = \int_0^{t_f} \frac{g}{3\nu} R^2 dt = \frac{g}{9\nu} \dot{R}^2 t_f^3 = \frac{g}{9\nu} R_f^2 t_f$$

Η διόγκωση των φυσαλίδων σε συνδυασμό με την κίνησή τους έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη υδροδυναμικών φορτίσεων εντός του ρευστού. Λόγω των παραγόμενων αυτών φορτίσεων οι φυσαλίδες τείνουν να παραμορφωθούν εκ νέου και να χάσουν την σφαιρικότητά τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργηθούν επιφανειακές τάσεις, οι

οποίες τείνουν να αποκαταστήσουν την σφαιρικότητα των φυσαλίδων προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν την επιφανειακή ενέργεια [2].

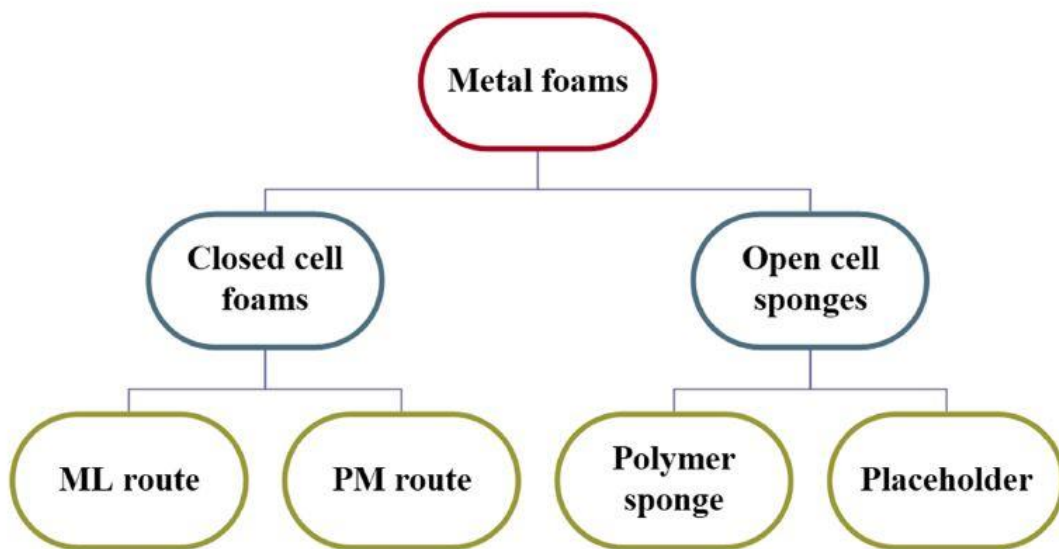
1.4.4 Μέθοδοι παρασκευής μεταλλικών αφρών

Στην προσπάθεια παρασκευής κυψελοειδών μεταλλικών υλικών, κυτταρικής μορφολογίας και ιδιοτήτων που να ανταποκρίνονται στις εκάστοτε εφαρμογές, έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς διάφορες τεχνικές. Σε αρκετές περιπτώσεις, παρόλο που αλλάζουν οι παράμετροι της διαδικασίας, η μεθοδολογία παραμένει ίδια και αυτό είναι το κριτήριο με βάση το οποίο κατηγοριοποιούνται οι μέθοδοι.

Σύμφωνα με τον Banhart [7], ο διαχωρισμός στους τρόπους παρασκευής των μεταλλικών αφρών αφορά την αρχική φάση στην οποία βρίσκεται το υπό επεξεργασία μέταλλο. Ακολούθως οι εν λόγω αφοροί μπορούν προέρχονται από:

- Μεταλλική πούδρα
- Τήγμα μετάλλου
- Ατμό μετάλλου ή Αέριο μεταλλικό μίγμα
- Ιονισμένα μεταλλικά διαλύματα

Ένας διαφορετικός τρόπος διάκρισης των κατηγοριών παρασκευής πραγματοποιείται με γνώμονα τον προσδοκώμενο τύπο πορώδους του παραγόμενου αφρού, δηλαδή ανοικτού ή κλειστού τύπου. Οι κατηγορίες αυτές, όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 1.4.4.1, περιλαμβάνουν διεργασίες μεταλλικού τήγματος, κονιομεταλλουργίας, αφρών πολυμερούς και διαχωριστικών σωματιδίων [17].



Εικόνα 1.4.4.1 - Είδη και μέθοδοι παρασκευής μεταλλικών αφρών.

Οι διαδικασίες που πρόκειται να παρουσιαστούν στην συνέχεια αποτελούν τους διακριτούς τρόπους παρασκευής μεταλλικών αφρών και εμπεριέχουν ονομαστικά τις μεθόδους εκείνες που είναι εμπορικά εκμεταλλεύσιμες. Επιγραμματικά αναφέρονται οι κάτωθι:

- Αφροποίηση αλουμινίου με την εισαγωγή αερίου
- Αφροποίηση αλουμινίου με ανάδευση αφριστικού παράγοντα
- Ενοποίηση πούδρας αλουμινίου με υδρίδιο τιτανίου
- Εναπόθεση ατμών μετάλλου ή Ηλεκτροεναπόθεση
- Αφροποίηση μετάλλου από εγκλωβισμένο αέριο
- Διήθηση μετάλλου σε πολυμερικό αφρό
- Πυροσυσσωμάτωση σε κοίλες σφαίρες

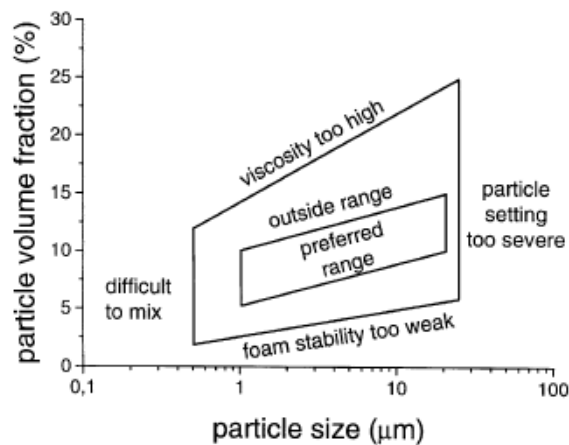
- Συμπύεση ή Χύτευση με έκπλυση
- Ευτηκτική στερεοποίηση στερεού-υγρού

Αφροποίηση υγρού μετάλλου

Αφροποίηση με εισαγωγή αερίου

Κατά την άμεση αφροποίηση ο αφρός προκύπτει από την δημιουργία φυσαλίδων εντός του μίγματος, που παραμένουν παγιδευμένες στο ρευστό μέταλλο πριν αυτό στερεοποιηθεί. Είναι χαρακτηριστικό πως στα υψηλής πυκνότητας μέταλλα, λόγω της υψηλής πλευστότητας, οι φυσαλίδες που δημιουργούνται στο εσωτερικό του μίγματος έχουν την τάση να ανέρχονται ταχέως προς στην επιφάνεια, γεγονός που υποδεικνύει την ανάγκη για αύξηση του ιξώδους του ρευστού. Κατά κύριο λόγο, η συγκεκριμένη αύξηση δύναται να προκύψει από την προσθήκη κεραμικών κόνεων ή κραματικών στοιχείων με σταθεροποιητές.

Η αφροποίηση ενός μεταλλικού τήγματος από την διοχέτευση αερίου δεν επιτυγχάνεται εύκολα στις περισσότερες περιπτώσεις των καθαρών μετάλλων. Με την προσθήκη ωστόσο σωματιδίων από οξείδιο του αλουμινίου και καρβίδιο του πυριτίου, είναι δυνατόν να επιτευχθεί ικανοποιητική αύξηση του ιξώδους του μίγματος και παράλληλα μείωση της “διαρροής” (drainage) του ρευστού. Η συμβολή των προαναφερθέντων σωματιδίων σε ποσοστά 10 – 20% καθυστερεί το υγρό στοιχείο να εξέλθει του αφρού, με αποτέλεσμα να επέρχεται η στερεοποίηση του πορώδους μετάλλου με το επιθυμητό κλάσμα ρευστού στη δομή του. Αναλυτικότερα, η επιθυμητή αντιστοιχία μεταξύ του ποσοστού συμμετοχής των σωματιδίων και της διαμέτρου αυτών στο μίγμα γίνεται αντιληπτή από την Εικόνα 1.4.4.2.



Εικόνα 1.4.4.2 - Κριτήριο επιλογής κόκκων στο μίγμα.

Έτσι, τα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν από την λανθασμένη δοσολογία, ανάλογα με το μέγεθος (μετριέται σε μm) των σταθεροποιητών που χρησιμοποιούνται κάθε φορά, είναι τα εξής [7]:

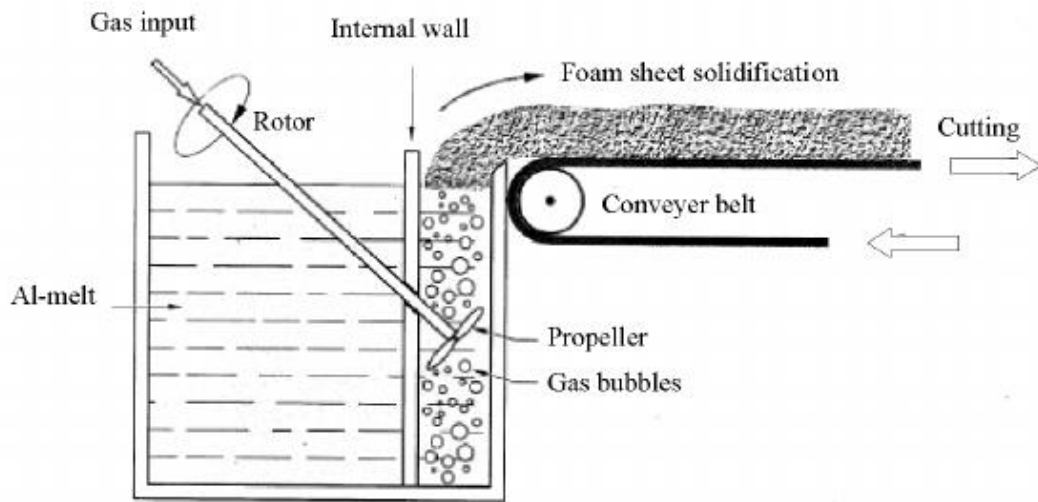
i. Κακή ανάμιξη, όταν οι κόκκοι είναι υπερβολικά μικροί σε μέγεθος και το ποσοστό τους εντός του μίγματος είναι επίσης μικρό.

ii. Αστάθεια του παραγόμενου αφρού όταν τα σωματίδια κινούνται από την μονάδα μέχρι και μία τάξη μεγέθους παραπάνω σε υπερβολικά χαμηλή συμμετοχή.

iii. Μεγάλο ιξώδες ρευστού μετάλλου όταν κινούνται γραμμικά από 10 – 25% κατ' όγκο για την διάμετρο που αναφέρθηκε και στο ii.

iv. Υπερβολική συμμετοχή των σωματιδίων στο μίγμα από σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη των 30 μm .

Τα αέρια με τα οποία εμπλουτίζεται συνήθως το λιωμένο κράμα είναι το διοξείδιο του άνθρακα, το οξυγόνο και μερικά αδρανή αέρια. Η σχετική πυκνότητα που δύναται να προκύψει από την παραπάνω διαδικασία εξαρτάται από την παροχή του εισαγόμενου αερίου, αλλά και από τον ρυθμό ψύξης του παραγόμενου αφρού [6, 7].

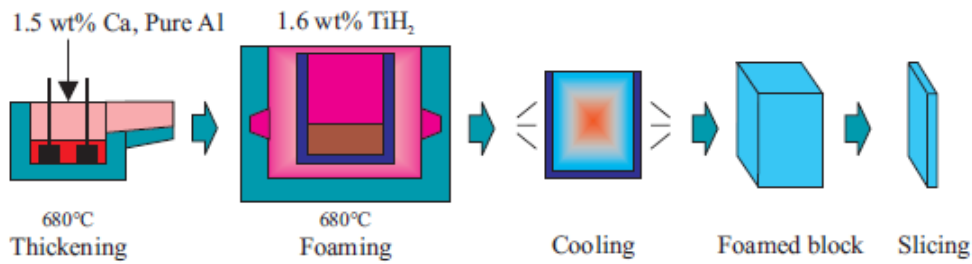


Εικόνα 1.4.4.3 - Έγχυση αερίου σε ρευστό μέταλλο.

Η μέθοδος παραγωγής μεταλλικών αφρών από την άμεση αφροποίηση του μεταλλικού τήγματος αναπτύχθηκε εμπορικά για πρώτη φορά από τις εταιρίες Alcan International Limited (Montreal, Καναδάς) και Norsk Hydro (Oslo, Νορβηγία). Σε αυτή τη μέθοδο το μίγμα προετοιμάζεται με κεραμικά σωματίδια (πχ. Καρβίδιο πυριτίου, οξείδια αλουμινίου, οξείδια μαγνησίου) από 5 – 20% κατ' όγκο, έτσι ώστε να αυξηθεί το ιξώδες του μίγματος και να επιτευχθεί η σταθεροποίηση των υγρών κυτταρικών τοιχωμάτων. Με την χρήση προπέλας ανακατεύεται το υπάρχον μίγμα με τα εισαγόμενα αέρια, τα οποία και στην συνέχεια διαλύονται σε αυτό. Καθώς αναδύονται οι φυσαλίδες στην επιφάνεια του μίγματος συλλέγονται από το αφρώδες υγρό, αφού απομακρυνθούν από την κάμινο, και αρχίζουν μαζί να στερεοποιούνται [5, 6, 7].

Αφροποίηση με χρήση αφριστικού παράγοντα

Εκτός από την έγχυση αερίου στο μεταλλικό τήγμα, όπως εξετάστηκε προηγουμένως, η αφροποίηση των μισμάτων μετάλλου είναι δυνατή μέσω της προσθήκης αφριστικού παράγοντα. Με την θέρμανση του μίγματος ο αφριστικός παράγοντας (συνήθως TiH_2) αποσυντίθεται και απελευθερώνει το αέριο (H_2 για το υδρίδιο τιτανίου) που ευθύνεται για την επικείμενη αφροποίηση του μετάλλου [6].

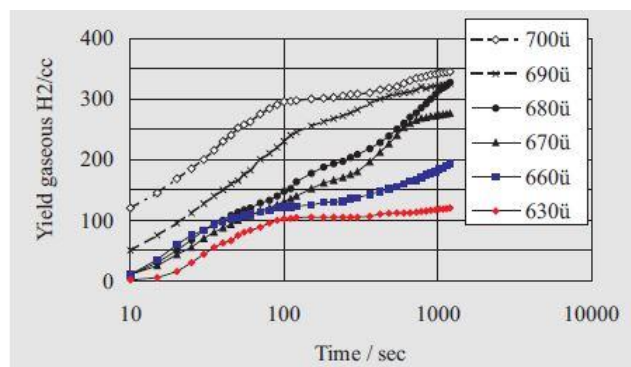


Εικόνα

1.4.4.4 - Μέθοδος "Alporas".

Η εταιρία Shinko Wire με έδρα την πόλη Amagasaki της Κίνας ανέπτυξε την πρώτη εμπορική μέθοδο, με την πιο πάνω διαδικασία, για την παραγωγή μεταλλικών αφρών. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει την προσθήκη 1.5% ασβεστίου στο τήγμα μετάλλου στους 680 °C και στην συνέχεια την ανάδευση του μίγματος για περίπου 6 λεπτά σε κανονικό περιβάλλον, ούτως ώστε να απελευθερωθούν τα οξείδια και να αυξηθεί το ιξώδες του μίγματος. Με την μετάγγιση του τήγματος σε καλούπι χύτευσης προστίθεται σε αυτό ο αφριστικός παράγοντας TiH_2 σε μορφή σκόνης και το μίγμα αναδεύεται εκ νέου. Λόγω αντίδρασης του αφριστικού παράγοντα με την αύξηση της θερμοκρασίας επέρχεται η αφροποίηση του μετάλλου, ενώ παράλληλα το υλικό καταλαμβάνει τον όγκο του καλουπιού [6, 7].

Στην Εικόνα 1.4.4.5 απεικονίζεται, για διάφορες θερμοκρασίες, ο όγκος του εκλυόμενου υδρογόνου από την διάσπαση 1 gr αφριστικού παράγοντα. Όπως γίνεται αντιληπτό, όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία τόσο περισσότερη ποσότητα υδρογόνου εκλύεται.



Εικόνα 1.4.4.5 - Ποσό εκλυόμενου υδρογόνου από διάσπαση TiH_2 .

Κατά την αφροποίηση του μεταλλικού κράματος αρκετές φυσαλίδες του περιεχόμενου υδρογόνου καταφέρνουν να απεγκλωβιστούν από το μίγμα και μόλις φτάσουν στην επιφάνεια του αφρού καίγονται. Έπειτα από παρατήρηση έχει διαπιστωθεί πως οι περισσότερες φυσαλίδες υδρογόνου, που αξιοποιούνται για την δημιουργία πόρων στο εσωτερικό του αφρού, απελευθερώνονται μετά από διάρκεια 100 δευτερολέπτων [18].

Κονιομεταλλουργία

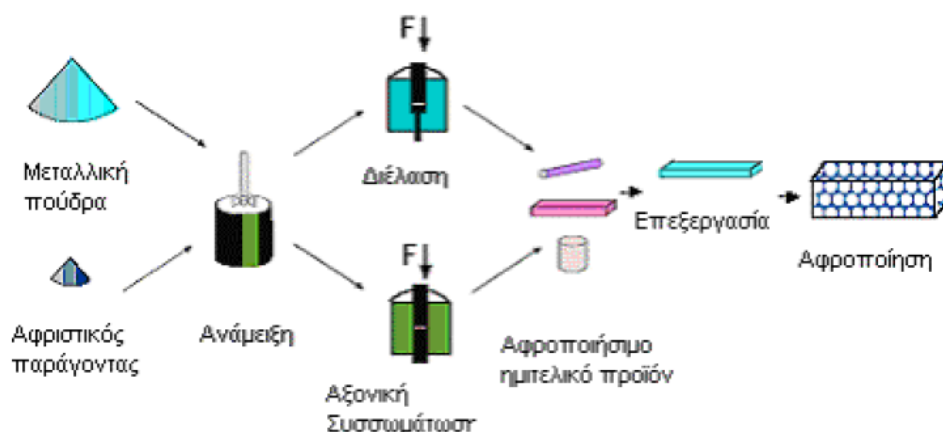
Η έννοια της κονιομεταλλουργίας στην παραγωγή αφρών αλουμινίου αφορά στην ανάμιξη κόνεων αλουμινίου ή κραμάτων του με κατάλληλα στοιχεία, ώστε να προκύψει ο αφροποιήσιμος προπομπός. Μετά την δημιουργία του κράματος, στο οποίο μεταξύ άλλων περιέχεται και κάποιος αφριστικός παράγοντας, ο αφροποιήσιμος προπομπός υφίσταται διάφορες μηχανουργικές κατεργασίες ή παραλλαγές αυτών πριν να αφροποιηθεί. Στην συνέχεια, με την αύξηση της θερμοκρασίας άνω της θερμοκρασίας τήξεως ο αφριστικός παράγοντας αντιδρά και εκλύει το αέριο που εμφανίζεται εντός του μίγματος με την μορφή φυσαλίδων. Με την αφροποίηση ο παραγόμενος αφρός προκύπτει από την διόγκωση του μίγματος, το οποίο παίρνει το επιθυμητό σχήμα μέσα σε κοίλο καλούπι [6, 7].

Η τεχνική της κονιομεταλλουργίας δεν εφαρμόζεται μοναχά στην περίπτωση του αλουμινίου και των αφρών του, αλλά και σε άλλα μέταλλα λόγω της ευελιξίας που προσφέρει κατά την δημιουργία κραμάτων χωρίς την απαραίτητη προσθήκη σταθεροποιητών. Από την άλλη, το ιδιαίτερα μεγάλο κόστος σε συνδυασμό με την ανομοιομορφία των αποτελεσμάτων που προσφέρει καθιστούν τα βασικά της ελαττώματα. Όσον αφορά το δεύτερο μέρος της παραγωγής μεταλλικών αφρών με την εν λόγω τεχνική, δηλαδή εκείνο της αφροποίησης, κυρίαρχο ρόλο στο αποτέλεσμα κατέχει ο χρόνος και η θερμοκρασία στην οποία εκτίθεται το εκάστοτε δοκίμιο [6, 7, 17].

Παραγωγή από μεταλλικές πούδρες

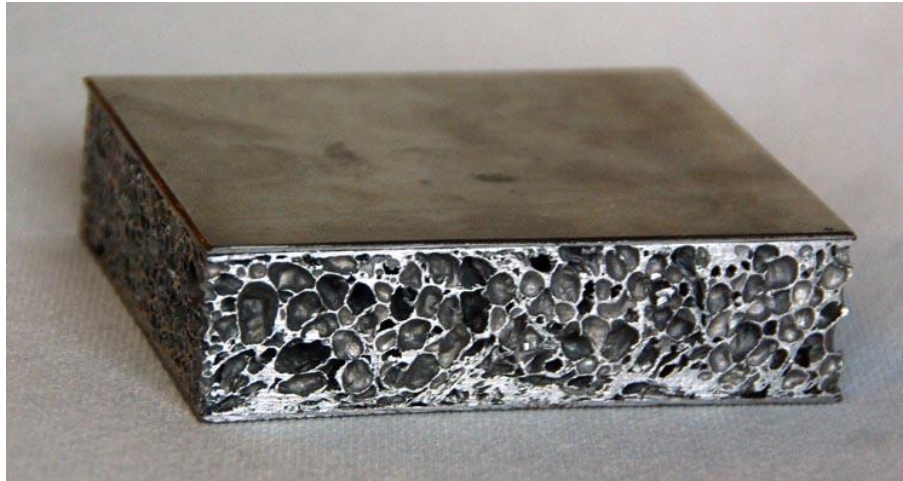
Η συγκεκριμένη μέθοδος παρασκευής μεταλλικών αφρών (Εικόνα 1.4.4.6), παρόλο που πραγματοποιήθηκε το 1950, είναι παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται σήμερα στην αγορά. Το μέταλλο βρίσκεται σε στερεή κατάσταση (σκόνη) και αναμιγνύεται με τον

αφριστικό παράγοντα, που συνήθως συναντάται σε ποσοστό 0.5 – 1.0% κατά βάρος. Για τα κράματα ψευδαργύρου και αλουμινίου χρησιμοποιούνται ως αφριστικοί παράγοντες τα υδρίδια τιτανίου και ζirkονίου αντίστοιχα.



Εικόνα 1.4.4.6 - Ανάμειξη μετάλλου-αφριστικού παράγοντα με Κονιομεταλλουργία.

Αφού προετοιμαστεί η μεταλλική σκόνη γίνεται η ενοποίηση της με τα υπόλοιπα στοιχεία και η τήξη του συσσωμάτωματος με την διαδικασία της εξέλασης. Μέσω της θέρμανσης του μίγματος η μήτρα ξεκινά να τήκεται και το αέριο διαχέεται στους πόρους, προκαλώντας την πυρηνοποίησή τους. Η εν λόγω διόγκωση των φυσαλίδων ανάμεσα στους πόρους, κατά την στερεοποίησή τους, οδηγεί στην επέκταση του όγκου του αφρού, στην προσπάθεια να αποκτήσει το μίγμα στερεή κατάσταση. Στην φάση στερεοποίησης του υγρού η παρουσία οξειδίων στην σκόνη μετάλλου παρέχει σταθερότητα και όταν τελικά επιτευχθεί η στερεοποίηση, η θερμοκρασία του μίγματος αρχίζει να μειώνεται. Τα πιο συνηθισμένα μέταλλα που χρησιμοποιούνται για αφροποίηση είναι το καθαρό αλουμίνιο και τα κατεργασμένα κράματά του, όπως τα κράματα της σειράς 2XXX ή 6XXX [6, 7].

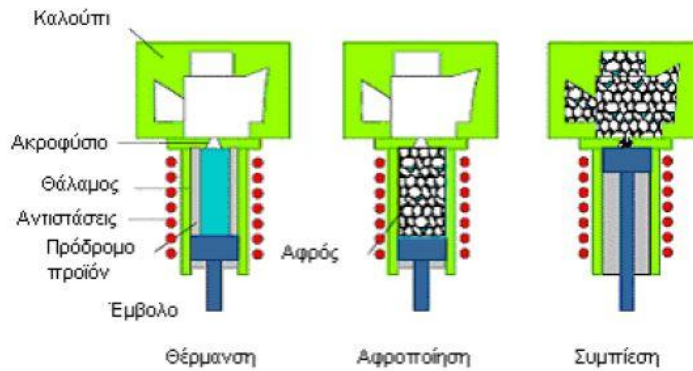


Εικόνα 1.4.4.7 - Αφρός τύπου "Sandwich".

Με την εξέλιξη της αρχικής μεθόδου προήλθε τη δεκαετία του 2000 ο αφρός αλουμινίου "Sandwich" (AFS), ο οποίος αποτελείται από δύο πλάκες-φύλλα αλουμινίου ή σιδήρου, που περιλαμβάνουν εντός τους τον μεταλλικό αφρό. Η διάταξη του συγκεκριμένου προϊόντος περιλαμβάνει 3 στρώματα (Εικόνα 1.4.4.7) τα οποία έχουν υποστεί έλαση έτσι ώστε να προκύψει ένα άκαμπτο συσσωμάτωμα, ανθεκτικό στις υψηλές θερμοκρασίες και πλήρως ανακυκλώσιμο. Εναλλακτικά, τα φύλλα αλουμινίου ή σιδήρου που περικλείουν το αφροποιησιμο υλικό υφίστανται έλαση και προαιρετικά βαθεία κοίλανση. Εν συνεχεία, το συσσωμάτωμα θερμαίνεται και επιτυγχάνεται η διόγκωση του αφροποιησιμου υλικού. Στην τεχνική που μόλις αναφέρθηκε είναι δυνατόν να συνδυαστεί αφρός αλουμινίου με πλάκες σιδήρου ή τιτανίου, ωστόσο οι διαφορές των σημείων τήξης πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη προκειμένου να αποφευχθεί η τήξη των συνεργαζόμενων μερών [6].

Παρασκευή αφρών πολύπλοκης γεωμετρίας

Αφροί πολύπλοκης γεωμετρίας μπορούν επίσης να παραχθούν με την χρήση πούδρας αλουμινίου, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1.4.4.8. Αρχικά η πούδρα αναμιγνύεται με τον αφριστικό παράγοντα και στην συνέχεια με συνεχείς διελάσεις δημιουργείται το πρόδρομο αφροποιησιμο υλικό. Αφού το προϊόν θερμανθεί εντός του θαλάμου μέχρι το σημείο τήξης του, χυτεύεται με την βοήθεια εμβόλου εντός της μήτρας όπου παίρνει το επιθυμητό σχήμα.

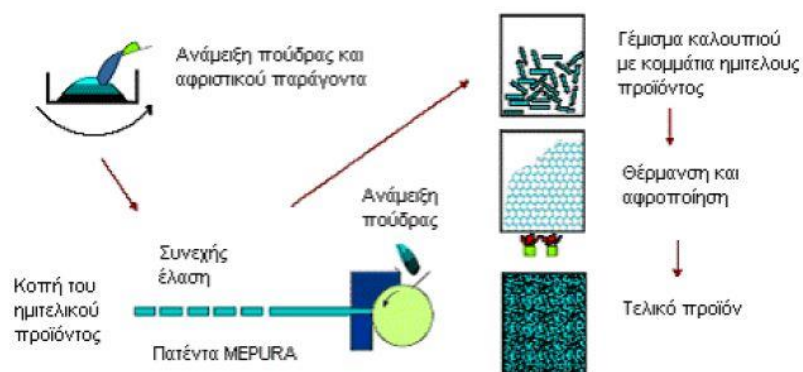


Εικόνα 1.4.4.8 - Παραγωγή σχημάτων πολύπλοκης γεωμετρίας.

Παρασκευή αφρών συγκεκριμένης γεωμετρίας

Για την κατασκευή μεταλλικών αφρών συγκεκριμένης γεωμετρίας, το μίγμα της σκόνης αλουμινίου μαζί με τον αφριστικό παράγοντα δύναται να αφροποιηθούν μέσα σε καλούπι. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για αυτού του είδους την παραγωγή μεταλλικών αφρών ονομάζεται “Meruira” και περιλαμβάνει μια σειρά βημάτων, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1.4.4.9.

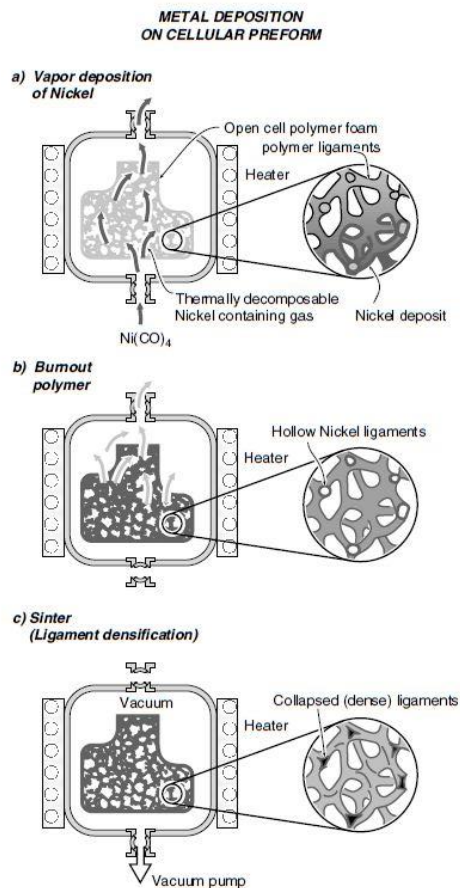
Αρχικά η μεταλλική σκόνη ανακατεύεται με τον αφριστικό παράγοντα και το ημιτελές προϊόν τεμαχίζεται. Στην συνέχεια προστίθεται στην μήτρα το συσσωμάτωμα που έχει προκύψει από την προηγούμενη ανάμειξη και θερμαίνεται κατάλληλα. Από την διάσπαση του αφριστικού παράγοντα εκλύεται το αέριο και τελικά το μίγμα αφροποιείται [6].



Εικόνα 1.4.4.9 - Μέθοδος "Meruira".

Εναπόθεση μετάλλου

Για την παρασκευή μεταλλικών αφρών με την συγκεκριμένη μέθοδο απαιτείται η ύπαρξη ενός προτύπου (ανοικτού τύπου πολυμερές), όπου το μέταλλο επικάθεται χημικά με την μορφή ατμών με ατμοποίηση ή με ηλεκτροεναπόθεση. Συνήθως χρησιμοποιούνται αφροί πολυουρεθάνης, που αποτελούν τη μήτρα του κυψελοειδούς υλικού ή του αφρού που πρόκειται να παραχθεί. Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρήση τόξου για την επίτευξη της ατμοποίησης του μετάλλου. Εναλλακτικά, για τη παρασκευή αφρών νικελίου επιλέγεται καρβονύλιο του νικελίου για την επικάλυψη του προδρόμου υλικού.



Εικόνα 1.4.4.10 - Εναπόθεση μετάλλου.

Το καρβονύλιο του νικελίου αποτελεί αέριο το οποίο παράγεται από την εξής αντίδραση:

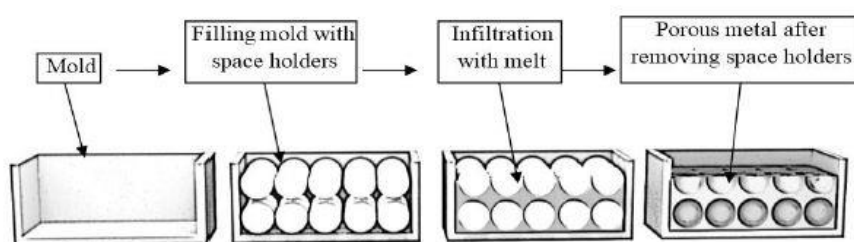
$\text{Ni} + 4\text{CO} \rightarrow \text{Ni}(\text{CO})_4$. Με την θέρμανσή του σε θερμοκρασίες ανώτερες των $120\text{ }^\circ\text{C}$ το

αέριο διασπάται σε νικέλιο και μονοξείδιο του άνθρακα. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται, σε ιδιαίτερα χαμηλές θερμοκρασίες, η μορφοποίηση και συσσώρευση του νικελίου στο πρόδρομο υλικό. Κατόπιν επαναφοράς της θερμοκρασίας, το πολυμερές δύναται να αφαιρεθεί με θερμική ή χημική κατεργασία. Οι αφροί που παράγονται με αυτόν τον τρόπο και διανέμονται εμπορικά με την ονομασία “Incofoam” εμφανίζουν πυκνότητες που κυμαίνονται από 0,2 έως 0,6 g/cm και χαρακτηρίζονται από την πολύ υψηλή περιεκτικότητά τους σε νικέλιο (99.97%) [6, 7].

Άξιο αναφοράς στην συγκεκριμένη μέθοδο παραγωγής αφρών νικελίου με την χρήση καρβονυλίου του νικελίου, είναι πως πρόκειται για υψηλής τοξικότητας αέριο κατά την επεξεργασία του οποίου απαιτούνται δαπανηροί περιβαλλοντικοί έλεγχοι.

Χύτευση μετάλλου γύρω από στερεά σωματίδια

Η χύτευση μεταλλικού τήγματος γύρω από ανόργανους αλλά και οργανικούς κόκκους ή κοίλες σφαίρες δύναται να αποτελέσει μία ακόμη μέθοδο παρασκευής μεταλλικών αφρών χαμηλού βάρους. Μετά την ολοκλήρωση της χύτευσης, οι κόκκοι μπορούν να παραμείνουν στο μίγμα ή να αφαιρεθούν με κατάλληλους διαλύτες ή οξέα. Στην περίπτωση ανόργανων σωματιδίων επιλέγονται μεταξύ άλλων σφαιρίδια από οξειδία του αλουμινίου, ακατέργαστο άργιλο, βερμικουλίτη και διαλυτά άλατα, ενώ για εκείνη των οργανικών συνήθως συναντώνται σφαιρίδια πολυμερών.



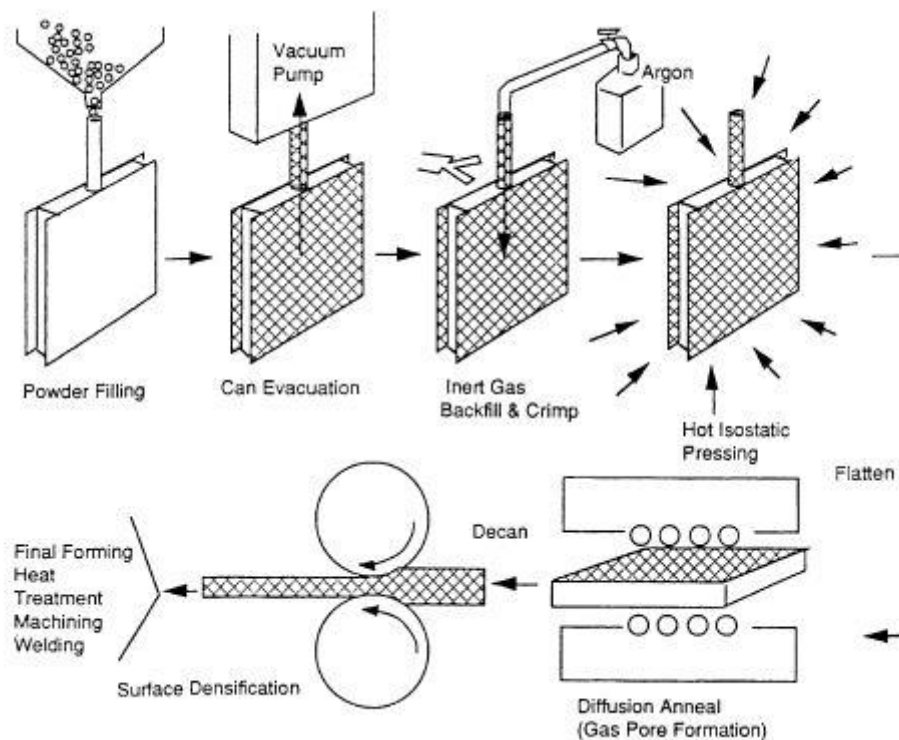
Εικόνα 1.4.4.11 - Χύτευση γύρω από στερεά σωματίδια.

Για την αποφυγή της πρόωρης στερεοποίησης του μίγματος οι κόκκοι του προδρόμου υλικού προθερμαίνονται, κυρίως όταν η θερμοχωρητικότητά τους είναι μεγάλη και η πίεση διήθησης του ρευστού μετάλλου μικρή. Ακόμη, κρίνεται ως απαραίτητη προϋπόθεση η

δημιουργία επαρκούς χώρου μεταξύ των κόκκων, με τρόπο που να πραγματοποιείται η χύτευση με την όσο το δυνατόν μικρότερη ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων. Το βασικό πλεονέκτημα της χύτευσης γύρω από στερεά σωματίδια είναι η ελεγχόμενη κατανομή πόρων που παρέχει στους παραγόμενους αφρούς. Αντίθετα, το μέγιστο πορώδες που προσφέρει (έως 80%) δικαιολογεί τον περιορισμό στη χρήση της σε σχέση με άλλες μεθόδους [6, 7].

Παγίδευση αερίου υψηλής πίεσης

Η παραγωγή μεταλλικών αφρών με εγκλωβισμό αδρανούς αερίου υψηλής πίεσης περιλαμβάνει αρχικά την εισαγωγή της μεταλλικής σκόνης εντός κλειστού και πλήρως εκκενωμένου θαλάμου. Στην συνέχεια εισάγεται το επιθυμητό αέριο (συνήθως χρησιμοποιείται αργό) σε υψηλή πίεση, το οποίο καταλαμβάνει τον κενό χώρο μεταξύ των κόκκων της σκόνης. Με θέρμανση του μίγματος αυξάνεται η πίεση των πόρων, οι οποίοι διαστέλλονται με ερπυσμό του μετάλλου γύρω από αυτούς.

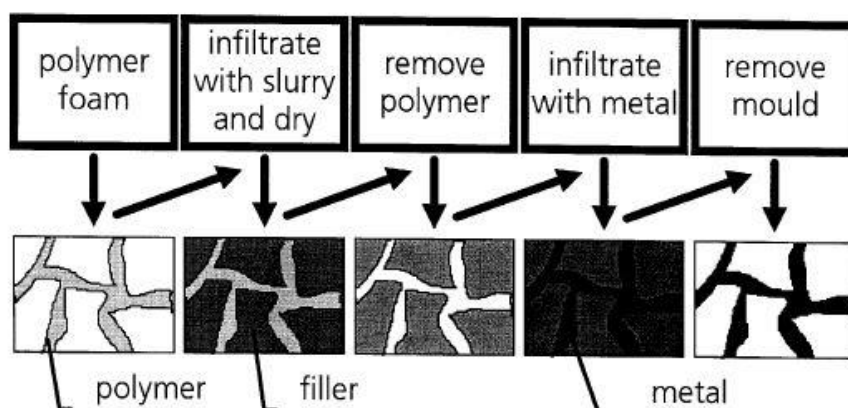


Εικόνα 1.4.4.12 - Παραγωγή αφρού με παγίδευση αερίου.

Η “χελώνα” που προκύπτει με το πέρας της διαδικασίας υφίσταται έλαση και ακολούθως θερμαίνεται ώστε να εκτονωθεί το παγιδευμένο αέριο και να δημιουργηθεί το πορώδες. Το εύρος των διαμέτρων που προκύπτουν από την συγκεκριμένη τεχνική κυμαίνεται από 10 – 100 μm, ενώ το προσδοκώμενο πορώδες δεν δύναται να ξεπεράσει το 50% [7].

Χύτευση μετάλλου σε πολυμερικό αφρό

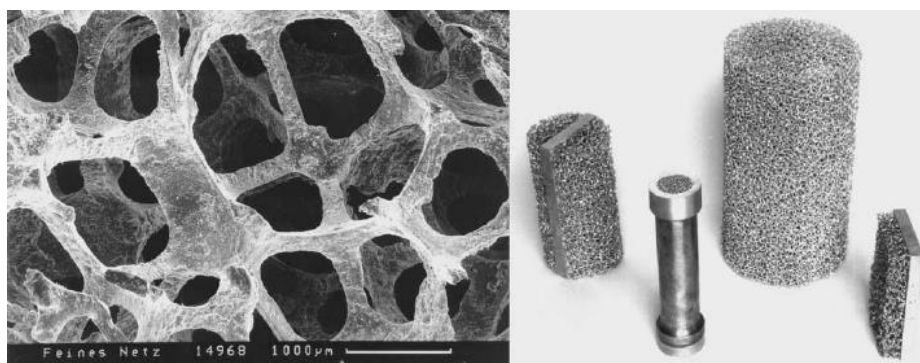
Μεταλλικοί αφροί ανοικτού τύπου και ταυτόχρονα πολύ υψηλού πορώδους (από 80 – 97%) μπορούν να προκύψουν έμμεσα από την χρήση προπλάσματος, το οποίο χρησιμοποιείται ως πρότυπο στην όλη διαδικασία. Για την συγκεκριμένη μέθοδο (Εικόνα 1.4.4.13) απαιτούνται πορώδη υλικά ανοικτού τύπου, ή κλειστού τύπου που μετατρέπονται κατάλληλα σε ανοικτού, έτσι ώστε να είναι εφικτή η πλήρωσή τους από υλικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες, όπως CaCO_3 (ανθρακικό ασβέστιο) ή μίγματα πορσελάνης. Μετά την ψύξη του μίγματος, το πρότυπο υλικό αφαιρείται με θερμική κατεργασία και το λιωμένο μέταλλο χυτεύεται στην θέση αυτού. Το ρευστό μέταλλο καταλαμβάνει τον χώρο που έχει δημιουργηθεί από την απομάκρυνση του πορώδους υλικού με διείδυση σε κενό, με την βοήθεια της βαρύτητας ή με την εφαρμογή πίεσης όπου αυτή απαιτείται [6, 17].



Εικόνα 1.4.4.13 - Χύτευση μετάλλου σε πολυμερικό αφρό.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως πρότυπα για την παραπάνω διαδικασία μπορεί να ανήκουν σε μία από τις εξής κατηγορίες: συνεχή πυρίμαχα, μη συνεχή πυρίμαχα, καύσιμα ή διηθητά. Κάθε μια από αυτές τις παραπάνω κατηγορίες υποδεικνύει και ένα διαφορετικό τρόπο αφαίρεσης του προτύπου. Πιο συγκεκριμένα, τα πυρίμαχα απομακρύνονται με ψεκασμό νερού, τα πολυμερή καίγονται και τα διηθητά αποδεσμεύονται με την τοποθέτηση του δοκιμίου σε κάποιο διαλύτη. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην τελευταία περίπτωση όπου κρίνεται αναγκαία η ηλεκτρολυτική προστασία του δοκιμίου ώστε να επέλθει η διάβρωσή του.

Οι παραγόμενοι αφροί με την χρήση προδρόμου πολυμερούς χαρακτηρίζονται από κελιά με μορφή δωδεκαέδρου ή δεκατετραέδρου, τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη ομοιογένεια.



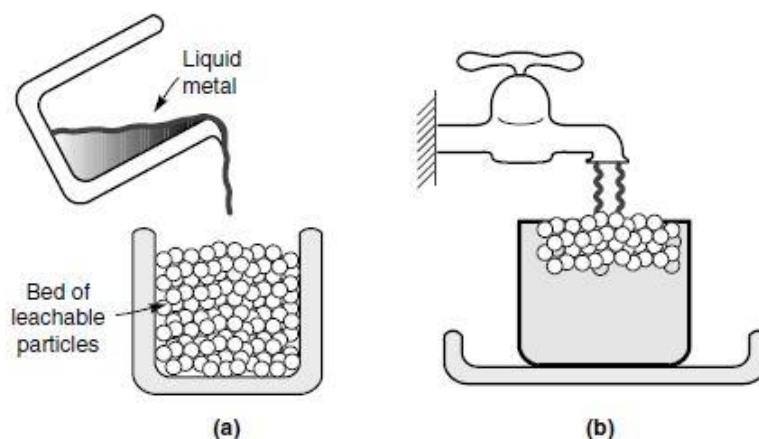
Εικόνα 1.4.4.14 - Αφρός "Duocel".

Στο Oakland της Καλιφόρνια η εταιρεία ERG αναλάμβανε την παρασκευή μεταλλικών αφρών (Εικόνα 1.4.4.14) με την παραπάνω διαδικασία και τους διένεμε με την εμπορική ονομασία "Duocel" [6, 7].

Συμπύεση ή Χύτευση με έκπλυση

Δύο μεταλλικές σκόνες, που βρίσκονται αμφοτέρως σε ποσοστό 25% ή μεγαλύτερο, αναμιγνύονται και συμπιέζονται έτσι ώστε να σχηματιστούν δομές δύο φάσεων. Μετά την ενοποίησή τους, μία εκ των δύο υφίσταται απόπλυση από κατάλληλο διάλυμα. Εναλλακτικά, ένα στρώμα εκπλύσιμου υλικού χρησιμοποιείται ως φίλτρο για την διεύθυνση ρευστού

μετάλλου υπό πίεση, το οποίο στην συνέχεια αφήνεται να ψυχθεί. Οι αφροί που προέρχονται από σκόνες κραμάτων αλουμινίου σε συνδυασμό με χλωριούχο νάτριο (NaCl) έχουν οδηγήσει στην παρασκευή αφρών με ομοιόμορφη δομή. Η τεχνική της έκπλυσης περιορίζεται στην παρασκευή αφρών με πορώδες 50 – 70% και διαμέτρου πόρων από 10 μm έως 10 mm [6].

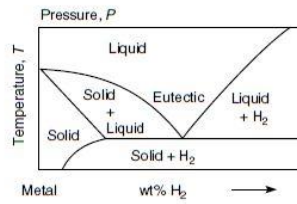


Εικόνα 1.4.4.15 - Χύτευση με έκπλυση μεταλλικής πούδρας.

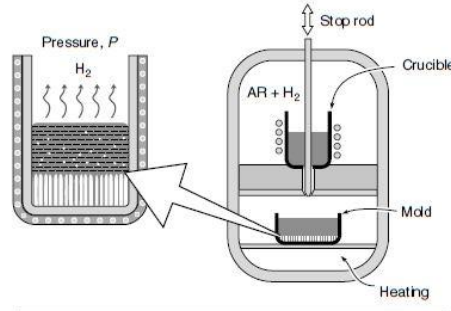
Ευτηκτική στερεοποίηση στερεού-υγρού ("Gasar")

Η μέθοδος της ευτηκτικής στερεοποίησης αξιοποιεί την ιδιότητα ορισμένων ρευστών μετάλλων να δημιουργούν ευτηκτικά συστήματα παρουσία υδρογόνου. Κατόπιν τήξεως ενός μετάλλου σε υδρογονωμένη ατμόσφαιρα υπό υψηλή πίεση (πάνω από 50 atm), προκύπτει ομοιογενές τήγμα εμπλουτισμένο με υδρογόνο. Με μείωση της θερμοκρασίας εν συνεχεία, το αναφερόμενο τήγμα μεταβαίνει σε ετερογενές σύστημα δύο φάσεων, στερεού-υγρού. Αφού ξεκινήσει η διαδικασία της ψύξης επέρχεται σταδιακά κατευθυνόμενη στερεοποίηση του μίγματος, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.4.4.16 και το υδρογόνο αρχίζει να εμφανίζεται με την μορφή φυσαλίδων [6, 7].

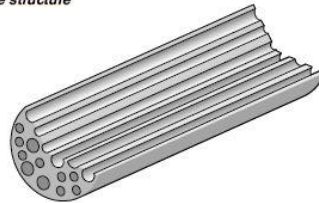
a) Metal - Hydrogen binary phase diagram



b) Directional solidification



c) Final pore structure



Εικόνα 1.4.4.16 - Στερεοποίηση "Gasar".

Για την επιτυχημένη εφαρμογή της μεθόδου είναι αναγκαίο να οριστούν οι παράμετροι με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η παραμονή του υδρογόνου στην περιοχή της στερεοποίησης. Σε διαφορετική περίπτωση, οι φυσαλίδες του αερίου πρόκειται να μεταβούν εκτός του ρευστού και να διαλυθούν. Όσον αφορά την μορφολογία των παραγόμενων αφρών καθορίζεται από μια σειρά παραγόντων, όπως το περιεχόμενο υδρογόνου, την πίεση εντός του μίγματος, την κατεύθυνση και τον ρυθμό απομάκρυνσης της θερμότητας και τη χημική σύσταση του μίγματος. Οι μεταλλικοί αφροί που παρασκευάζονται κατ' αυτόν τον τρόπο χαρακτηρίζονται από διάμετρο πόρων που κυμαίνεται από 10 μm έως 10 mm και πορώδες από 5 – 75% [7].

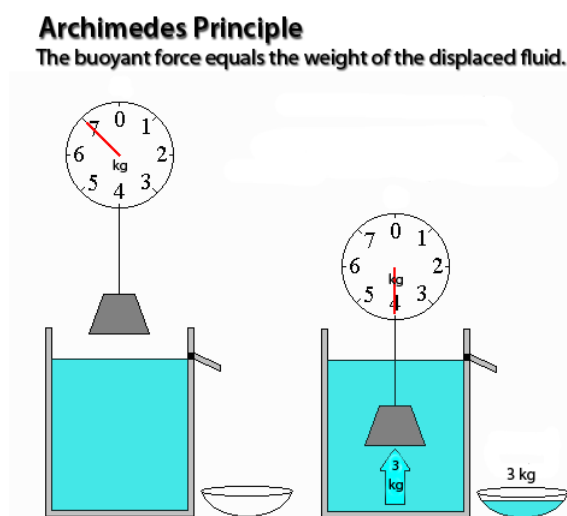
1.4.5 Μέθοδοι χαρακτηρισμού κυψελοειδών υλικών

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο χαρακτηρισμός των κυψελοειδών υλικών και να αποδοθούν σε αυτά φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, είναι αναγκαία η εφαρμογή συγκεκριμένων μεθόδων-μετρήσεων. Οι μέθοδοι διακρίνονται σε i) Καταστροφικές και ii) Μη καταστροφικές, ανάλογα με το αν η παραμόρφωση του υλικού είναι μη αναστρέψιμη (παραμένει αμετάβλητη στην διάρκεια του χαρακτηρισμού) ή μεταβάλλεται κατά την διάρκεια του χαρακτηρισμού έως ότου ταυτιστεί το υλικό με αυτό της αρχικής κατάστασης.

Μη καταστροφικοί έλεγχοι

Μετρήσεις πυκνότητας

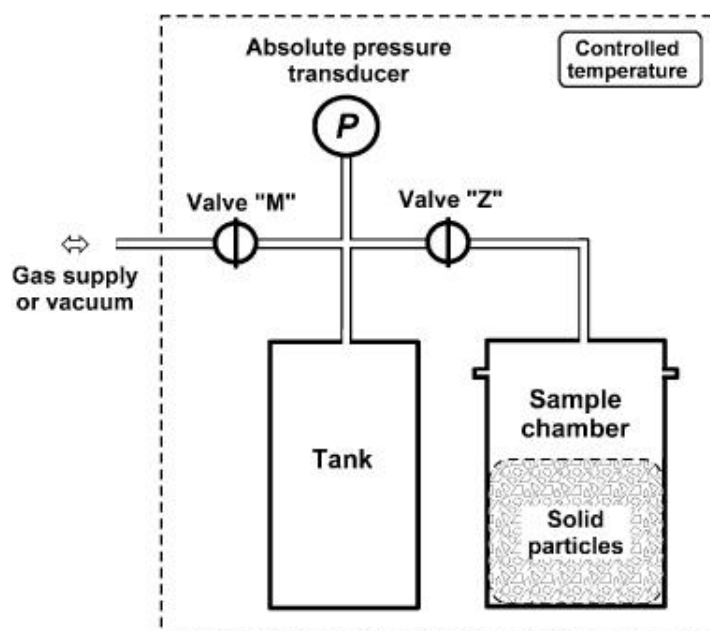
Η σχετική πυκνότητα ενός μεταλλικού αφρού εκφράζεται ως το πηλίκο της πυκνότητάς του προς την πυκνότητα του υλικού βάσης του (προδρόμου υλικού). Τα δομικά στοιχεία του αφρού, δηλαδή οι κυψελίδες και τα τοιχώματα στο εσωτερικό του, καθορίζονται άμεσα από την σχετική πυκνότητα ή αντίστοιχα από το πορώδες του, που δύναται να φτάσει έως το 98% (σχετική πυκνότητα 2%). Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει σαφές πως όταν το μίγμα έχει σχετική πυκνότητα μεγαλύτερη του 30%, τότε το αποτέλεσμα αφορά μέταλλο με απομονωμένους πόρους και όχι μεταλλικό αφρό [19].



Εικόνα 1.4.5.1 - Αναπαράσταση της Αρχής του Αρχιμήδη.

Η πυκνότητα του εκάστοτε κυψελοειδούς υλικού, επομένως και των μεταλλικών αφρών, δύναται να υπολογιστεί από το πηλίκο της μάζας του ως προς τον συνολικό του όγκο. Για την εύρεση του όγκου, όταν το πορώδες υλικό έχει ακανόνιστο σχήμα, γίνεται χρήση της αρχής του Αρχιμήδη. Η παραπάνω μεθοδολογία εφαρμόζεται επιτυχώς σε συμπαγή υλικά με απομονωμένους πόρους (περιπτώσεις κλειστών πόρων), όμως στην περίπτωση των αφρών ανοικτού τύπου, όπου η εξωτερική επιφάνεια του αφρού δεν είναι κλειστή, επιβάλλεται η επικάλυψη των πόρων έτσι ώστε να αποφευχθεί η εισχώρηση του υγρού εντός του αφρώδους δοκιμίου. Η εν λόγω επίστρωση πραγματοποιείται με ένα λεπτό στρώμα πολυμερούς (γράσο, βερνίκι) [5, 20, 21].

Σε περιπτώσεις όπου τα δοκίμια είναι μικρά ή απαιτείται μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην πληροφόρηση σχετικά με το πορώδες, χρησιμοποιείται η τεχνική της πυκνομετρίας. Στην απλούστερη μορφή της η μέθοδος περιλαμβάνει δύο κάψουλες (Εικόνα 1.4.5.2), όπου στην μία βρίσκεται το δοκίμιο και στην άλλη ένα αέριο (ήλιο κατά προτίμηση) σε γνωστή πίεση. Οι δύο κάψουλες ενώνονται με μία βαλβίδα, η οποία όταν ανοίξει προκαλεί πτώση της πίεσης στην κάψουλα που ήταν γεμάτη με το αέριο. Αυτό συμβαίνει διότι ο συνολικός όγκος που περιλαμβάνει πλέον το αέριο έχει αυξηθεί.



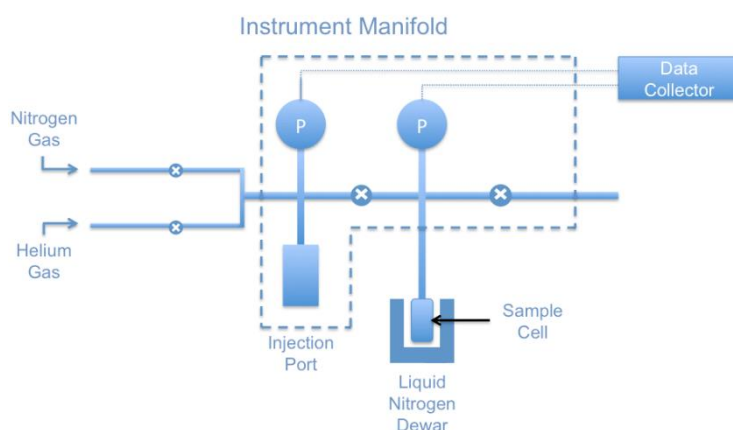
Εικόνα 1.4.5.2 - Μέτρηση πυκνότητας με χρήση καψουλών.

Η τιμή της πίεσης τώρα είναι μικρότερη της αρχικής, ωστόσο μεγαλύτερη της τιμής που θα είχε η κάψουλα αν δεν υπήρχε το εν λόγω δοκίμιο στην άλλη. Από την παραπάνω διαφορά ανάμεσα στις δύο καταστάσεις είναι εφικτός ο υπολογισμός του όγκου του δοκιμίου και στην συνέχεια της πυκνότητάς του με την χρήση του ακόλουθου τύπου:

$$V_x = \frac{P_{sys} * V_s + P_{sys} * V_r - P_s * V_s - P_r * V_r}{P_{sys} - P_s}$$

όπου V_x ο ζητούμενος όγκος, P_{sys} η πίεση ισορροπίας συστήματος (μετά το άνοιγμα της βαλβίδας), V_s ο όγκος της κάψουλας δείγματος, V_r ο όγκος της κενής κάψουλας, P_s η πίεση κάψουλας δείγματος και P_r η πίεση της κενής κάψουλας.

Ο υπολογισμός της πυκνότητας, μέσω υπολογισμού του όγκου μπορεί επίσης να επιτευχθεί με τις τεχνικές της πορομετρίας και της μέτρησης ειδικής επιφάνειας (BET), που βρίσκουν εφαρμογή στο πεδίο των νανοδομημένων υλικών.



Εικόνα 1.4.5.3 - Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής BET.

Κατά την διαδικασία της πρώτης τεχνικής πραγματοποιείται η διείσδυση ενός αδιάβρεχτου υγρού υπό υψηλή πίεση, συνήθως υδραργύρου, ενώ παράλληλα χρησιμοποιείται ένα πορόμετρο. Ο προσδιορισμός του μεγέθους των πόρων προκύπτει από την εξωτερική πίεση που απαιτείται ώστε να εισχωρήσει ο υδράργυρος εντός του δοκιμίου προς την αντιτιθέμενη δύναμη της επιφανειακής τάσης του υγρού. Αξίζει να σημειωθεί πως κατά τον υπολογισμό του όγκου μέσω της συγκεκριμένης τεχνικής τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά, όμως στις περιπτώσεις όπου η διάμετρος των πόρων είναι μεγάλη και οι σπές

επικοινωνίας μεταξύ αυτών μικρές είναι δυνατόν να παγιδευτεί μέρος του υδραργύρου εντός του υλικού.

Η μέθοδος μέτρησης ειδικής επιφάνειας περιλαμβάνει την απορρόφηση ενός αερίου από το υπό εξέταση κυψελοειδές δοκίμιο με την αύξηση της επιβαλλόμενης πίεσης. Χάριν της αύξησης της πίεσης, μόρια του αερίου ωθούνται στο εσωτερικό του πορώδους υλικού και καταλαμβάνουν τον χώρο εντός των πόρων, μέχρις ότου καλυφθεί η επιφάνεια του δοκιμίου από μια λεπτή μονοστοιβάδα των εν λόγω μορίων. Ακολούθως παρατίθεται ο τύπος για την εύρεση του απορροφούμενου βάρους του αερίου, μέσω του οποίου μπορεί να υπολογιστεί ο όγκος και στην συνέχεια η πυκνότητα του πορώδους υλικού:

$$\frac{1}{\left[W * \left(\frac{P_0}{P} \right) - 1 \right]} = \frac{1}{W_m * C} + \frac{C - 1}{W_m * C} * \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

όπου W το βάρος του αζώτου που απορροφάται, W_m το βάρος του απορροφούμενου αερίου σε πίεση 1 atm και θερμοκρασία 273 K, $\frac{P}{P_0}$ η σχετική πίεση και C η σταθερά προσφύσεως.

Με δεδομένο το βάρος του αερίου αλλά και την διαφορά πίεσης καθ' όλη την διάρκεια της μέτρησης υπολογίζεται ο όγκος του αφρού [5, 33].

Αισθητήρες ρεύματος δίνης

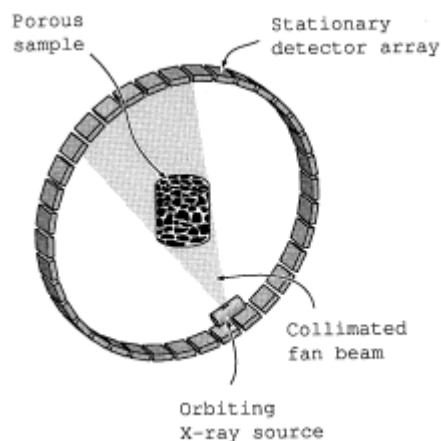
Για τον υπολογισμό της σχετικής πυκνότητας αλλά και του μεγέθους των πόρων στους μεταλλικούς αφρούς πραγματοποιούνται μεταξύ άλλων μετρήσεις της ηλεκτρικής αντίστασης. Ένα πηνίο διέγερσης, το οποίο φέρει εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, τοποθετείται κοντά στον υπό εξέταση αφρό. Λόγω του εναλλασσόμενου ρεύματος δημιουργείται στο εσωτερικό του πηνίου χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο λόγω επαγωγής προκαλεί δίνες ρευμάτων και αντίστοιχο μαγνητικό πεδίο γύρω από τον μεταλλικό αφρό. Τα ρεύματα δίνης δύνανται να συλληθούν από ένα δευτερεύον πηνίο και από την μέτρησή τους να παραχθούν πληροφορίες για την γεωμετρία και τις ιδιότητες του εξεταζόμενου δοκιμίου [5, 7].

Ραδιοσκοπία - Τομογραφία με ακτίνες Χ

Οι μεταλλικοί αφροί είναι δυνατόν να χαρτογραφηθούν με την βοήθεια των ακτίνων Χ, χάριν της υψηλής αντίθεσης που προσφέρουν κατά την απεικόνιση μεταξύ των πόρων και του μετάλλου. Μια δέσμη ακτίνας Χ προσπίπτει στο πορώδες υλικό και ακολούθως μετράται η εξασθένισή της. Για την εφαρμογή επιλέγεται μια συγκεκριμένη πλευρική επιφάνεια, η οποία σαρώνεται ώστε να αποτυπωθεί η μορφή του αφρού σε δύο διαστάσεις.

Με την χρήση της ραδιοσκοπίας μπορεί κανείς να παρατηρήσει την επίδραση των μεταβλητών κατά την δημιουργία του αφρού, όπως τον ρυθμό ψύξης, τις συνθήκες στερεοποίησης και την επέκταση των φυσαλίδων κατά την αφροποίηση [5, 7].

Εκτός όμως από την ραδιογραφία, εφαρμόζεται και η τομογραφία με ακτίνες Χ για την αποτύπωση των χαρακτηριστικών της δομής του αφρώδους μετάλλου. Συγκεκριμένα, με την μέθοδο της τομογραφίας συλλέγεται ένα πλήθος εικόνων, ύστερα από μικρή περιστροφή των ακτίνων που προσπίπτουν στο υπό εξέταση δοκίμιο, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.4.5.4. Με ανάλογο τρόπο όπως και στην ραδιογραφία, η εξασθένιση των ακτίνων παρέχει την κατάλληλη πληροφορία για την τοπική πυκνότητα του αφρού και σε συνδυασμό με την χρήση αλγορίθμων κατασκευάζεται το μοντέλο του στις τρεις διαστάσεις. Κατόπιν της μελέτης του τρισδιάστατου μοντέλου υπολογίζεται το κλάσμα στερεού στο κυψελοειδές υλικό και καθορίζεται αντιστοίχως το κλάσμα του όγκου του δοκίμιου [3, 5].



Εικόνα 1.4.5.4 - Τομογραφία με την χρήση ακτίνων Χ.

Μετρήσεις εμποτισμού με χρώμα

Η παραγωγή των μεταλλικών αφρών επιτυγχάνεται κατόπιν μιας σειράς διαδικασιών, όπως π.χ. η ψύξη που έπεται της αφροποίησης τους, οι οποίες δημιουργούν ατέλειες στην δομή τους. Οι εν λόγω ατέλειες περιλαμβάνουν οπές, ρωγμές στα κυτταρικά τοιχώματα ή ακόμα και στην εξωτερική επιφάνεια του μεταλλικού αφρού. Για τον εντοπισμό και την καταγραφή των παραπάνω ατελειών ένα χημικό υλικό εφαρμόζεται στην επιφάνεια του αφρού, το οποίο απορροφάται από τις εν λόγω ατέλειες. Αφού το χημικό υγρό που χρησιμοποιήθηκε έχει στεγνώσει, χρωματίζεται η επιφάνεια του αφρού άρα και του εναπομείναντος σε αυτή χημικού υγρού. Η υπόλοιπη αχρωμάτιστη επιφάνεια αποτελείται από τις οπές ή τις ρωγμές που προαναφέρθηκαν.

Ακουστικές μετρήσεις

Με τις ακουστικές μετρήσεις επιτυγχάνονται ακριβείς μετρήσεις με βάση τις ιδιότητες απορρόφησης του ήχου από τα πορώδη υλικά μέσης διαμέτρου. Η μέτρηση της εξασθένησης του ήχου είναι συνήθως συνάρτηση της συχνότητας. Για τα υλικά με ανοικτό πορώδες όταν αυξάνεται το κενό μεταξύ των πόρων η απόσβεση μετατοπίζεται προς τις χαμηλές συχνότητες, ενώ για τα υλικά με κλειστό πορώδες η καμπύλη απόσβεσης είναι ίδια και εξαρτάται από το διάκενο. Το προαναφερθέν συμπέρασμα προκύπτει από το γεγονός ότι ο ήχος δεν διαπερνά τον αφρό αλλά απορροφάται στην επιφάνειά του.

Ανάλυση ταλάντωσης

Στην απλούστερη τεχνική ένα λεπτό ορθογωνικό ή ένα λεπτό τετραγωνικό φύλλο του μεταλλικού αφρού εξαναγκάζονται σε ταλάντωση. Οι διεγέρσεις που δύναται να υποστεί το πορώδες μέταλλο είναι στρεπτικές, διαμήκεις ή εγκάρσιες και κατ' επιλογή εκείνες που προκαλούνται από την παρουσία μαγνητικών πεδίων. Με την χρήση σύρματος αντίστασης ή απευθείας σύνδεση με το υπό εξέταση δοκίμιο, οι απορρέουσες ταλαντώσεις μπορούν να γίνουν αντιληπτές από τον ηλεκτρομαγνητικό συλλέκτη και να παρατηρηθούν οι χαρακτηριστικές αιχμές συντονισμού. Ακολούθως, από τις θέσεις των αιχμών και με

δεδομένες τις διαστάσεις και τη μάζα του αφρού, είναι δυνατός ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας E [7, 21].

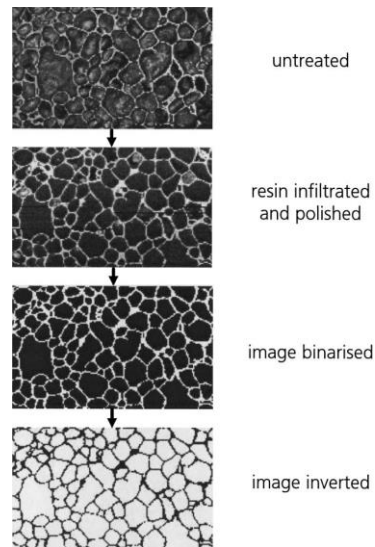
Καταστροφικοί έλεγχοι

Μηχανικοί έλεγχοι

Οι μηχανικοί έλεγχοι που πραγματοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των πορωδών υλικών και κατ' επέκταση των μεταλλικών αφρών εμφανίζουν ομοιότητες με εκείνες των συμπαγών υλικών. Το στοιχείο εκείνο που διαφέρει είναι ότι στην περίπτωση των πρώτων, οι παράμετροι όπως η διαφορά στην κατανομή της μάζας ή η ετερογενής δομή του υλικού μεταξύ αφρών ίδιας πυκνότητας, καθιστούν την πορώδη φύση πιο σύνθετη από εκείνη των συμβατικών υλικών. Όπως γίνεται αντιληπτό, για την εξαγωγή έγκυρων πληροφοριών γύρω από τις μηχανικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τους μεταλλικούς αφρούς απαιτείται μεγάλο πλήθος μετρήσεων [7].

Εικόνα οπτικής ανάλυσης

Η ανάλυση με οπτικά μέσα δεν αποτελεί από μόνη της καταστροφικό έλεγχο. Ωστόσο η προετοιμασία που απαιτεί την παραμόρφωση του δοκιμίου, έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη ανάλυση, είναι αναπόσπαστο κομμάτι της όλης διαδικασίας. Η μελέτη της μικροδομής αλλά και της μορφολογίας των κυττάρων μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες οπτικές παρατηρήσεις για μια ποικιλία μεγεθών. Με τον καθορισμό των κελιών και του μεγέθους κατανομής των πόρων είναι δυνατή η χρήση προγραμμάτων του εμπορίου για την επεξεργασία εικόνας. Προκειμένου να είναι εφικτή η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων καθίσταται αναγκαία η διάκριση μεταξύ των τοιχωμάτων και του εσωτερικού των κελιών, με την χρήση διαφορετικής φωτεινότητας σε κάθε περίπτωση.



Εικόνα 1.4.5.5 - Οπτική ανάλυση μεταλλικού αφρού.

Κατά την παραμόρφωση των μεταλλικών αφρών, με την χρήση της μεθόδου «Ανάλυση επιφανειακής συχνότητας», παρέχεται η δυνατότητα εξέτασης της παραμόρφωσης του αφρού σε διαφορετικές περιόδους και από την σύγκριση των επιμέρους εικόνων, που λαμβάνονται από μια βιντεοκάμερα, εξάγονται οι επιθυμητές πληροφορίες [7, 21].

Έλεγχος σε διάβρωση

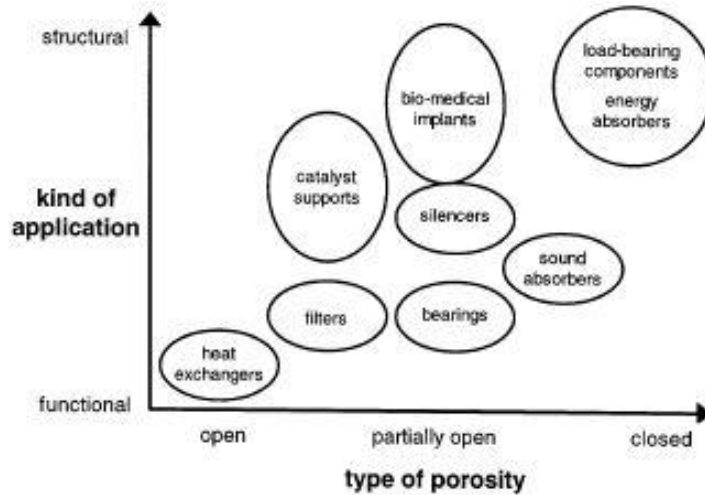
Παρόλο που ο συγκεκριμένος τύπος ελέγχου είναι από τους βασικούς για τα μεταλλικά υλικά, δεν χρησιμοποιείται για αυτόν κάποια καθιερωμένη μέθοδος. Αντ' αυτού η κάθε εφαρμογή καθορίζει την όλη διαδικασία [7].

1.4.6 Εφαρμογές μεταλλικών αφρών

Οι διάφορες μέθοδοι παρασκευής έχουν άμεση σχέση με την χρήση για την οποία προορίζεται ο εκάστοτε αφρός. Οι παράμετροι που καθορίζουν το πεδίο εφαρμογής των πορωδών μετάλλων είναι αρκετές, ωστόσο κατά κύριο λόγο εξετάζονται οι εξής:

- **Μορφολογία:** Αναφέρεται στον τύπο του κυψελοειδούς υλικού που πρόκειται να παραχθεί (ανοικτού ή κλειστού τύπου), στο ζητούμενο μέγεθος των πόρων αλλά και στην εσωτερική επιφανειακή του ενέργεια.
- **Μεταλλουργία:** Υποδεικνύει την φάση του κράματος ή του μετάλλου ή της μικροδομής που δύναται να χρησιμοποιηθεί.
- **Κατεργασιμότητα:** Εστιάζει στην διαμόρφωση του επιθυμητού αφρού ή ακόμη και στην περαιτέρω επεξεργασία αυτού, με στόχο την παραγωγή συνθετικών κατόπιν συνδυασμού του μεταλλικού αφρού με φύλλα μετάλλου.
- **Οικονομικοί Παράγοντες:** Υπολογίζουν το κόστος για την παραγωγή αφρών σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή και την δυνατότητα επέκτασής της σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Οι εφαρμογές των μεταλλικών αφρών διακρίνονται κυρίως σε Κατασκευαστικές και Λειτουργικές, ωστόσο υπάρχουν και άλλες οι οποίες αφορούν την Αρχιτεκτονική αλλά και την Διακόσμηση [7, 17].

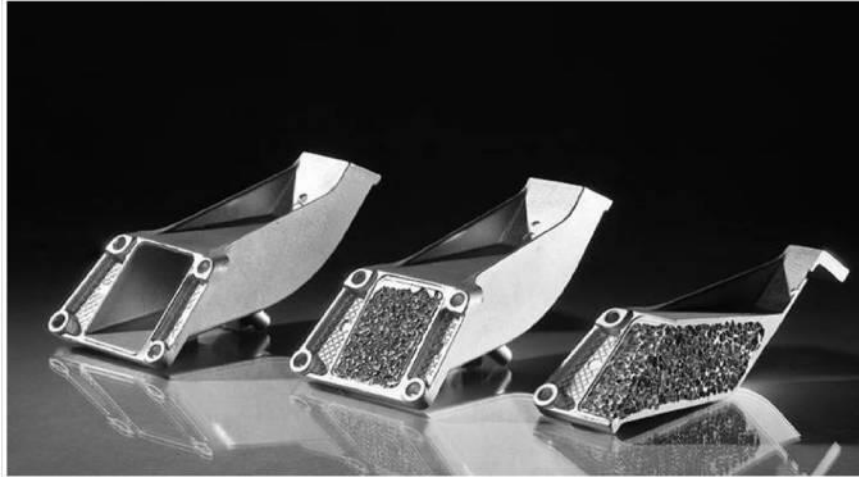


Εικόνα 1.4.6.1 - Πεδία εφαρμογών των μεταλλικών αφρών.

Κατασκευαστικές

Αυτοκινητοβιομηχανία

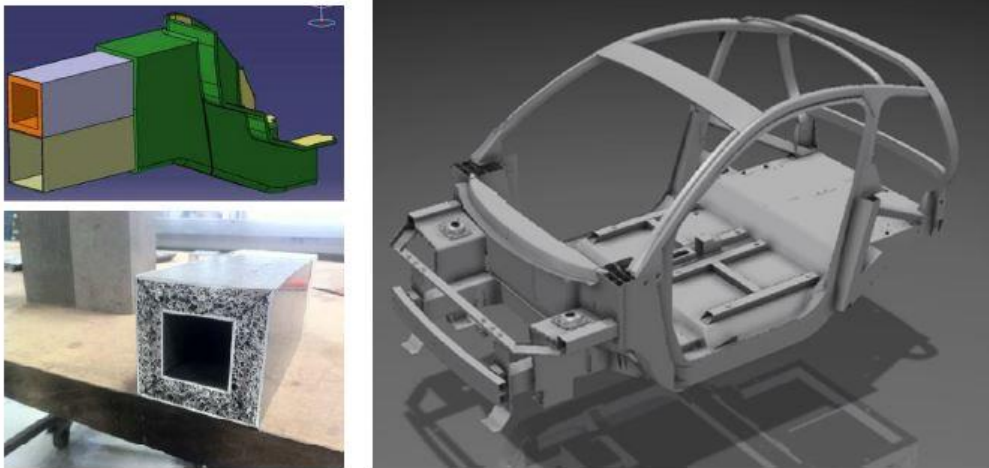
Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας και παράλληλα η επιβολή όλο και αυστηρότερων κανονισμών σε περιβαλλοντικό επίπεδο, έχουν οδηγήσει τις καταναλωτικές τάσεις προς την χρήση ιδιωτικών οχημάτων με χαμηλές απαιτήσεις σε καύσιμα. Από την άλλη, οι προδιαγραφές ασφάλειας των επιβατών έχουν αυξηθεί χωρίς ωστόσο να έχει περιοριστεί η ανάγκη των οδηγών για μεγάλες αποδόσεις. Με δεδομένες τις παραπάνω παραμέτρους, οι διάφορες εταιρίες αυτοκινητοβιομηχανίας κλήθηκαν να εξετάσουν τη χρήση νέων υλικών έτσι ώστε να μπορέσουν να ανταποκριθούν καλύτερα στην αγορά ως προς την παρασκευή ελαφρύτερων κατασκευών, ικανών να απορροφούν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας και να παράγουν το λιγότερο δυνατό θόρυβο. Η επίτευξη και των τριών κριτηρίων ταυτόχρονα με την χρήση ενός μόνο υλικού είναι αρκετά δύσκολη και γι' αυτό το λόγο εξετάζονται υλικά που να ικανοποιούν τουλάχιστον τα δύο από αυτά κάθε φορά.



Εικόνα 1.4.6.2 - Μεταλλικός αφρός στο κέλυφος αυτοκινήτου Audi A8.

Όσον αφορά τα κυψελοειδή υλικά που επιλέγονται για την δημιουργία ελαφρύτερων κατασκευών, πρέπει να εμφανίζουν μεγάλο εύρος ελαστικής παραμόρφωσης και ιδιαίτερα υψηλή αναλογία ακαμψίας-μάζας όπως π.χ. οι αφροί τύπου “Sandwich” από αλουμίνιο (AFS). Οι συγκεκριμένοι αφροί μπορούν να εφαρμοστούν στο καπό, στις πόρτες, στην οροφή και σε άλλα μέρη του αυτοκινήτου για να διασφαλίσουν τη σταθερότητα και την ακαμψία του υλικού ενάντια στα αέρια ρεύματα. Η βελτίωση της αεροδυναμικής του οχήματος, πέρα από την εξοικονόμηση καυσίμου, δύναται να περιορίσει τους θορύβους αλλά και τις δονήσεις που υφίστανται οι επιβάτες.

Αναφορικά με το ζήτημα της ασφάλειας εξετάζονται μεταλλικοί αφροί με μεγάλο εύρος πλαστικής παραμόρφωσης, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας από το προστατευτικό υλικό και να μεταφέρεται όσο το δυνατόν λιγότερη ενέργεια στην καμπίνα των επιβατών. Τα πορώδη υλικά που εμφανίζουν το παραπάνω χαρακτηριστικό χρησιμοποιούνται στους προφυλακτήρες, στα φτερά ή ακόμα και ως ενισχυτικό για την πλήρωση μεταλλικών πλαισίων όπως αυτών στις πόρτες των μοντέλων Ferrari 360 & 430 Spider της Εικόνας 1.4.6.3.



Εικόνα 1.4.6.3 - Ενισχυμένο μεταλλικό πλαίσιο από αφρό αλουμινίου.

Χάριν των καλών ηχο-θερμομονωτικών ιδιοτήτων τους, τα κυψελοειδή μεταλλικά υλικά προσφέρουν την δυνατότητα της απομόνωσης των θορύβων που προκαλούνται από την μηχανή, αφού καθίσταται δυνατή η τοποθέτηση τους ακόμα και στον χώρο του κινητήρα [7, 17, 22].

Σιδηροδρομικές εφαρμογές

Στη σιδηροδρομική βιομηχανία η εφαρμογή των μεταλλικών αφρών εξετάζεται όπως και στην αυτοκινητοβιομηχανία, δηλαδή ως προς την ικανοποίηση των βασικών κριτηρίων της απορρόφησης ενέργειας, της μείωσης του βάρους των οχημάτων και την ελάττωση του παραγόμενου θορύβου κατά την λειτουργία αυτών. Έμφαση δίνεται κυρίως στην πρώτη κατηγορία μιας και οι συγκρούσεις των τρένων και των τραμ με τα ιδιωτικά οχήματα είναι πιθανές στις αστικές περιοχές. Οι αφροί τύπου “Alporas” έχουν εφαρμοστεί σε ιαπωνικά τρένα σε κυβική μορφή 2.3 mm^2 , για την απορρόφηση ενέργειας σε περίπτωση σύγκρουσης. Παρομοίως, μεταλλικοί σπόγγοι συναντώνται τόσο στο τραμ Combino της Βουδαπέστης όσο και στο Sprinter Light Train της Ολλανδίας, σε θέση πίσω από τον προφυλακτήρα όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.4.6.4.



Εικόνα 1.4.6.4 - Υλικά τύπου "Alporas" για την απορρόφηση ενέργειας σε τρένα.

Με την τοποθέτηση μεταλλικών αφρών τύπου "Sandwich" στις οροφές των τρένων ICE της Γερμανίας έχει επιτευχθεί μείωση του συνολικού βάρους κατά 18% και έχει περιοριστεί ο παραγόμενος θόρυβος λειτουργίας, χωρίς να υστερεί η συγκεκριμένη περιοχή ως προς το μέγεθος της ακαμψίας. Όσον αφορά τη δέσμευση του παραγόμενου θορύβου, ανοικτού τύπου αφροί αλουμινίου έχουν εγκατασταθεί για την πιο ήπια σύνδεση των μερών της ηλεκτρικής διάταξης του τρένου Shinkansen της Ιαπωνίας [7, 17].

Αεροδιαστημική

Στην αεροδιαστημική, παρόμοια με την αυτοκινητοβιομηχανία, η ανάγκη για την μείωση του βάρους των μεταφορικών μέσων συνεχώς αυξάνεται. Επίσης, ζητούμενο του κλάδου αποτελεί η αντικατάσταση των ακριβών κατασκευών που μέχρι τώρα αποτελούνταν από κυψελοειδείς κόμβους με ένα υλικό αρκετά φθηνότερο. Το χαμηλό βάρος, η ιστροπική συμπεριφορά και η υψηλή ακαμψία που παρουσιάζουν οι μεταλλικοί αφροί είναι χαρακτηριστικά που δικαιολογούν την χρήση τους για την επίτευξη των παραπάνω στόχων. Ακόμη, αν συνυπολογίσει κανείς το χαμηλό κόστος αλλά και την δυνατότητα κατασκευής τρισδιάστατων καμπύλων μερών από αφρούς τύπου "Sandwich", η προσαρμογή των πορωδών μετάλλων δύναται να πραγματοποιηθεί ακόμη ευκολότερα για τις διάφορες αεροδιαστημικές εφαρμογές [7, 22, 23].

Οι αφροί αλουμινίου εφαρμόζονται ως υλικά απορρόφησης ενέργειας κατά την προσγείωση του αεροσκάφους, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά ενίσχυσης σε

μέρη στα οποία τα συμβατικά υλικά αντιδρούν με το περιβάλλον και δημιουργούν προβλήματα.

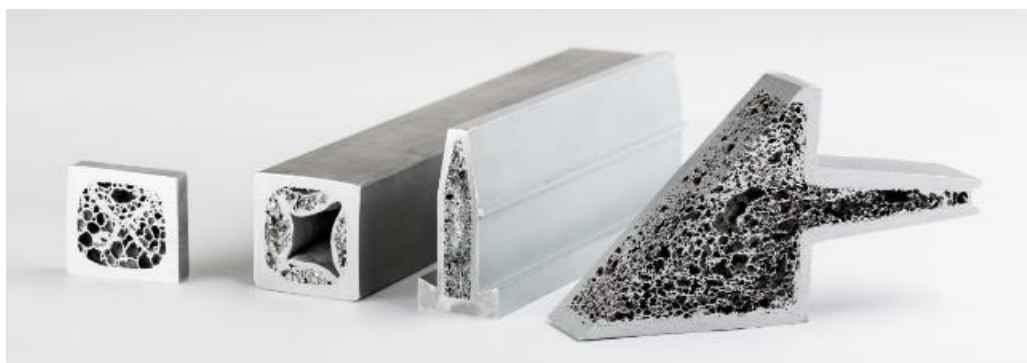
Ναυπηγικές εφαρμογές

Στον τομέα της Ναυπηγικής η συμβολή του αλουμινίου και κατ' επέκταση των παραγόμενων αφρών του είναι τεράστια, δεδομένης της δυνατότητας κατασκευής πλοίων εξ' ολοκλήρου από την χρήση αυτού. Με ελάφρυνση των περιοχών που βρίσκονται μακριά από το κέντρο βάρους δύναται να αυξηθεί η ευστάθεια του συστήματος και κατά συνέπεια να επιτευχθεί μεγαλύτερη φόρτιση του πλοίου με καθαρό προϊόν. Επιπλέον, η σύνδεση των φύλλων αλουμινίου με το κεντρικό πλαίσιο, μέσω συγκόλλησης με πολυουρεθάνη, αναμένεται να βελτιώσει τη συμπεριφορά του πλοίου ακόμη και στις χαμηλές συχνότητες που εμφανίζονται. Μεταξύ άλλων, η τοποθέτηση των κυψελοειδών μετάλλων ως ηχομονωτικών υλικών μπορεί να επιφέρει μείωση των παραγόμενων θορύβων από την καμπίνα της μηχανής, ενώ η ιδιότητά τους να λειτουργούν ως φίλτρα μπορεί να αξιοποιηθεί έτσι ώστε να καθαρίζουν τον εισερχόμενο αέρα στις καμπίνες του [7, 17].

Οικοδομική βιομηχανία

Λόγω του ότι τα σύγχρονα κτίρια κατασκευάζονται από σκυρόδεμα, προκύπτει η ανάγκη να καλυφθούν οι προσόψεις αυτών από ένα υλικό που να βελτιώνει την εικόνα τους. Το υλικό που απαιτείται να εφαρμοστεί επιβάλλεται να είναι ελαφρύ, άκαμπτο αλλά και αντιπυρικό. Όπως γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω χαρακτηριστικά, οι μεταλλικοί αφροί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τέτοιες περιπτώσεις αντί των ακριβών συμβατικών κυψελοειδών υλικών. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση δομικών υλικών, με τον τρόπο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.4.6.5.

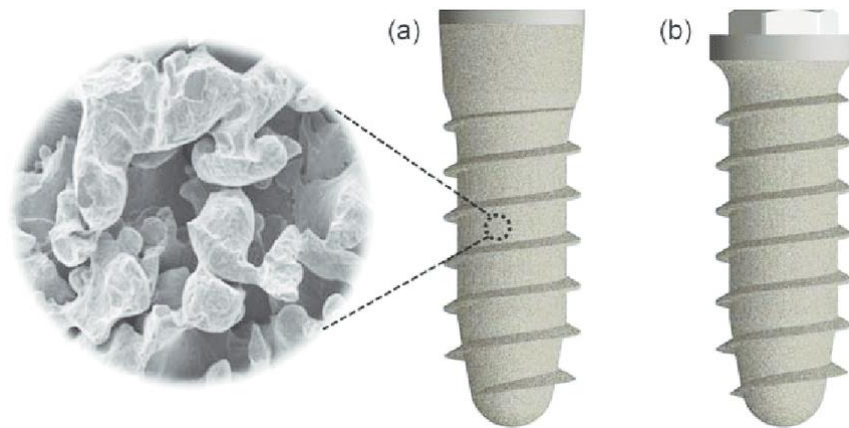
Στο συνολό τους, τα κυψελοειδή μέταλλα, μπορούν να εφαρμοστούν στους ανελκυστήρες των κτιρίων, μιας και η συνεχόμενη επιτάχυνση-επιβράδυνση ενός ελαφρύτερου κλωβού απαιτεί λιγότερη προσφερόμενη ενέργεια [7]. Ακόμη τα πορώδη αλουμινίου χαμηλής πυκνότητας έχουν τις κατάλληλες ιδιότητες για να τοποθετηθούν σε πόρτες πυρασφάλειας αλλά και καταπακτές, αφού παρουσιάζουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και αντιπυρική συμπεριφορά.



Εικόνα 1.4.6.5 - Αφροί μετάλλων για την ενίσχυση δομικών υλικών.

Βιοϊατρική

Ο κλάδος της βιοϊατρικής απασχολεί μεταξύ άλλων κράματα μετάλλων, όπως αυτό του τιτανίου-χρωμίου ή κοβαλτίου-χρωμίου, εξαιτίας της βιοσυμβατότητας που παρουσιάζουν. Πιο συγκεκριμένα, οι εν λόγω ενώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν με την μορφή αφρών ως εμφυτεύματα ή ακόμη και ως ενισχυτές της ανθρώπινης οδοντοστοιχίας (Εικόνα 1.4.6.6). Για να διασφαλιστεί η ανάπλαση του ιστού των ούλων μπορεί να μεσολαβήσει, με θερμικό ψεκασμό, αφρός από τα βιοσυμβατά μέταλλα και στην συνέχεια να τοποθετηθεί το προσθετικό μέλος. Όσον αφορά την εμφύτευση, τα μεταλλικά κυψελοειδή ενώνονται με τα οστά των ούλων και επιτρέπουν την ανάπτυξη των δεύτερων μέσα από το ανοιχτό πορώδες τους.



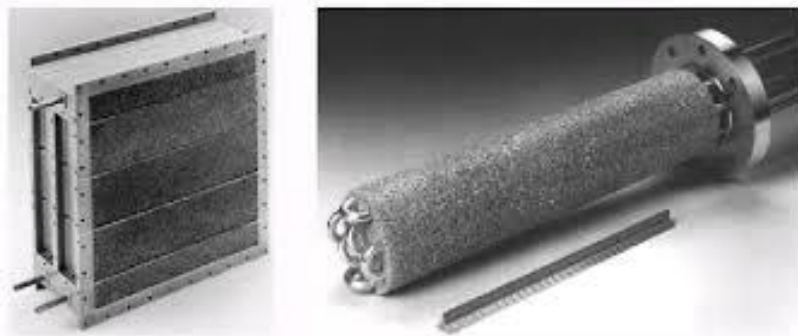
Εικόνα 1.4.6.6 - Εμφυτεύματα από αφρό τιτανίου.

Ανάμεσα στις διάφορες εφαρμογές των μετάλλων στην βιοϊατρική, αφροί από μαγνήσιο δύνανται να χρησιμοποιηθούν για την στήριξη των οστών των ούλων, ωστόσο μονάχα στο αρχικό στάδιο καθότι ως βιοδιασπώμενοι πρόκειται να απορροφηθούν αργότερα από τον οργανισμό [17].

Λειτουργικές εφαρμογές

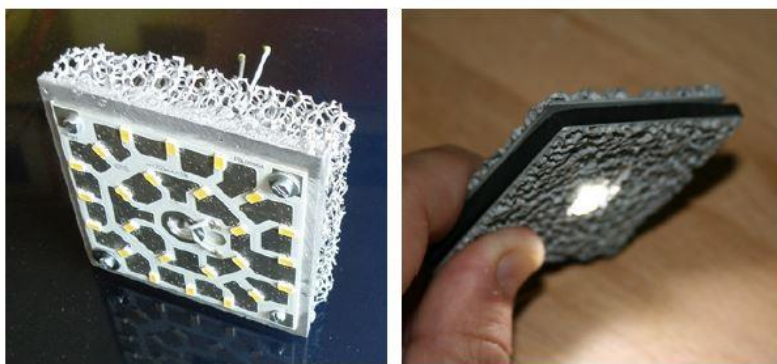
Εναλλάκτες θερμότητας

Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα σε συνδυασμό με τις μεγάλες επιφάνειές τους για μικρό βάρος καθιστούν τους μεταλλικούς αφρούς ιδανικούς ως εναλλάκτες θερμότητας. Η διαδικασία περιλαμβάνει την διέλευση των υγρών ή αερίων σωμάτων μέσω του ανοικτού πορώδους και την διοχέτευση της θερμοκρασίας σε όλη την επιφάνεια του αφρού.



Εικόνα 1.4.6.7 - Εναλλάκτες θερμότητας "Duocel".

Αφροί τύπου “Duocel” της ERG έχουν χρησιμοποιηθεί για την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας ή την απορρόφηση ενέργειας σε ηλεκτρονικά μικροσκόπια και ιατρικά laser αντίστοιχα. Ένας άλλος αφρός αλουμινίου της ίδιας εταιρίας χρησιμοποιήθηκε για την διάσπαση των αμινών και την απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα και της υγρασίας σε διαστημικό λεωφορείο. Εξαιτίας των αυξημένων αποδόσεων και παράλληλα της απαίτησης για μείωση του παραγόμενου θορύβου λειτουργίας, τα κυψελοειδή μέταλλα εφαρμόστηκαν επιτυχώς σε αναλώσιμα εξαρτήματα των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Χαρακτηριστική θεωρείται η εφαρμογή τους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.4.6.8, σε λαμπτήρες “LED”, με σκοπό την διασφάλιση της όσο το δυνατόν μεγαλύτερης απόδοσής τους και παράλληλα την προστασία του υπολογιστή σε περίπτωση ακραίων θερμοκρασιών [7, 17].



Εικόνα 1.4.6.8 - Μεταλλικοί αφροί για την ψύξη λαμπτήρων “LED” Ηλεκτρονικών Υπολογιστών.

Καταλύτες

Εξαιτίας της μεγάλης αλληλοεπιδρούμενης επιφάνειας σε συνδυασμό με την υψηλή διαπερατότητα, οι μεταλλικοί αφροί μπορούν να εφαρμοστούν και να αντικαταστήσουν τα κεραμικά υλικά για την διεργασία της κατάλυσης. Κατά μία εκδοχή, ένα λεπτό φύλλο αντιδιαβρωτικού μεταλλικού αφρού διαβρέχεται από διάλυμα με καταλυτικές ουσίες και αφού υποστεί μηχανουργική κατεργασία, όπως π.χ. διέλαση, θερμαίνεται σε υψηλή θερμοκρασία. Αποτέλεσμα της όλης διαδικασίας είναι η δημιουργία ενός ενιαίου καταλύτη, ο οποίος παραμένει ανθεκτικός ακόμη και μετά το πέρασμα αρκετών θερμικών κύκλων [7, 17, 23].

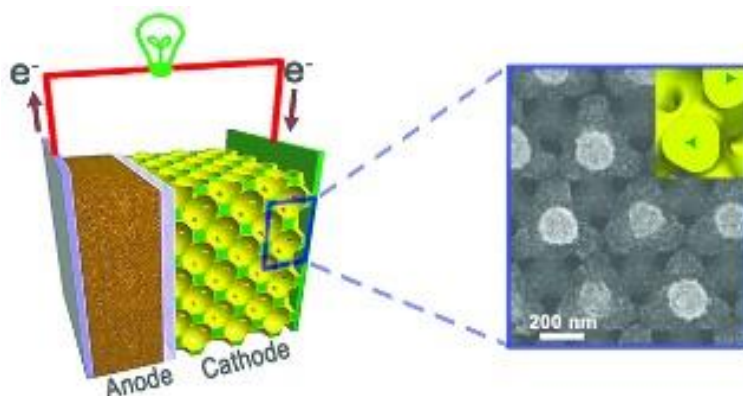
Καταλύτες με εναπόθεση λευκόχρυσου και μολύβδου χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στα λεωφορεία και τα αυτοκίνητα πετρελαίου για την κατάλυση άκαυστων

υδρογονανθράκων, μονοξειδίου του άνθρακα και οξειδίων του αζώτου, σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

1. $\text{NO}_x \rightarrow x\text{O}_2 + \text{N}_2$
2. $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$
3. $\text{C}_x\text{H}_{2x+2} + \left[\frac{(3x+1)}{2}\right] \text{O}_2 \rightarrow x\text{CO}_2 + (x+1)\text{H}_2\text{O}$

Ηλεκτρόδια μπαταριών

Η χρήση μεταλλικών αφρών για την κατασκευή των ηλεκτροδίων στις μπαταρίες NiMH (Νικελίου υδριδίου του μετάλλου) αλλά και NiCd (Νικελίου Καδμίου) αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες εφαρμογές των κυψελοειδών μετάλλων, που παρά την άνοδο των μπαταριών λιθίου, συνεχίζουν να απασχολούν σε μεγάλο βαθμό την αγορά. Αυτό αποδίδεται κυρίως στον μεγάλο όγκο παραγωγής τους, την ομοιομορφία που εμφανίζουν και φυσικά το επιτρεπτό τους κόστος [24].



Εικόνα 1.4.6.9 - Συλλέκτης ρεύματος από αφρό μέταλλου.

Σιγαστήρες - Αποσβεστήρες

Ανάλογα με την πυκνότητά τους οι αφροί μετάλλων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σιγαστήρες ή αποσβεστήρες ήχου (Εικόνα 1.4.6.10) για συγκεκριμένες συχνότητες. Στην πραγματικότητα αλλοιώνουν τον ήχο μεταξύ ενός εύρους συχνοτήτων, ενώ έξω από αυτό ο θόρυβος μεταφέρεται χωρίς να συναντάει δυσκολία. Συνήθως χρησιμοποιούνται πορώδη ανοικτού τύπου, έτσι ώστε ο ήχος να κατευθύνεται μέσα από αυτούς και στην συνέχεια,

έπειτα από διαδοχικές ανακλάσεις, να εξέρχεται αλλοιωμένος. Σε συμπιεστές ή πνευματικές συσκευές επιλέγεται η χρήση αφρών που έχουν προκύψει από πυροσυσσωμάτωση [7].



Εικόνα 1.4.6.10 - Σιγαστήρας μεταλλικού αφρού από πυροσυσσωμάτωση.

Φίλτρα

Τα φίλτρα που παρασκευάζονται από αφρούς μετάλλων χρησιμοποιούνται σε δύο περιπτώσεις: i) στην απομάκρυνση στερεών σωματιδίων κατά την διέλευση ρευστού ανάμεσά τους και ii) στην κατακράτηση στερεών και υγρών σωματιδίων κατά την διάχυση ενός αερίου. Για την πρώτη εφαρμογή αναφέρεται ενδεικτικά ο καθαρισμός χρησιμοποιημένων λαδιών ή ανακυκλώσιμων πολυμερών, ενώ για την δεύτερη η δέσμευση σωματιδίων των καυσαερίων που παράγονται από τη χρήση πετρελαίου. Η διαπερατότητά τους, ο ικανοποιητικός διαχωρισμός που παρέχουν, η αντοχή τους έναντι της διάβρωσης και οι καλές μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζουν είναι μερικά από τα χαρακτηριστικά τα οποία καθιστούν τους μεταλλικούς αφρούς ως ιδανικούς διαχωριστές [17].



Εικόνα 1.4.6.11 - Φίλτρα μεταλλικών αφρών "Alantum".

Μια παραλλαγή της παραπάνω εφαρμογής αφορά τον καθαρισμό μολυσμένων υδάτων από την παρουσία ανεπιθύμητων ιόντων. Η λειτουργία αυτή των συμβατικών φίλτρων εντοπίζεται στην χημική αντίδραση των ιόντων του διαλύματος με τη μήτρα του κυψελοειδούς μετάλλου κατά την οξειδοαναγωγή.

Αποθήκευση και μεταφορά υγρών

Σε διάφορες περιπτώσεις όπου απαιτείται η αποθήκευση και η μεταφορά υγρών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεταλλικοί αφροί για να αντικαταστήσουν συμβατικά προϊόντα της κονιομεταλλουργίας. Αφροί ανοικτού τύπου με μεγάλο μέγεθος πόρων δύνανται να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση υγρών σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, ενώ για την μεταφορά και στην συνέχεια διανομή των ρευστών χρησιμοποιούνται συνήθως πορώδη ρολλά. Οι μεταλλικοί αφροί αυτής της κατηγορίας μπορούν να εφαρμοστούν σε αυτολιπαινόμενα ρουλεμάν όπως και σε αρωματικά χώρου, όπου ο ρυθμός ροής και εξάτμισης απαιτείται να είναι αργός.

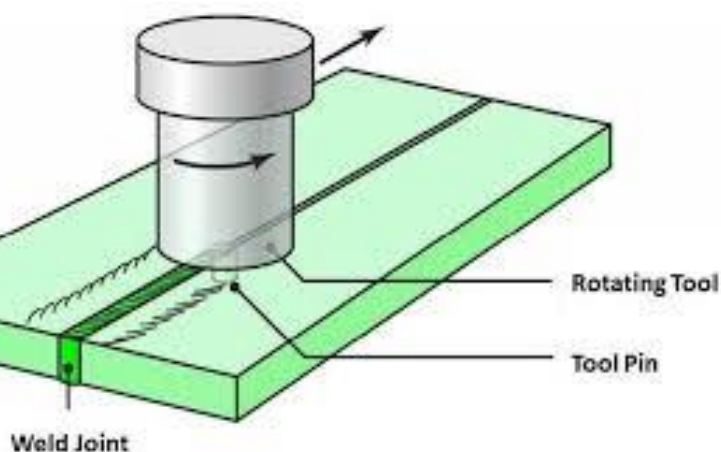
Άλλες εφαρμογές

Εκτός από τις εφαρμογές που περιγράφηκαν, οι μεταλλικοί αφροί μπορούν επίσης να εφαρμοστούν και στην κατασκευή στοιχείων μηχανών (εξαιτίας της απόσβεσης αλλά και της ηλεκτρομαγνητικής ασπίδας που προσφέρουν), στον αθλητικό εξοπλισμό και στην ομογενοποιημένη και με σταθερό ρυθμό διοχέτευση αερίων μέσα σε υγρά [7].

1.5 Διεργασία συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding)

Η μέθοδος της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (FSW) της Εικόνας 1.5.1, επινοήθηκε το 1991 από τον Wayne Thomas του Ινστιτούτου Συγκολλήσεων “The Welding Institute”. Χρησιμοποιήθηκε κατά την συσσωμάτωση κραμάτων αλουμινίου για διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Η εν λόγω τεχνική αξιοποιεί τη θερμότητα που παράγεται από την τριβή των προς συγκόλληση υλικών και μέσω της μηχανικής ανάδυσής τους, επιφέρει τοπικά την πλαστική παραμόρφωση και στην συνέχεια την συνένωση αυτών. Κατά την διεργασία FSW, λόγω του διαβαθμισμένου πεδίου θερμότητας, το υλικό μαλακώνει σταδιακά χωρίς να φτάνει την θερμοκρασία τήξης του. Η ανώτερη θερμοκρασία που αναπτύσσεται μεταξύ του εργαλείου και του υλικού προσεγγίζει το 80% του σημείου τήξεως του δευτέρου, με συνέπεια η όλη διαδικασία να πραγματοποιείται σε στερεά κατάσταση [25].

Πρόκειται για μία μέθοδο σύζευξης στερεών υλικών που προσφέρει κατασκευές υψηλής ποιότητας και αντοχής με μικρή παραμόρφωση, τόσο στις συγκολλήσεις συμβολής (butt joints) όσο και επικάλυψης (lap joints). Επιπλέον, χάριν της δυνατότητάς της να δεσμεύει τους αέριους και στερεούς ρύπους και να καταναλώνει χαμηλότερη ενέργεια σε σχέση με τις κλασικές μεθόδους, η FSW έχει χαρακτηριστεί ως οικολογική μέθοδος σύζευξης.

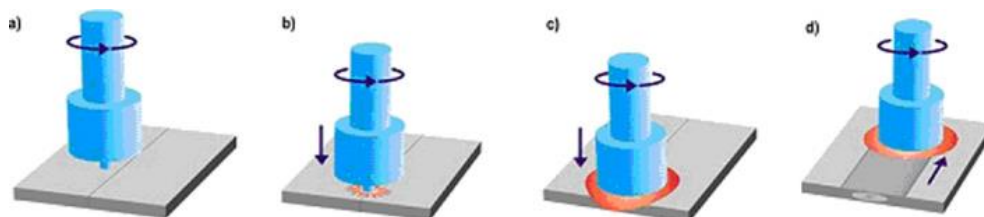


Εικόνα 1.5.1 - Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (FSW).

Διαδικασία

Για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση χρησιμοποιείται ένα μη καταναλισκόμενο περιστρεφόμενο εργαλείο, το οποίο φέρει περιαιχένιο και στην κατάληξή του έναν κατάλληλα σχεδιασμένο πείρο. Το εργαλείο βυθίζεται στο σημείο ένωσης, σε βάθος που δεν ξεπερνά το ύψος του πείρου, και στην συνέχεια μετακινείται πάνω στην γραμμή συγκόλλησης. Στην πρώτη φάση, μέσω της τριβής του με το εργαλείο, το υλικό θερμαίνεται και στην συνέχεια αναδεύεται προκειμένου να ομογενοποιηθεί.

Η θέρμανση του τεμαχίου πραγματοποιείται τοπικά από τον περιστρεφόμενο πείρο, ο οποίος με μεγάλη ταχύτητα περιστροφής «μαλακώνει» το υλικό και αφού εισχωρήσει σε αυτό το ωθεί κατά την φορά κίνησής του και κυκλικά του περιαιχενίου. Η πλαστική παραμόρφωση του υλικού υπό την υψηλή θερμοκρασία που εκλύεται έχει ως αποτέλεσμα την ανακρυσταλλοποίηση του μητρικού υλικού με την παραγωγή λεπτών ισομεγεθών κόκκων. Η αλλαγή της δομής του υλικού επαληθεύεται από τις βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες που παρατηρούνται στην μετέπειτα συμπεριφορά του συσσωματώματος [25, 26].



Εικόνα 1.5.2 - Σχηματική αναπαράσταση της FSW.

1.5.1 Απαραίτητες συνθήκες

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί επιτυχώς η συγκόλληση με την χρήση της μεθόδου FSW, είναι απαραίτητη η εξασφάλιση των συνθηκών που αναφέρονται στην συνέχεια:

- Επαρκής θέρμανση και ανάδευση του μητρικού υλικού

Το μήκος του πείρου πρέπει να υστερεί έναντι του πάχους των συγκολλούμενων επιφανειών και το περιαιχένιο να βρίσκεται συνεχώς σε επαφή με το δοκίμιο. Με αυτόν τον τρόπο αποσοβείται ο κίνδυνος της επαφής του εργαλείου με την τράπεζα εργασίας και παράλληλα επιτυγχάνεται η επιθυμητή θερμότητα για την παραμόρφωση (πλαστικοποίηση) του υλικού.

- Επαρκής Ισχύς μηχανής συγκόλλησης

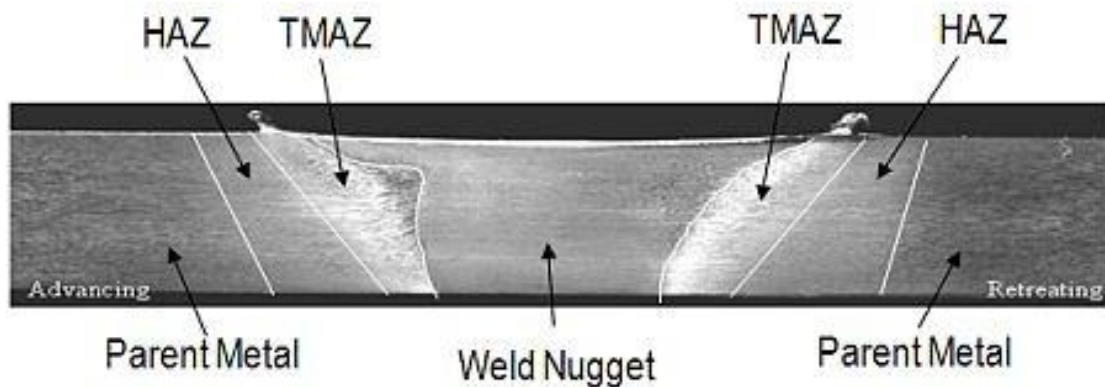
Πέραν της κατάλληλης γεωμετρίας του εργαλείου, πρέπει να παρέχεται η προβλεπόμενη ισχύς της μηχανής για την επίτευξη του επιθυμητού πάχους συγκόλλησης.

- Συγκράτηση Δοκιμίων

Λόγω των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την επαφή του περιστρεφόμενου πείρου με το υλικό και αναμένεται να επιφέρουν τυχόν αστοχίες, κρίνεται απαραίτητη η συγκράτηση του δοκιμίου καθ' όλη τη διαδικασία της συγκόλλησης.

1.5.2 Ζώνες μικροδομής

Κατά την επεξεργασία του υλικού με την μέθοδο FSW παρατηρούνται τέσσερις ζώνες, που διακρίνονται με βάση την κατανομή και το μέσο μέγεθος ανάπτυξης των κόκκων και των κατακρημνισμάτων.



Εικόνα 1.5.2.1 - Ζώνες μικροδομής του υλικού κατά την FSW.

Οι εν λόγω ζώνες περιλαμβάνουν την μη επηρεαζόμενη, την θερμικά επηρεαζόμενη, την θερμομηχανικά επηρεαζόμενη καθώς και την ζώνη ανάδευσης, όπως αυτές εμφανίζονται στην Εικόνα 1.5.2.1.

1. Η μη επηρεαζόμενη ζώνη αναφέρεται στην περιοχή του μητρικού υλικού, το οποίο παρότι έχει υποβληθεί σε έναν θερμικό κύκλο, λόγω της κατεργασίας δεν έχει υποστεί κάποια παραμόρφωση. Ως συνέπεια η μικροδομή του και κατ' επέκταση οι μηχανικές του ιδιότητες δεν έχουν τροποποιηθεί.

2. Στην θερμικά επηρεαζόμενη περιοχή (HAZ), που βρίσκεται ανάμεσα στη μη επηρεαζόμενη και στη θερμομηχανικά επηρεαζόμενη ζώνη (TMAZ), η μικροδομή έχει επηρεαστεί από τον θερμικό κύκλο και το γεγονός αυτό μπορεί να επιφέρει αλλαγή στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Ωστόσο, δεν παρατηρείται πλαστική παραμόρφωση του υλικού στην εν λόγω περιοχή, γι' αυτό και η δομή των κόκκων παραμένει ίδια όπως και στην ζώνη του προδρόμου μετάλλου.

3. Περιμετρικά του πυρήνα δημιουργείται η θερμομηχανικά επηρεαζόμενη ζώνη (TMAZ), στην οποία το υλικό παραμορφώνεται πλαστικά και υφίσταται υψηλές θερμοκρασιακές διαβαθμίσεις. Καθώς παραμορφώνονται οι κόκκοι του υλικού ακολουθούν την ροή ανοδικής φοράς γύρω από την ζώνη που πραγματοποιείται η ανάδευση. Αν και στην θερμομηχανικά επηρεαζόμενη ζώνη οι επιβαλλόμενες τάσεις οδηγούν στην παραμόρφωση των κόκκων, δεν καταφέρνουν να προκαλέσουν την ανακρυστάλλωσή τους.

4. Η ζώνη ανάδευσης (Stir Zone, Weld Nugget), η αλλιώς δυναμικά ανακρυσταλλωμένη ζώνη, έχει μέγιστο πλάτος ίσο με την διάμετρο του περιαιχενίου και μέγιστο ύψος ίσο με το μήκος του πείρου. Ο μηχανισμός ανάδευσης σε αυτή την περιοχή έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη λεπτοκρυσταλλικού μικροδομικού ιστού, ο οποίος επηρεάζεται από την γεωμετρία και την αξονική δύναμη του εργαλείου, την χημική σύσταση του υλικού και την θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την ανάδευση. Λόγω των ισχυρών διατμητικών τάσεων, οι ανακρυσταλλωμένοι κόκκοι του πυρήνα παρουσιάζουν μεγέθη αρκετά μικρότερα των κόκκων του μητρικού υλικού. Το όριο μεταξύ της ζώνης ανάδευσης και της θερμομηχανικά επηρεαζόμενης ζώνης στην υποχωρούσα πλευρά δεν γίνεται εύκολα αντιληπτό, ενώ αντίθετα στην προωθούμενη η εν λόγω διεπιφάνεια εμφανίζεται αρκετά έντονη. Το γεγονός αυτό στηρίζεται στην αραιή εμφάνιση των διαταραχών γύρω από τους ανακρυσταλλωμένους κόκκους του πυρήνα [26].

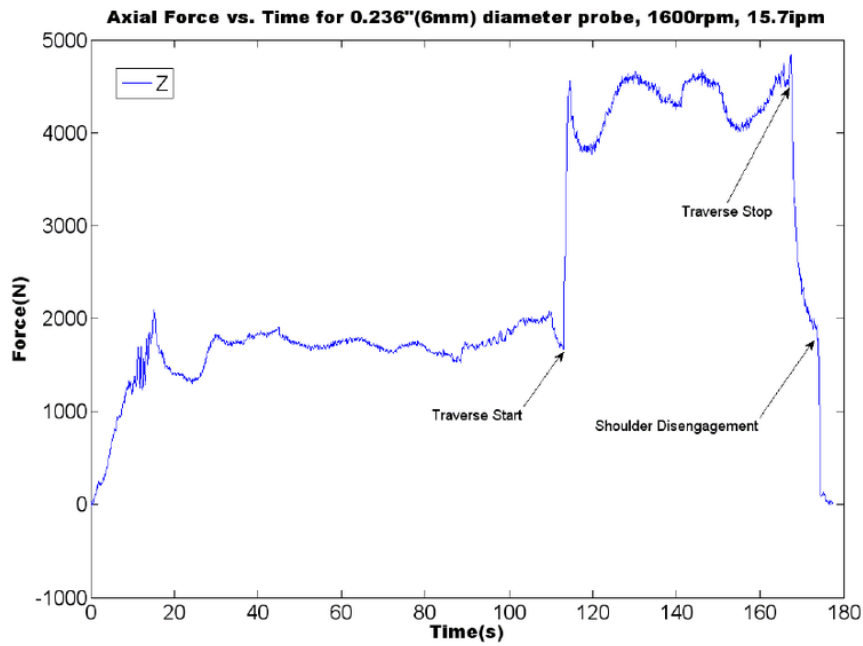
1.5.3 Παράμετροι συγκόλλησης - επεξεργασίας

Οι παράμετροι που επηρεάζουν κατά κύριο λόγο το αποτέλεσμα της μεθόδου FSW είναι:

- ο ρυθμός περιστροφής του εργαλείου
- η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου

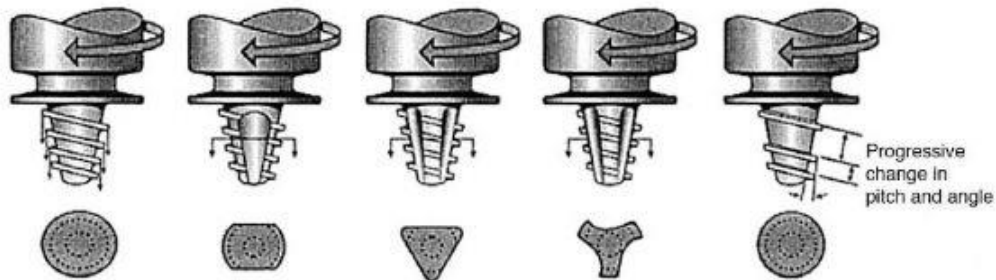
Η περιστροφή του εργαλείου προκαλεί την ανάμιξη των υλικών και ταυτόχρονα η κίνηση του, κατά μήκος της γραμμής συνένωσης, ωθεί το αναδευόμενο υλικό από το εμπρόσθιο μέρος του πείρου στο οπίσθιο. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα περιστροφής του πείρου τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμότητα που παράγεται λόγω τριβής, άρα και η ανάδευση που επιτυγχάνεται. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως στις συνθήκες κατεργασίας εμπίπτει ο αριθμός των επαναλήψεων της διαδικασίας, αφού όσο περισσότερες φορές το εργαλείο επαναλαμβάνει την διαδικασία τόσο καλύτερα χαρακτηριστικά εμφανίζει το τελικό υλικό.

Στην συνέχεια, η κάθετη δύναμη που ασκεί το εργαλείο και επηρεάζεται από το σχήμα του περιαιχενίου και τα χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής, διαμορφώνει με την σειρά της το αποτέλεσμα της επιφάνειας του υλικού αλλά και την ποιότητα του πυρήνα.

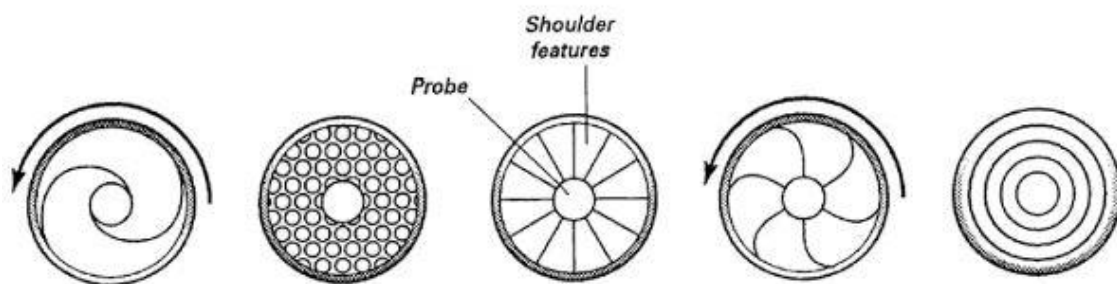


Εικόνα 1.5.3.1 - Γραφική παράσταση κάθετης δύναμης προς το χρόνο κατά την FSW.

Ακόμη, η γεωμετρία του εργαλείου αποτελεί καθοριστικό παράγοντα τόσο στην διαδικασία συγκόλλησης όσο και στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Το περιαιχένιο του εργαλείου (Εικόνα 1.5.3.2) συναντάται σε επίπεδη μορφή, ενώ ο πείρος εμφανίζεται κυλινδρικός (με σπείρωμα ή χωρίς), τριγωνικός, τετραγωνικός κ.ά., με μήκος μικρότερο από το πάχος των συγκολλούμενων υλικών κατά 0.2 mm. Με την κάθοδο του εργαλείου ο πείρος βυθίζεται ολοκληρωτικά και στην συνέχεια βυθίζεται ένα μικρό μέρος και του περιαιχηνίου.



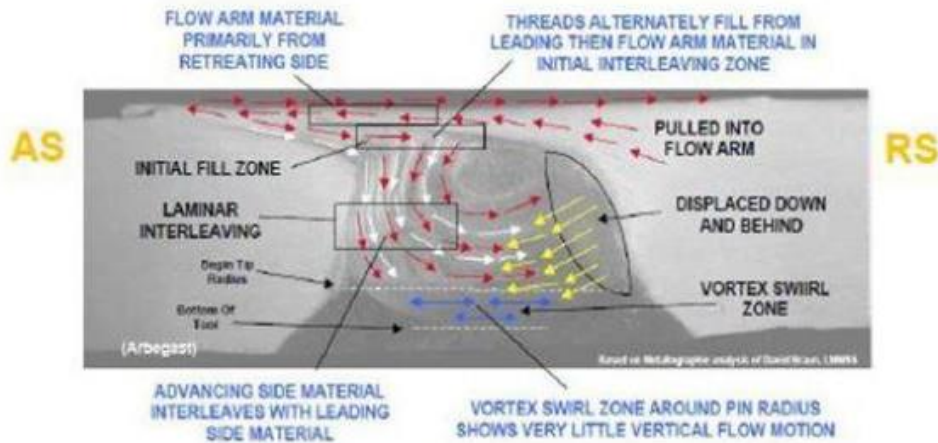
Εικόνα 1.5.3.2 - Γεωμετρίες εργαλείων για FSW.



Εικόνα 1.5.3.3 - Γεωμετρίες περιαιχνίων για FSW.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η θερμότητα που παράγεται για την ανάδευση του υλικού επέρχεται από την επαφή του με τον περιστρεφόμενο πείρο και στην συνέχεια με το περιαιχνίο του εργαλείου. Σε περίπτωση που το εργαλείο δεν παρουσιάσει την επαρκή σκληρότητα ώστε να παραμείνει ανέπαφο στις υψηλές θερμοκρασίες που προκαλεί, τότε αρχίζει να φθείρεται και δεν επιτυγχάνεται η σωστή ανάδευση του υλικού. Για αυτό το λόγο, για την κατασκευή του εργαλείου χρησιμοποιούνται συνήθως χάλυβες υψηλής κραμάτωσης ή συστήματα κεραμικών φάσεων. Επιπλέον, αν ο λόγος των διαμέτρων πείρου-περαιχνίου δεν είναι ο προβλεπόμενος, δύναται να δημιουργηθούν ατέλειες εξαιτίας της κακής ανάδευσης του υπό επεξεργασία υλικού και να υποτιμηθούν οι προσδοκώμενες μηχανικές αλλά και χημικές του ιδιότητες [25, 26, 28].

Αξίζει να σημειωθεί ότι η κακή ανάδευση δεν επηρεάζεται μόνο από κακές αναλογίες στην γεωμετρία του εργαλείου, αλλά και από τις ροοστατικές διαβαθμίσεις της μάζας του υλικού που αναδύεται [27].

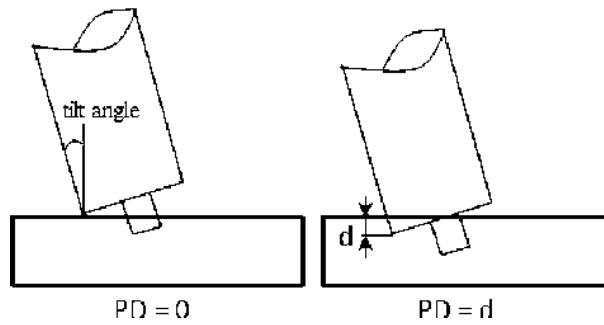


Εικόνα 1.5.3.4 - Αναπαράσταση ροής μετάλλου κατά την FSW.

Η επιλογή των παραπάνω παραμέτρων πρέπει να γίνεται αφού ληφθούν υπ όψιν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του προς κατεργασία υλικού, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται το βέλτιστο αποτέλεσμα. Το κυριότερο αυτών είναι η σκληρότητα, η οποία καθορίζει τη ροή του υπό κατεργασία υλικού και υποδεικνύει την επιλογή του υλικοτεχνικού εξοπλισμού που δύναται να χρησιμοποιηθεί. Εξέχουσας σημασίας είναι η θερμική συμπεριφορά του μητρικού υλικού, που καθορίζει τις αλλαγές που αναμένεται να εμφανιστούν στην μικροδομή του τελικού προϊόντος με την χρήση της εν λόγω διεργασίας. Ο τρόπος με τον οποίο το μέταλλο διασπείρεται εξαρτάται από το υλικό του δοκιμίου, την γεωμετρία του εργαλείου, και τις παραμέτρους της μεθόδου. Μέσα από την κατανόηση των χαρακτηριστικών της ροής του υλικού δύναται να επιτευχθεί ο βέλτιστος σχεδιασμός του εργαλείου και να αποδώσει η διαδικασία το καλύτερο αποτέλεσμα.

Βάθος διείσδυσης

Το βάθος διείσδυσης του πείρου αποτελεί μια ακόμη σημαντική παράμετρο στην εν λόγω κατεργασία. Ως βάθος διείσδυσης ορίζουμε το κατώτερο σημείο του πείρου που βρίσκεται βυθισμένο στο υλικό.



Εικόνα 1.5.3.5 - Σχηματική αναπαράσταση του βάθους περιαιχενίου.

Αν το βάθος είναι μικρό τότε:

- Δεν προσφέρεται το ποσό θερμότητας που απαιτείται για την πλαστική παραμόρφωση.
- Δεν επιτυγχάνεται επαρκής ανάμιξη καθώς το περιαιχένιο δεν εφάπτεται στο υλικό και άρα το υλικό δεν αναμειγνύεται από την περιστροφή του περιαιχενίου.
- Δεν περιορίζεται το υλικό στην ζώνη ανάδευσης του.

Αν το βάθος είναι μεγάλο (έχει διαφορά <0.2 mm από το πάχος του υλικού) τότε αντίστοιχα:

- Δημιουργείται μεγάλο στρώμα υπολείμματος (γρέζι) εκατέρωθεν του περιαιχενίου που επιφέρει ατέλειες στην όψη του τελικού προϊόντος και τοπική μείωση πάχους του υλικού. Επομένως οδηγεί στην υποτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού.
- Αναμένεται επαφή του πείρου με την επιφάνεια στήριξης του δοκιμίου, με συνέπεια την φθορά του εργαλείου.

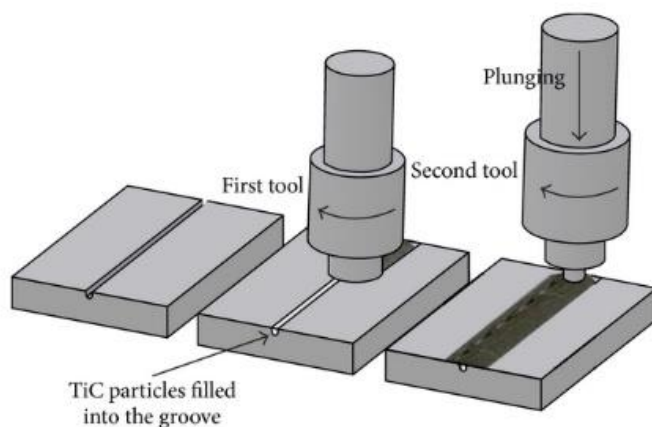
Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις και κατόπιν δοκιμών, έχει διαπιστωθεί πως η διαδικασία ανταποκρίνεται καλύτερα με την κλίση του εργαλείου κατά $2^\circ - 4^\circ$. Με την τροποποίηση αυτή, το οπίσθιο μέρος αναφέρεται στο βάθος διείδυσης αφού βρίσκεται πλέον στην χαμηλότερη θέση [25].

1.6 Κατεργασία δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Processing)

Η κατεργασία δια τριβής με ανάδευση (FSP) βασίζεται στις αρχές της αντίστοιχης διεργασίας συγκόλλησης (FSW), στοχεύοντας ωστόσο στην μεταβολή της φύσης του υλικού. Πρόκειται για μία κατεργασία που στοχεύει στην αλλαγή της μικροδομής του μετάλλου σε λεπτόκοκκη για την βελτίωση των μηχανικών και χημικών ιδιοτήτων του. Με το πέρας της μεθόδου FSP παρατηρείται βελτίωση της ολκιμότητας, αλλά και της αντοχής του υλικού σε οξείδωση-κόπωση και είναι δυνατή η εξάλειψη αστοχιών που ενδέχεται να υπάρχουν προγενέστερα στην επιφάνειά του. Επιπλέον, με την επιφανειακή αυτή τεχνική είναι δυνατή η παραγωγή σύνθετου επιφανειακού υποστρώματος (MMC) στα κράματα αλουμινίου και η ομογενοποίηση αυτών [25].

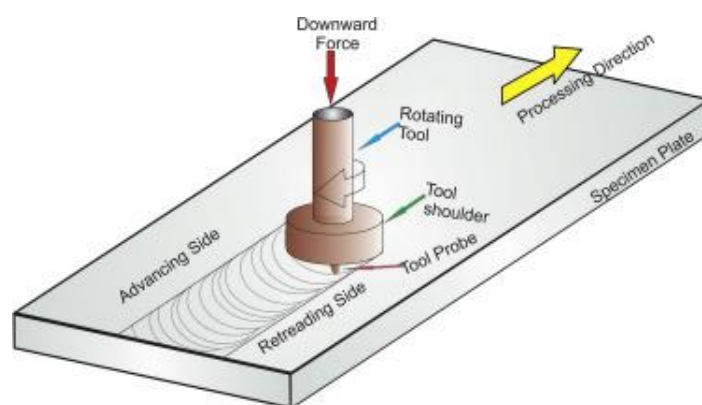
Διαδικασία

Όπως και στην διεργασία FSW, ένα περιστρεφόμενο εργαλείο που αποτελείται από περιαιχένιο και πείρο με κατάλληλο σπείρωμα βυθίζεται στο υλικό που προορίζεται για βελτίωση. Από την επαφή του πείρου με το πρόδρομο υλικό επιτυγχάνεται το απαιτούμενο ποσό θερμότητας για την εισχώρηση. Στην συνέχεια, η θερμοκρασία του υλικού αυξάνεται εκ νέου με την εισχώρηση του περιαιχενίου (πλαστική παραμόρφωση) και το εργαλείο κινείται κατά μήκος της περιοχής του πρόσθετου υλικού. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας πραγματοποιείται η ανάμειξη των δύο υλικών και απομακρύνεται η περισσευούμενη ποσότητα.



Εικόνα 1.6.1 - Κατεργασία δια τριβής με ανάδευση (FSP).

Η κατά μήκος κίνηση και περιστροφή του εργαλείου που φαίνονται στην Εικόνα 1.6.2, καθορίζουν στην μέθοδο FSP την προωθούμενη και την υποχωρίζουσα πλευρά του υλικού εκατέρωθεν της ραφής κατεργασίας. Με την περιστροφή του εργαλείου προκαλείται μια αξονική δύναμη που αναγκάζει την διασπορά του υλικού γύρω από την ραφή που δημιουργείται. Η πλευρά στην οποία οι ταχύτητες περιστροφής και πρόωσης του εργαλείου είναι ομόρροπες ονομάζεται προωθούμενη πλευρά, ενώ η αντίστοιχη όπου οι δύο ταχύτητες είναι αντίρροπες ονομάζεται υποχωρούσα. Το υλικό που βρίσκεται στην προωθούμενη πλευρά περιστρέφεται μαζί με τον πείρο του εργαλείου και ωθείται σε ανώτερη επιφάνεια από την αρχική του. Αντίθετα, το υλικό της υποχωρούσας οδηγείται εξαιτίας της πρόωσης του εργαλείου στις κενές θέσεις που έχουν δημιουργηθεί από την προηγούμενη περιστροφή.



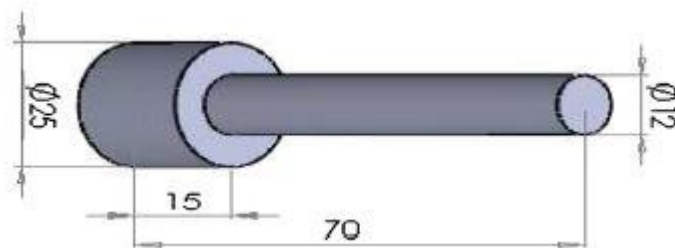
Εικόνα 1.6.2 - Σχηματική αναπαράσταση της FSP.

Η ροή του υλικού από την υποχωρούσα πλευρά προς την προωθούμενη λόγω περιστροφής του πείρου-περιαυχενίου, είναι υπεύθυνη για την δημιουργία του flow arm, φαινόμενο κατά το οποίο παρατηρείται συσσώρευση πρόσθετου υλικού στην προωθούμενη πλευρά, το οποίο όμως δεν εμφανίζεται κατά αντιστοιχία στην υποχωρούσα.

1.7 Διεθνής Βιβλιογραφία

Οι Adem Kurt, Ilyas Uygur και Eren Cete [29] μελέτησαν την επιρροή των ταχυτήτων περιστροφής και πρόωσης στην μικροδομή του υλικού κατά την διεργασία της FSP. Ως υλικό βάσης χρησιμοποίησαν πλάκες αλουμινίου 1050 για την δημιουργία επιφανειακού στρώματος με ή χωρίς την παρουσία σωματιδίων καρβιδίου του πυριτίου (SiC). Για την διεξαγωγή συμπερασμάτων, τα δοκίμια εξετάστηκαν ως προς την εσωτερική τους μορφολογία με την χρήση μικροσκοπίου και υποβλήθηκαν σε δοκιμές ώστε να καταγραφεί η μηχανική τους απόκριση.

Τα σωματίδια ενίσχυσης (SiC) είχαν μέση διάμετρο 10 μm και αναμείχθηκαν με μικρή ποσότητα μεθανόλης πριν εφαρμοστούν στην επιφάνεια των πλακών. Οι διαστάσεις των δοκιμών που εξετάστηκαν ήταν 50 mm * 100 mm * 5 mm, ενώ οι διαστάσεις του κυλινδρικού άνευ πείρου εργαλείου (χάλυβας 1050) της κατεργασίας παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.7.1.

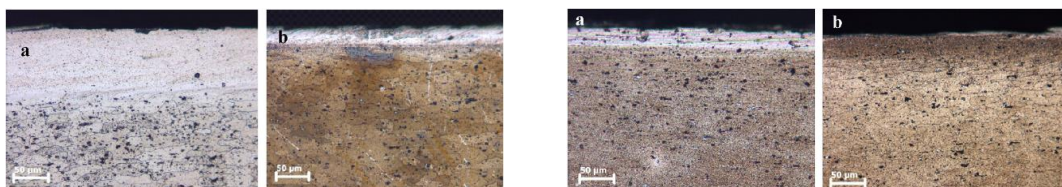


Εικόνα 1.7.1 - Γεωμετρία εργαλείου FSP.

Η κατεργασία πραγματοποιήθηκε με ωρολογιακή φορά του εργαλείου, με βάθος διείσδυσης του περιαιχενίου 0.1 mm και υπό γωνία ατράκτου 2° . Οι δοκιμές σε μέτρηση της σκληρότητας των υλικών πραγματοποιήθηκαν με την επιβολή φορτίου 100 g στην επιφάνεια των δοκιμών, ενώ για την δοκιμή κάμψης τριών σημείων εξετάστηκαν δείγματα διαστάσεων 10 mm * 100 mm * 5 mm, με επιβαλλόμενο φορτίο 50 kN και σταθερά παραμόρφωσης 2 mm/min.

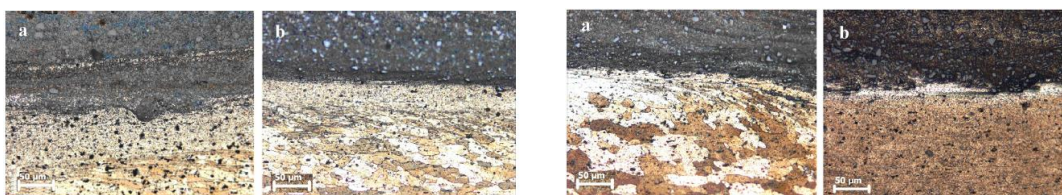
Από την διεξαγωγή των πειραμάτων προέκυψε πως ανεξάρτητα από την παρουσία των σωματιδίων SiC, για την ίδια ταχύτητα περιστροφής, οι μεγάλες ταχύτητες πρόωσης οδηγούσαν σε μείωση της τροποποιημένης επιφάνειας. Αντίθετα, για σταθερή ταχύτητα

πρόωσης, η αύξηση των ταχυτήτων περιστροφής, λόγω της αυξημένης προσφερόμενης θερμότητας, οδηγούσε σε αύξηση της επιφάνειας που επηρεάζονταν από την κατεργασία.



Εικόνα 1.7.2 - Μικροδομή κατεργασμένων δειγμάτων κατά FSP.

Στο αριστερό μέρος της Εικόνας 1.7.2 απεικονίζεται η μικροδομή των κατεργασμένων κατά FSP δοκιμίων για σταθερή ταχύτητα περιστροφής $\omega = 500$ rpm στις περιπτώσεις (a) $v = 15$ mm/min και (b) $v = 30$ mm/min. Στο δεξιό μέρος για σταθερή ταχύτητα πρόωσης $v = 20$ mm/min και ταχύτητες περιστροφής (a) $\omega = 500$ rpm και (b) $\omega = 1000$ rpm.



Εικόνα 1.7.3 Μικροδομή κατεργασμένων δειγμάτων κατά FSP με παρουσία σωματιδίων SiC.

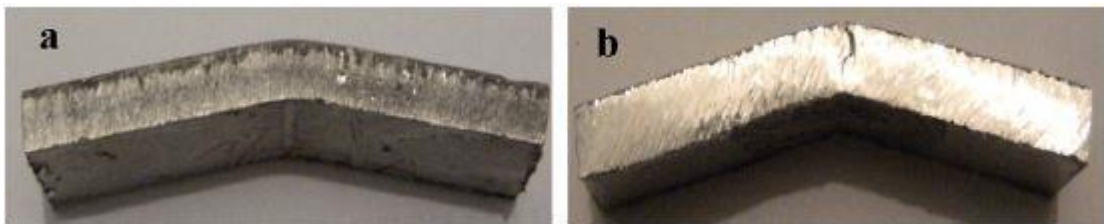
Αντίστοιχα, στην Εικόνα 1.7.3 παρουσιάζεται στο αριστερό μέρος η μικροδομή του κράματος με την προσθήκη σωματιδίων SiC για σταθερή ταχύτητα περιστροφής $\omega = 500$ rpm στις περιπτώσεις (a) $v = 15$ mm/min και (b) $v = 30$ mm/min και στο δεξί η μικροδομή του υλικού για σταθερή ταχύτητα πρόωσης $v = 20$ mm/min σε συνθήκες περιστροφής (a) $\omega = 500$ rpm και (b) $\omega = 1000$ rpm.

Αναφορικά με την κατανομή των σκληροτήτων για τους συνολικά 9 διαφορετικούς σχεδιασμούς για το απλό και αντίστοιχα το ενισχυμένο κράμα, προέκυψαν τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στην Εικόνα 1.7.4.

Rotation speed (rpm)	Travelling speed (mm/min)	Hardness (Hv) [plain]	Hardness (Hv) [SiC added]
500	15	70	147
	20	79	128
	30	80	120
700	15	52	146
	20	60	133
	30	68	123
1000	15	37	150
	20	45	128
	30	60	120

Εικόνα 1.7.4 - Τιμές σκληρότητας των κατεργασμένων δοκιμίων.

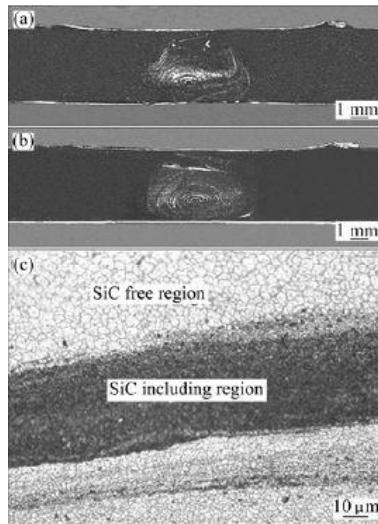
Για τις δοκιμές κάμψης τριών σημείων τα δοκίμια παραμορφώθηκαν μέχρι τον σχηματισμό γωνίας 30° , με ταχύτητες περιστροφής $\omega = 1000$ rpm και πρόωσης $v = 15$ mm/min και παρουσίασαν αυξημένες τιμές τάσεων 60 MPa και 84 MPa αντίστοιχα, από 28 MPa που είχε το ακατέργαστο κράμα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.7.5, η παρουσία σωματιδίων SiC στο κράμα στοίχισε στην ολκιμότητά του.



Εικόνα 1.7.5 - Κατεργασμένα δείγματα (a) χωρίς και (b) με την παρουσία σωματιδίων SiC.

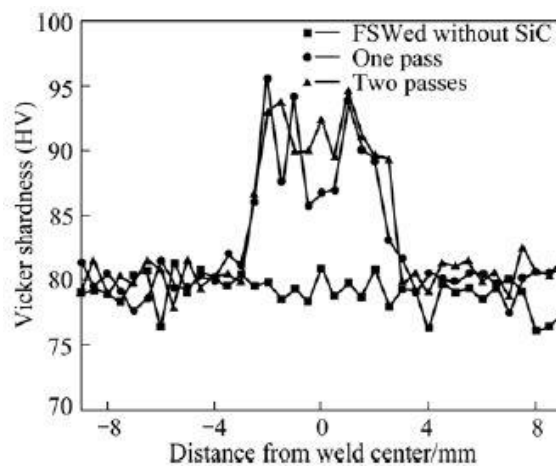
Οι Byung-Wook AHN, Don-Hyun CHOI, Yong Hwan KIM και Seung-Boo JUNG [30] δημιούργησαν συνθετικό υλικό με την χρήση αλουμινίου 5083, ενισχυμένο με σωματίδια SiC διαμέτρου 4 μ m και μελέτησαν πώς επηρεάζει ο αριθμός των επαναλήψεων την κατανομή των σωματιδίων και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Οι πλάκες αλουμινίου 5083 είχαν διαστάσεις 140 mm * 70 mm * 4 mm, με αύλακες βάθους-ύψους 1 mm * 2 mm για την τοποθέτηση του κεραμικού υλικού. Το εργαλείο κατά την διάρκεια των κατεργασιών είχε σταθερή ταχύτητα περιστροφής και πρόωσης στις 1800 rpm και 22 mm/min αντίστοιχα με κλίση ατράκτου στις 3° .



Εικόνα 1.7.6 - Μακροσκοπική απεικόνιση των ζωνών ανάδευσης για (a) ένα πέρασμα, (b) δύο περάσματα και (c) εικόνα ζώνης ανάδευσης από μικροσκόπιο.

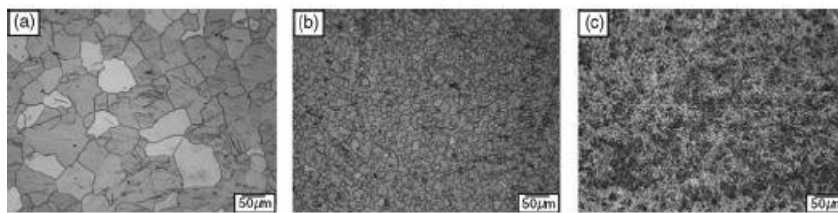
Σύμφωνα με τις εικόνες που παρουσιάζονται για τις ζώνες ανάδευσης και συγκεκριμένα στις περιπτώσεις για (a) ένα και (b) δύο περάσματα, με την αύξηση του αριθμού περασμάτων παρατηρείται καλύτερη ομοιογένεια. Ακόμη βάσει της Εικόνας 1.7.7, με την προσθήκη σωματιδίων SiC παρατηρείται αύξηση των τιμών μικροσκληρότητας και επιπλέον ομαλότερη κατανομή τιμών για την περίπτωση εφαρμογής δύο περασμάτων συγκριτικά με εκείνη της μίας.



Εικόνα 1.7.7 - Προφίλ μικροσκληρότητας κατεργασμένου δοκιμίου.

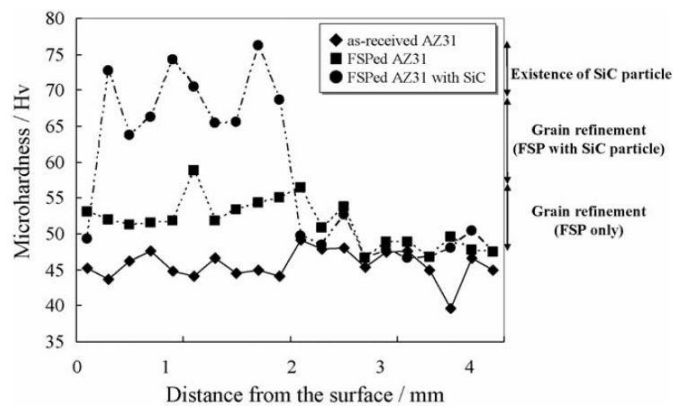
Οι Y.Morisada, Η Fujii, T.Nagaoka και M.Fukusumi [31] μελέτησαν, παρουσία σωματιδίων SiC σε μήτρα AZ31, την επίδραση της FSP στην μικροδομή και σκληρότητα του σύνθετου υλικού και επιπλέον παρατήρησαν την απόκριση των δοκιμών, με ή χωρίς την παρουσία σωματιδίων ενίσχυσης, σε υψηλές θερμοκρασίες.

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε σκόνη SiC διαμέτρου 1 μm η οποία τοποθετήθηκε εντός αυλακών με διαστάσεις 1 mm * 2 mm σε πλάκες AZ31. Το εργαλείο κατεργασίας διέθετε περιαυχένιο διαμέτρου 12 mm και πείρο με μήκος 1.8 mm και διάμετρο 4 mm. Η ταχύτητα περιστροφής καθ' όλη την διάρκεια ήταν σταθερή στις 1500 rpm ενώ η ταχύτητα πρόωσης κυμαινόταν από 25 έως 200 mm/min, με γωνία ατράκτου στις 3°. Δεδομένων των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στην συνέχεια, η FSP οδήγησε σε μείωση του μεγέθους των κόκκων σε σχέση με το ακατέργαστο κράμα και επιπλέον, με την παρουσία SiC, σε περαιτέρω μείωσή τους.

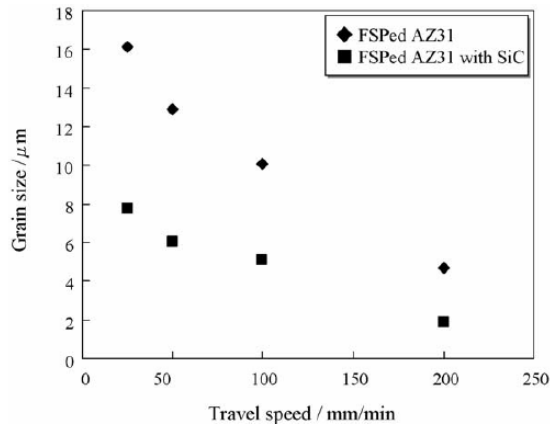


Εικόνα 1.7.8 - Απεικόνιση μεγέθους κόκκων για (a) ακατέργαστο AZ31, (b) κατεργασμένο AZ31, (c) με παρουσία σωμα. SiC (για b,c η ταχύτητα πρόωσης ήταν 50 mm/min).

Στην Εικόνα 1.7.9 απεικονίζεται το προφίλ μικροσκληρύνσεων για τις τρεις περιπτώσεις.



Εικόνα 1.7.9 - Προφίλ μικροσκληρότητας για AZ31 ακατέργαστο, κατεργασμένο και ενισχυμένο με σωματίδια SiC.



Εικόνα 1.7.10 - Σχέση μεγέθους κόκκων-ταχύτητας πρόωσης εργαλείου.

Μετά την έκθεση των δοκιμών σε θερμοκρασίες 200 °C, 300 °C και 400 °C για 1 ώρα σε επαγωγικό φούρνο, διαπιστώθηκε πως το κατεργασμένο υλικό χωρίς την παρουσία SiC παρουσίασε ασταθή συμπεριφορά μετά τους 300 °C, σε αντίθεση με το ενισχυμένο το οποίο είχε ίδιο μέγεθος κόκκων ακόμη και στους 400 °C.

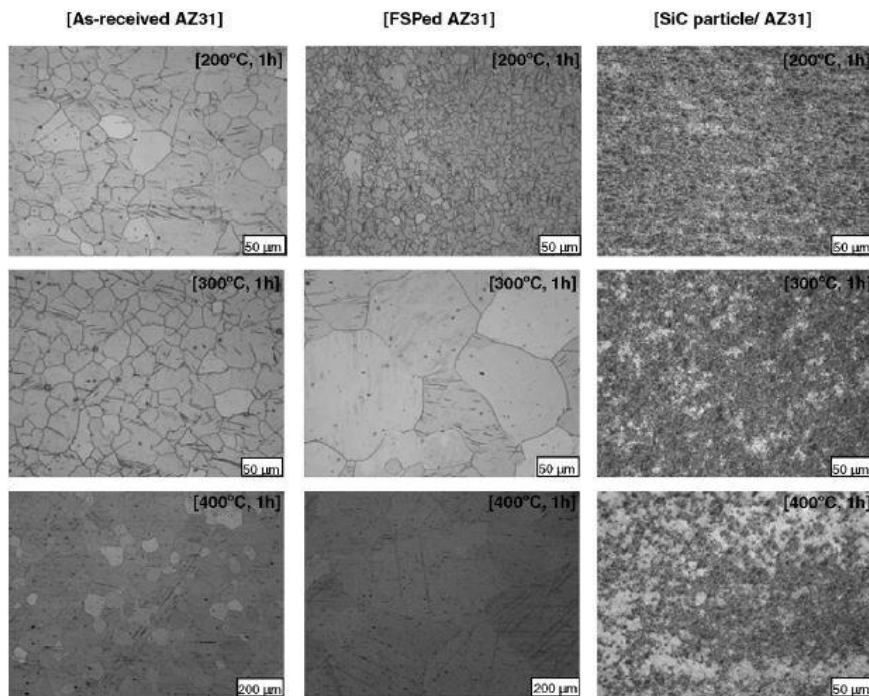
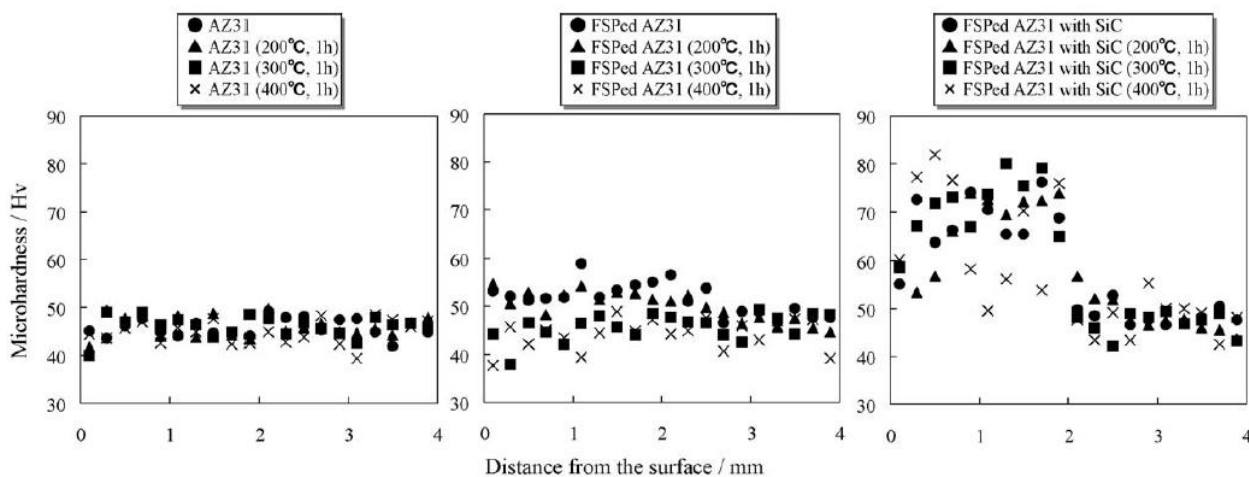


Fig. 9. Representative grain structures of the stir zone after the heat treatment.

Εικόνα 1.7.11 - Απεικόνιση κόκκων για AZ31 ακατέργαστο, κατεργασμένο και ενισχυμένο με SiC.

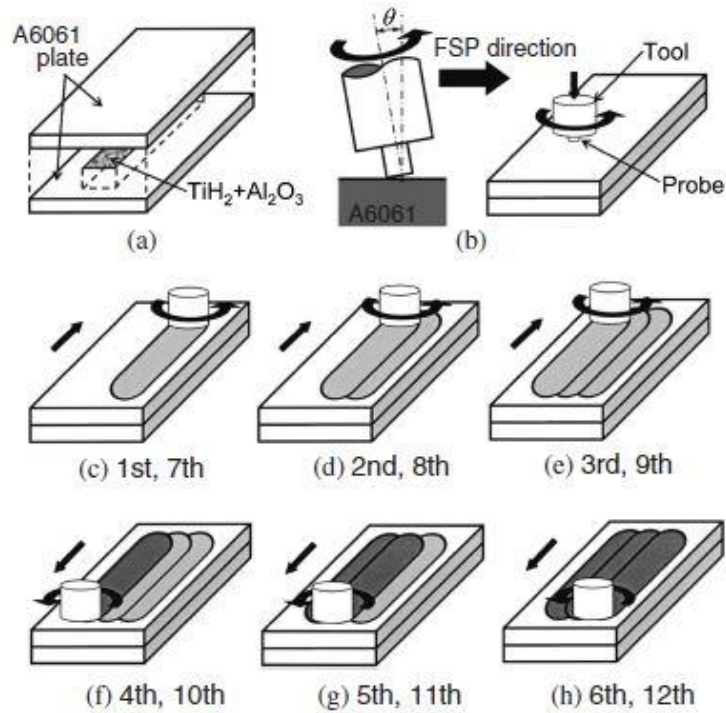
Επιπλέον η ίδια αστάθεια παρατηρήθηκε κατά τις μετρήσεις μικροσκληρότητας (Εικόνα 1.7.12) για τα θερμικά κατεργασμένα δοκίμια συγκριτικά με το ακατέργαστο υλικό.



Εικόνα 1.7.12 - Κατανομή μικροσκληρότητας για AZ31 ακατέργαστο, κατεργασμένο με FSP και ενισχυμένο με SiC.

Η ομάδα των Takao Utsunomiya, Ken-ichi Tamura, Yoshihiko Hangai, Osamu Kuwazuru και Nobuhiro Yoshikawa [32] μελέτησε τον τρόπο που επηρεάζουν η ταχύτητα περιστροφής και επανάληψη διαδικασίας (περάσματα) της FSP το πορώδες του τελικού αφρού. Το υλικό βάσης που επιλέχθηκε ήταν πλάκες αλουμινίου 6061, στις οποίες προστέθηκε μίγμα αλουμίνας (Al_2O_3 , ~1 μm διάμετρο) με υδρίδιο του τιτανίου (TiH_2 , < 45 μm διάμετρο).

Οι πλάκες αλουμινίου 6061 που τοποθετήθηκαν η μία πάνω στην άλλη είχαν διαστάσεις 230 mm * 98 mm * 3.5 mm η κάθε μία και περιείχαν εντός τους την σκόνη του μίγματος σε έκταση 150 mm * 15 mm. Το εργαλείο κατεργασίας διέθετε περιουχένιο διαμέτρου 17 mm και πείρο διαμέτρου 6 mm και μήκους 5 mm. Η μάζα του TiH_2 αντιστοιχούσε στο 1% της έκτασης κράματος αλουμινίου που κάλυπτε το μίγμα, ενώ η σκόνη αλουμίνας στο 10%. Η ταχύτητα πρόωσης ήταν σταθερή με τιμή 100 mm/min καθ' όλη την διάρκεια των κατεργασιών με κλίση ατράκτου 3°, ενώ η ταχύτητα περιστροφής μεταβάλλονταν ανά 400 στροφές μεταξύ του εύρους 1000 – 2200 rpm. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με αλλαγή κατευθύνσεων όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1.7.13.

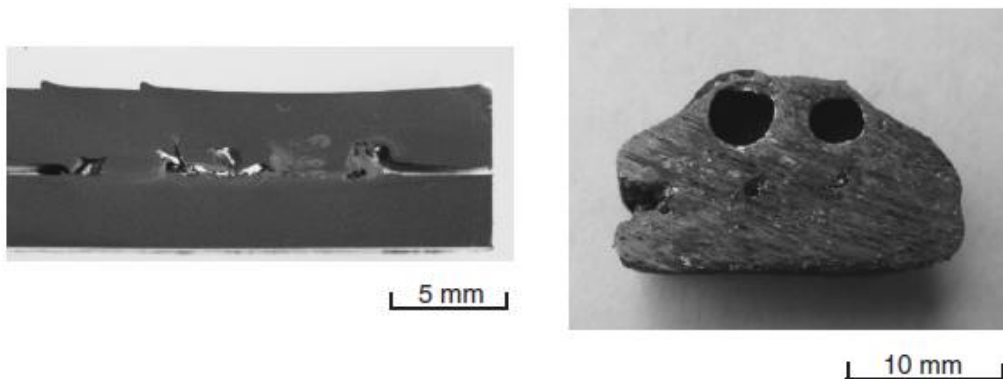


Εικόνα 1.7.13 - Στάδια περασμάτων της FSP.

Τα πρόδρομα δοκίμια, που παρασκευάστηκαν από την FSP, τοποθετήθηκαν σε προθερμασμένο επαγωγικό φούρνο με θερμοκρασίες από 988 K έως 1018 K, με εναλλαγή τιμών ανά 15 K και με διάρκειες 11, 12 και 13 min.

Από τα πρόδρομα και τα αφροποιημένα δοκίμια προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

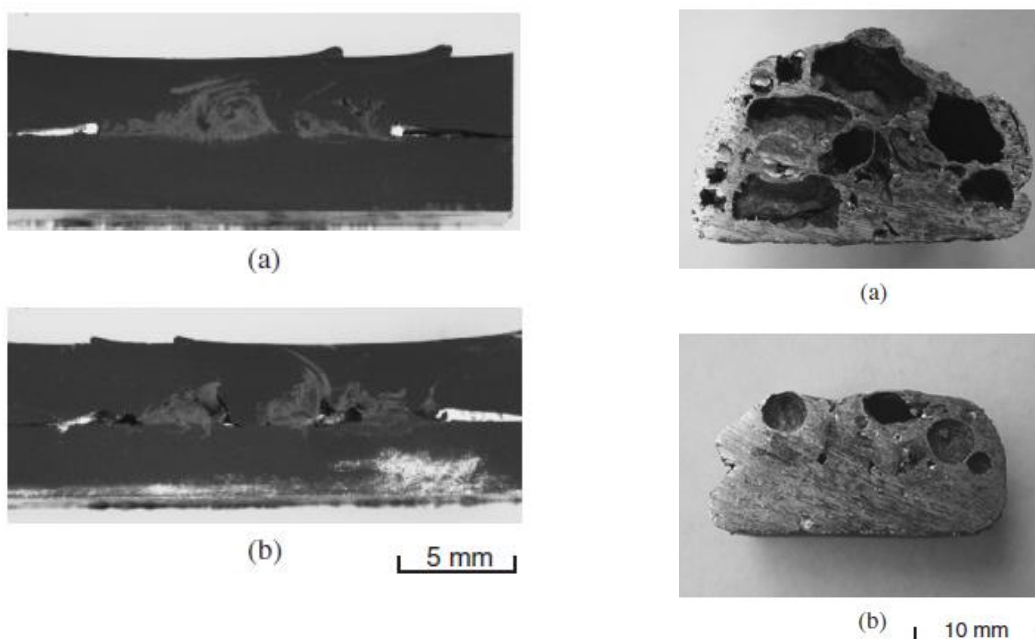
- Το δοκίμιο για ένα πέρασμα εμφάνισε πορώδες $p = 21.8\%$, διάμετρο πόρων $d_m = 1.1 \text{ mm}$ και καμπυλότητα $e_m = 1.0 \text{ mm}$.



Εικόνα 1.7.14 - Πρόδρομο και αφροποιημένο δοκίμιο για 1 πέρασμα σε ταχύτητα περιστροφής 1400 rpm.

- Αντίστοιχα τα δοκίμια για 2 περάσματα παρουσίασαν για (a) 1400 rpm : πορώδες $p = 47.7\%$, διάμετρο πόρων $d_m = 1.4 \text{ mm}$ και καμπυλότητα $e_m = 0.83 \text{ mm}$.

(b) 2200 rpm: πορώδες $p = 22.1\%$, διάμετρο πόρων $d_m = 0.37 \text{ mm}$ και καμπυλότητα $e_m = 0.86 \text{ mm}$.

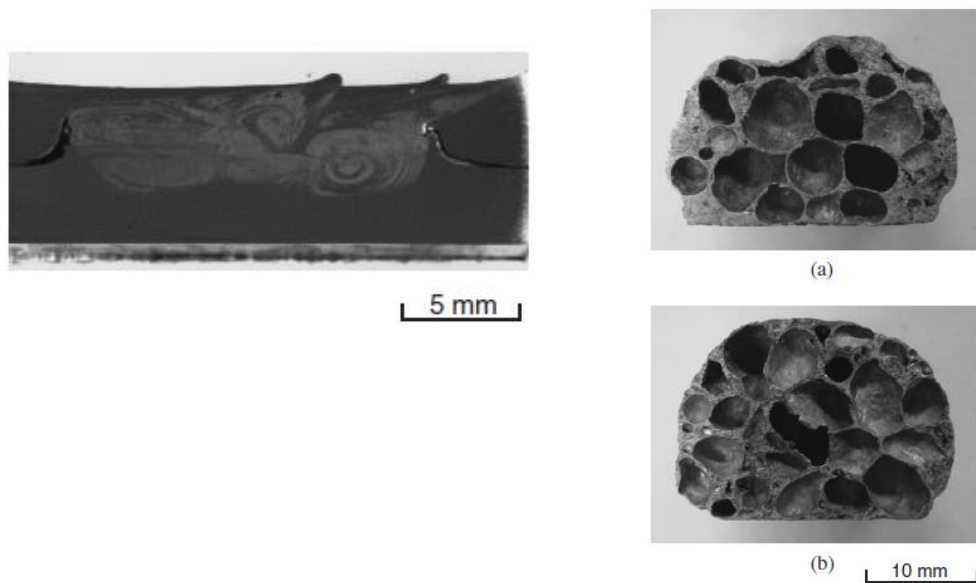


Εικόνα 1.7.15 - Πρόδρομο και αφροποιημένο δοκίμιο για 2 περάσματα με ταχύτητα περιστροφής (a) 1400 rpm και (b) 2200 rpm.

- Για τα δοκίμια με 4 περάσματα μετά την αφροποίηση προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

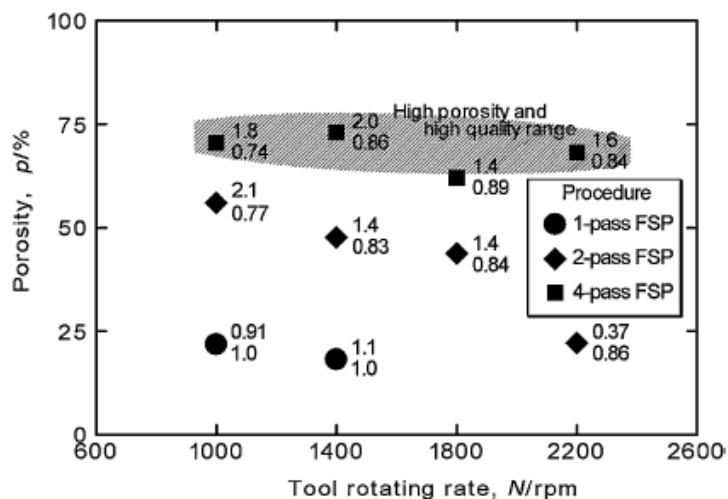
(a) 1000 rpm, πορώδες $p = 70.4\%$, διάμετρο πόρων $d_m = 1.8 \text{ mm}$ και καμπυλότητα $e_m = 0.74 \text{ mm}$ και

(b) 2200 rpm, πορώδες $p = 68.1\%$, διάμετρο πόρων $d_m = 1.6 \text{ mm}$ και καμπυλότητα $e_m = 0.84 \text{ mm}$.



Εικόνα 1.7.16 - Πρόδρομο υλικό για 4 περάσματα στις 1400 rpm (αριστερά), αφροποιημένα δοκίμια για 4 περάσματα στις (a) 1000 rpm και (b) 2200 rpm.

Ακόμη, από την έρευνα εξήχθη το συμπέρασμα πως με τέσσερα περάσματα είναι δυνατή η παρασκευή αφρών αλουμινίου 6061 με πορώδες που προσεγγίζει το 70%. Ακόμη για αφρούς υψηλού πορώδους και συγχρόνως καλής ποιότητας, οι ταχύτητες περιστροφής πρέπει να κυμαίνονται από 1000 – 2200 rpm σύμφωνα με την Εικόνα 1.7.17.



Εικόνα 1.7.17 - Σχέση πορώδους-ταχύτητας περιστροφής.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας και αφορά στην δημιουργία και βελτιστοποίηση σύνθετου υλικού μεταλλικής μήτρας, καθώς και στην μετέπειτα αφροποίηση του μέσω θερμικής κατεργασίας. Το πρόδρομο αφροποιήσιμο υλικό προέκυψε από τον συνδυασμό του κράματος αλουμινίου 5083, που χρησιμοποιήθηκε υπό την μορφή πλακών με τον αφριστικό παράγοντα TiH_2 (υδρίδιο τιτανίου) και το ενισχυτικό φάσης SiC (καρβίδιο πυριτίου), μέσω κατεργασίας δια τριβής με ανάδευση (FSP). Το μίγμα αφριστικού παράγοντα-κεραμικών σωματιδίων εισήχθη σε αύλακες που δημιουργήθηκαν ύστερα από επεξεργασία των πλακών και αναμείχθηκε με το μέταλλο βάσης μέσω της διεργασίας FSP. Το βάθος των αυλακώσεων όπως και ο αριθμός επανάληψης της διαδικασίας της διεργασίας για κάθε αύλακα, μαζί με την διάρκεια παραμονής των δοκιμών εντός του επαγωγικού φούρνου, εξετάστηκαν κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Τα αφροποιημένα δοκίμια μελετήθηκαν στερεοσκοπικά και μικροσκοπικά σε συνδυασμό με τα πρόδρομα. Στα πρώτα εξετάστηκε η εσωτερική μορφολογία και το μέγεθος των πόρων, ενώ στα δεύτερα μελετήθηκε το μέγεθος και η ομοιομορφία της ζώνης ανάδευσης με βάση τις ισχύουσες παραμέτρους. Από την ερμηνεία των παραπάνω και τον μεταξύ τους συνδυασμό, για κάθε ένα από τα υπό εξέταση δοκίμια, εξήχθησαν συμπεράσματα τόσο για την μικροδομή του σύνθετου μεταλλικού υλικού, όσο και για την μετέπειτα συμπεριφορά του κατά την διάρκεια της αφροποίησης. Στην συνέχεια εξετάστηκε η δυνατότητα παρασκευής μεταλλικών αφρών μεγαλύτερης επιφάνειας και πραγματοποιήθηκαν συγκριτικές μετρήσεις σκληρότητας, για το πρόδρομο και το αφροποιημένο δοκίμιο, του μητρικού υλικού με το σύνθετο υλικό μεταλλικής μήτρας (προσθήκη SiC).

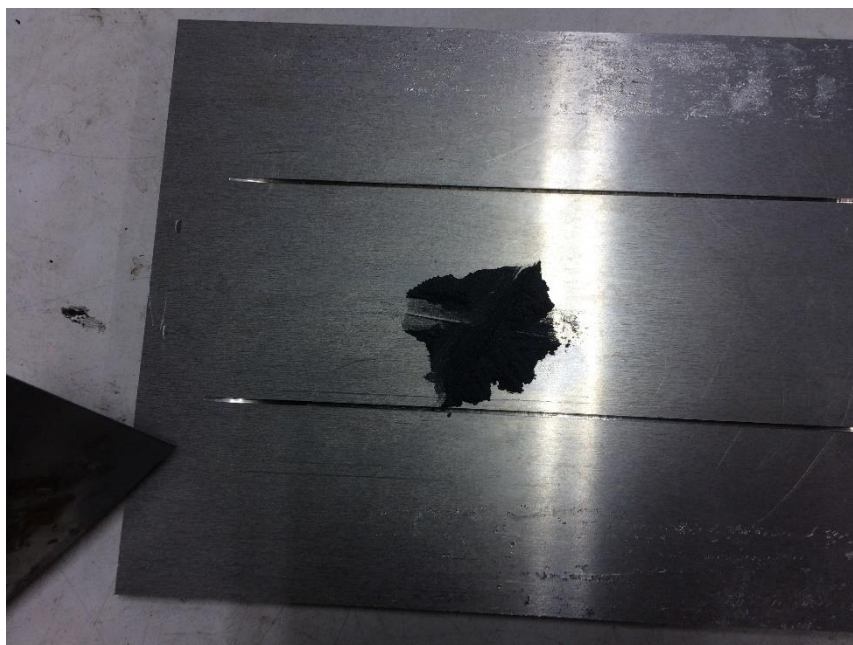
Η διεξαγωγή των πειραμάτων, για την παρασκευή σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας, έλαβε μέρος στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, ενώ η μικροδομική μελέτη και ο χαρακτηρισμός των τελικών δειγμάτων πραγματοποιήθηκε σε συνδυασμό με το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της σχολής Ναυπηγών Μηχανικών ΕΜΠ.

2.2 Παρουσίαση υλικών

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα δεδομένα της πειραματικής διαδικασίας, δηλαδή οι πρώτες ύλες που επεξεργάστηκαν ώστε να προκύψουν τα τελικά δοκίμια. Για την παραγωγή των σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας μέσω της διεργασίας FSP συνδυάστηκαν οι πλάκες του μετάλλου βάσης και οι κόνεις του μίγματος του κεραμικού υλικού και του αφριστικού παράγοντα.

Μεταλλικές πλάκες

Ως βασικό υλικό χρησιμοποιήθηκαν πλάκες από κράμα αλουμινίου 5083-H111, με ποσοστό ενδοτράχυνσης 10% και διαστάσεις 205 * 160 * 6 mm. Η επιλογή του συγκεκριμένου κράματος βασίστηκε στην εξαιρετική αντιδιαβρωτική συμπεριφορά που παρουσιάζει σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον, αλλά και στην ικανοποιητική συγκολλησιμότητα που εμφανίζει κατά τις κλασικές μεθόδους συγκόλλησης.



Εικόνα 2.2.1 - Πλάκα αλουμινίου 5083 για 1^η και 2^η σειρά πειραμάτων.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα όρια της χημικής σύστασης του κράματος που παρελήφθη:

Βάρος%	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Mg	Ti	Zn	Other Each	Others Total
5083 min	92.4	-	-	-	0.4	0.05	4.0	-	-	-	-
5083 max	95.6	0.40	0.40	0.10	1.0	0.25	4.90	0.15	0.25	0.05	0.15

Εικόνα 2.2.2 - Χημική σύσταση κράματος αλουμινίου 5083.

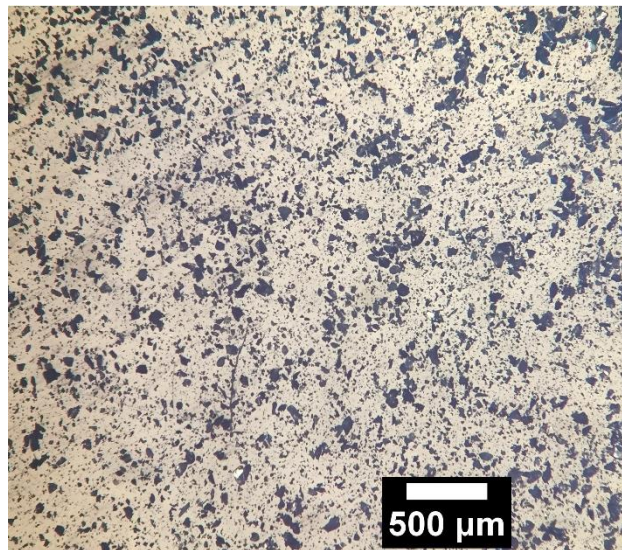
Καρβίδιο του πυριτίου (SiC)

Ως υλικό ενίσχυσης της μεταλλικής μήτρας του αλουμινίου 5083 επιλέχθηκε καρβίδιο του πυριτίου σε μορφή σκόνης. Το εν λόγω κεραμικό υλικό συνιστάται για την παρασκευή σύνθετων υλικών σε ποσοστό 0.6% κατά βάρος, αφού βελτιώνει την σκληρότητα της επιφάνειας του μετάλλου και προσφέρει υψηλότερη μηχανική αντοχή του κράματος ακόμη και σε ανεβασμένες θερμοκρασίες και ηλεκτρικές τάσεις. Εκτός όμως από την ενίσχυση που δύναται να προσδώσει στο κράμα του αλουμινίου, το εν λόγω κεραμικό χρησιμοποιείται και ως σταθεροποιητικός παράγοντας καθότι αυξάνει το ιξώδες του τελικού συνθετικού υλικού. Στην παρούσα πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε καρβίδιο του πυριτίου με μέση διάμετρο κόκκων 43 μm της Alfa Aesar σε ποσοστό καθαρότητας 99.5%.

Υδρίδιο τιτανίου (TiH₂)

Προκειμένου να παρασκευαστούν από την μέθοδο FSP πρόδρομα αφροποιήσιμα δοκίμια, δηλαδή δοκίμια με δυνατότητα αφροποίησης ύστερα από την θερμική τους κατεργασία, είναι αναγκαία η προσθήκη του αφριστικού παράγοντα στο μίγμα εισαγωγής. Με βάση τις διεθνείς αναφορές, το υδρίδιο του τιτανίου (TiH₂) σε ποσοστό 0.4% κατά βάρος αποτελεί τον συνηθέστερο αφριστικό παράγοντα που χρησιμοποιείται για μεταλλικούς αφρούς που έχουν προκύψει κατόπιν αφροποίησης. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην ικανότητα διάσπασης του TiH₂ στους 450 °C υπό συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης και την

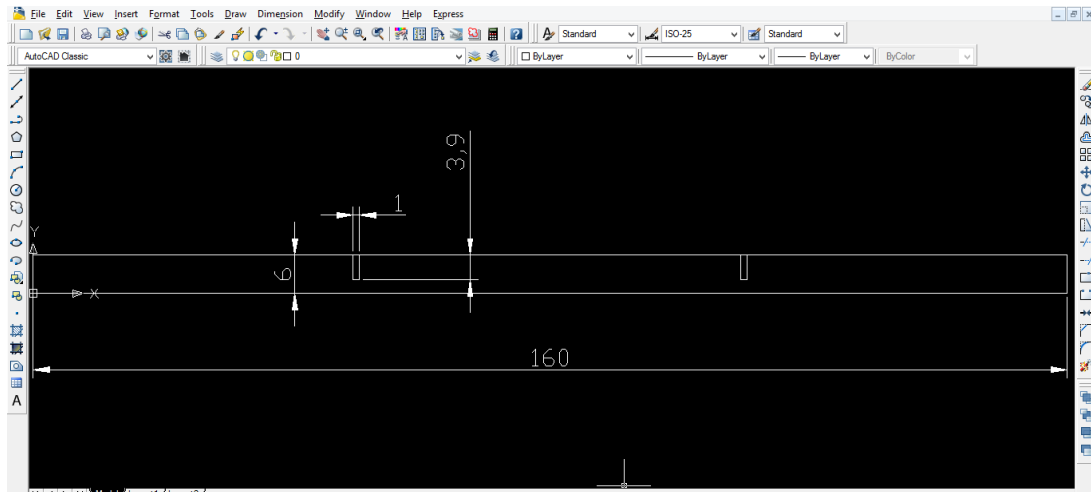
παραγωγή αέριου υδρογόνου, το οποίο εμφανίζεται εντός της μεταλλικής μήτρας με την μορφή φυσαλίδων. Η πορώδης δομή του μετάλλου προκύπτει από τις φυσαλίδες που δεν καταφέρνουν να απεγκλωβιστούν από την μεταλλική μήτρα κατά την διάρκεια της θερμικής κατεργασίας. Σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει στον περιορισμό των φυσαλίδων είναι ο σταθεροποιητικός παράγοντας, παρουσία του οποίου προκαλείται αύξηση του ιξώδους του μετάλλου.



Εικόνα 2.2.3 - Σκόνη μίγματος $SiC-TiH_2$.

2.3 Περίληψη διαδικασίας 1^{ης} & 2^{ης} σειράς πειραμάτων

Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν πλάκες αλουμινίου 5083, οι οποίες διαμορφώθηκαν κατάλληλα ώστε να περιέχουν κατά μήκος τους δύο αύλακες σε απόσταση 60 mm. Για την πρώτη σειρά πειραμάτων το βάθος αύλακα ορίστηκε στα 3.9 mm, ενώ για την δεύτερη στα 2.9 mm.



Εικόνα 2.3.1 - Γεωμετρία πλάκας αλουμινίου 5083-H111 για την 1^η σειρά πειραμάτων.

Στην συνέχεια αναμείχθηκε η ομογενοποιημένη σκόνη SiC & TiH₂, η οποία με την βοήθεια κατάλληλης κεφαλής εργαλείου χωρίς πείρο ασφαλίστηκε εντός των αυλακών ώστε να αποφευχθεί η πλευρική της απώλεια. Με την χρήση μιας άλλης κεφαλής που στην κατάληξή της διέθετε πείρο, πραγματοποιήθηκε η κατεργασία δια τριβής με ανάδευση έτσι ώστε να δημιουργηθεί το κορδόνι συγκόλλησης από την ανάμειξη των δύο σωμάτων και να παραχθεί το πρόδρομο αφροποιήσιμο υλικό. Χαρακτηριστικό στοιχείο για κάθε έναν αύλακα ήταν ο αριθμός επανεκτέλεσης της διαδικασίας, βάσει του οποίου αναμένονταν διαφορετικό αποτέλεσμα στην δομή του υλικού, ανάλογο της προκαλούμενης ανάδευσης. Ακολούθως, μέρος των δοκιμών υπέστη θερμική κατεργασία κοντά στο σημείο τήξης της μεταλλικής μήτρας, εντός επαγωγικού φούρνου, με θερμοκρασία μεγαλύτερη της αποσύνθεσης του αφριστικού παράγοντα, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η αφροποίησή τους.

2.4 Πειραματική ακολουθία

Προετοιμασία πλακών

Προκειμένου να επιτευχθεί μια ικανοποιητική ανάδευση μεταξύ του μίγματος αφριστικού παράγοντα-κεραμικού υλικού και του μεταλλικού κράματος, κρίθηκε σκόπιμη η διάνοιξη δύο αυλακώσεων κατά μήκος του δευτέρου. Για την επίτευξη του παραπάνω εγχειρήματος οι πλάκες προσδέθηκαν στην τράπεζα εργασίας της φρέζας Kearney & Trecker 3CE της Εικόνας 2.4.1 και κατεργάστηκαν από κυκλικό τροχό παρουσία ψυκτικού υγρού. Το πλάτος των αυλακώσεων προέκυψε από το πάχος του κυκλικού τροχού (1 mm) ενώ το βάθος, το οποίο πρόκειται να παρουσιαστεί για κάθε μία σειρά πειραμάτων ξεχωριστά, πραγματοποιήθηκε σε τρεις διαδοχικές κινήσεις με δύο εναλλαγές στην φορά της πρόωσης. Με το πέρας των αυλακώσεων αφαιρέθηκαν τα γρέζια της κατεργασίας και απομακρύνθηκαν τα υπολείμματα του υγρού ψύξης.



Εικόνα 2.4.1 - Εργαλειομηχανή φρέζας Kearny & Trecker 3CE.

Ανάμειξη κόνων

Η ανάμειξη των κόνων των ενώσεων TiH_2 και SiC πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια τόννου, αφού πρώτα υπολογίστηκε η συνεισφορά τους στο μείγμα. Με αναλογία 6.23 μέρη

SiC προς 1 TiH₂ οι δύο σκόνες τοποθετήθηκαν σε κατάλληλο δοχείο, το οποίο εφαρμόστηκε στο τσοκ του τόννου και στην συνέχεια περιστράφηκε στις 500 rpm για 15 λεπτά. Έπειτα το μίγμα εισήχθη στους αύλακες των μεταλλικών πλακών προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ανάδευσή του με το μέταλλο βάσης.

Κατεργασία δια τριβής με ανάδευση (FSP)

Για την ανάδευση της σκόνης του μίγματος (SiC & TiH₂) και του κράματος αλουμινίου χρησιμοποιήθηκε η εργαλειομηχανή Universal Milling Machine (Cugir) FU-32. Η εν λόγω φρέζα τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να μπορεί να φέρει στην κατάληξή της τα εργαλεία για την περάτωση της FSP. Το εύρος της ταχύτητας περιστροφής της εργαλειομηχανής κυμαίνεται μεταξύ 0 – 1000 rpm και της ταχύτητας πρόωσης από 13 – 203 mm/min. Τα προς κατεργασία τεμάχια, που τοποθετούνται επάνω στην τράπεζα εργασίας, προσδένονται μέσω του συστήματος έδρασης-συγκράτησης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4.2.



Εικόνα 2.4.2 - Εργαλειομηχανή φρέζας Universal Milling Machine (Cugir) FU-32.

Σε πρώτη φάση η σκόνη συμπιέστηκε με την επιβολή δύναμης από την κεφαλή εργαλείου με επίπεδο περιαιχένιο διαμέτρου 22.19 mm, σε ταχύτητα περιστροφής 1000 rpm και ταχύτητα πρόωσης 83 mm/min. Ακολούθως, για την κατεργασία διατριβής με ανάδευση τοποθετήθηκε κεφαλή εργαλείου που διαθέτε όμοιο περιαιχένιο με την πρώτη κεφαλή και επιπλέον έφερε δεξιόστροφο κυλινδρικό πείρο, διαμέτρου 5 mm και μήκους 4.2 mm. Η διαδικασία της ανάδευσης πραγματοποιήθηκε με περιστροφή του εργαλείου στις 1000 rpm και ταχύτητα πρόωσης 13 mm/min για διαφορετικό αριθμό περασμάτων σε κάθε αύλακα. Με την ολοκλήρωση της διεργασίας FSP παραλήφθηκε το πρόδρομο αφροποιήσιμο υλικό τοπικά της μεταλλικής πλάκας.



Εικόνα 2.4.3 - Κεφαλές κατεργασίας FSP (αριστερά) και αντάπτορας (δεξιά) για την προσαρμογή τους στην φρέζα.

Κοπή και λείανση προδρόμων δοκιμίων

Μετά το πέρας της διεργασίας FSP οι πλάκες κόπηκαν στην μέση (από έναν αύλακα η κάθε μία) και τα δύο τεμάχια χωρίστηκαν εκ νέου σε δοκίμια των 42 * 20 mm με εγκάρσια κοπή από το δισκοτόμο Struers Discotom-2. Για κάθε έναν από τους αύλακες συλλέχθηκαν 2 δοκίμια για να αφροποιηθούν μέσω του επαγωγικού φούρνου, ενώ τα υπόλοιπα επρόκειτο να εξεταστούν στην πρόδρομη μορφή τους. Τα δοκίμια στα οποία δεν προβλέπονταν αφροποίηση λειάνθηκαν κατάλληλα ώστε να απομακρυνθούν τα γρέζια εκατέρωθεν του κορδονιού συγκόλλησης και πλύθηκαν ώστε να απομακρυνθούν τα υπολείμματα από την επεξεργασία τους.



Εικόνα 2.4.4 - Δισκοτόμος *Struers Discotom-2*.

Αφροποίηση δοκιμών

Τα προς αφροποίηση δοκίμια υπέστησαν θερμική κατεργασία ώστε να διασπαστεί ο αφροποιητικός παράγοντας και να εκλυθεί το αέριο υδρογόνο. Πιο συγκεκριμένα, τα εν λόγω δοκίμια τοποθετήθηκαν εντός του επαγωγικού φούρνου *Osmund* (Εικόνα 2.4.5) σε θερμοκρασία 750 °C (μεγαλύτερη της αποσύνθεσης του TiH_2) και παρέμειναν εκτεθειμένα για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που παρουσιάζεται στον πίνακα παραμέτρων της διαδικασίας.



Εικόνα 2.4.5 - Επαγωγικός φούρνος *Osmund*.

Η διαδικασία αφροποίησης των δοκιμίων καταγράφηκε με την χρήση κάμερας, ενώ παράλληλα ήταν δυνατή η παρακολούθηση της συμπεριφοράς τους μέχρι του σημείου κατάρρευσής τους. Μετά την εισαγωγή του πρώτου δοκιμίου προς αφροποίηση παρατηρήθηκε η διόγκωσή του μέχρι το σημείο κατάρρευσης και βάσει αυτού ορίστηκαν οι χρόνοι και για τα υπόλοιπα δοκίμια. Τα πυρακτωμένα υλικά, μετά την εξαγωγή τους από τον επαγωγικό φούρνο, ψύχθηκαν σε ατμοσφαιρικό αέρα για περίπου 30 λεπτά. Έπειτα κόπηκαν κατά μήκος σε δύο μέρη και επεξεργάστηκε η επιφάνειά τους προκειμένου να είναι δυνατή η παρατήρηση της πορώδους δομής τους.

Λείανση - Στίλβωση

Προκειμένου να καταστεί εφικτή η μικροσκοπική ανάλυση της επιφάνειας των προδρόμων δοκιμίων έπρεπε να αποκαλυφθεί ο μικροδομικός τους ιστός. Η κατεργασία κοπής τους σε συνδυασμό με το στρώμα οξειδίου που δημιουργήθηκε στην επιφάνεια του σύνθετου υλικού μεταλλικής μήτρας καθιστούσαν την μελέτη της επιφανειακής μικροδομής αδύνατη, γεγονός που οδήγησε στην επιβολή των επιφανειακών διεργασιών της λείανσης και της στίλβωσης. Με την λείανση των δοκιμίων οι ανομοιομορφίες και οι ατέλειες που είχαν εμφανιστεί ως αποτέλεσμα της κατεργασίας κοπής απαλείφθηκαν και η επιφανειακή τραχύτητα του υλικού ελαχιστοποιήθηκε. Η διαδικασία λείανσης περιελάμβανε την τριβή της επιφάνειας του μετάλλου, καθώς εκείνο εφάπτονταν σε περιστροφική πλατφόρμα με λειαντικά φύλλα SiC με εύρος κοκκομετρίας 120 – 4000 grit.



Εικόνα 2.4.6 - Εργαλεία λείανσης (επάνω) και στίλβωσης (κάτω).

Με αρχή την τραχύτερη επιφάνεια στα 120 grit εξομαλύνθηκαν οι εντονότερες ανομοιομορφίες του υλικού και καθώς μειωνόταν η τραχύτητα έγινε χρήση φύλλων μεγαλύτερου πλήθους κόκκων για περισσότερη ακρίβεια. Για την εξάλειψη των ανωμαλιών σε πρώτη φάση χρησιμοποιήθηκε η μηχανή λείανσης Struers DAP-V (Εικόνα 2.4.6), η οποία διαθέτει εύρος ταχυτήτων από 50 – 500 rpm και ταυτόχρονη παροχή νερού για την απομάκρυνση των παραμενουσών σωματιδίων της επεξεργασίας, αλλά και για την μείωση του θερμοκρασιακού επιπέδου κατά την τριβή των δύο σωμάτων. Στην συνέχεια, για την απομάκρυνση των υπολειμμάτων της λείανσης και την επίτευξη της κατοπρικής στίλβω-τητας, χάριν της οποίας δύναται να υλοποιηθεί ικανοποιητικός μεταλλογραφικός έλεγχος, ακολουθήθηκε η διαδικασία της στίλβωσης. Για την στίλβωση επιλέχθηκε το εργαλείο Struers DAP-V, το οποίο έφερε παρεμφερή διάταξη με εκείνη του εργαλείου της λείανσης. Κατά την διαδικασία της στίλβωσης τα δοκίμια τοποθετήθηκαν πάνω στην βελούδινη επιφάνεια που εφάπτονταν στον περιστροφικό δίσκο και η τριβή των δύο μερών πραγματοποιήθηκε με την παροχή νερού και την παρουσία διαμαντόσκονης διαμέτρου 3 μm.

Χημική προσβολή

Η παρατήρηση της μικροδομής μιας γυαλισμένης επιφάνειας, λόγω του ότι το φως ανακλάται ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις, πολλές φορές δεν είναι εφικτή με το μάτι. Προκειμένου να ξεπεραστεί η αδυναμία της διάκρισης των μικρών διαφορών στην αντανάκλαση, είναι αναγκαία η δημιουργία αντίθεσης μεταξύ των επιμέρους επιφανειών. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, στα δοκίμια της παρούσας πειραματικής διαδικασίας επιχειρήθηκε μια ελεγχόμενη διαδικασία διάβρωσης, που καλείται χημική προσβολή, κατά την οποία πραγματοποιήθηκε ηλεκτρολυτική αντίδραση μεταξύ των επιφανειών διαφορετικού δυναμικού. Ο τύπος της χημικής προσβολής που χρησιμοποιήθηκε, με χρωματισμό των κόκκων (Colour etching), ενδείκνυται για την μακροσκοπική παρατήρηση της μικροδομής του μεταλλικού υλικού σε περιπτώσεις έντονης πλαστικής παραμόρφωσης (CPD). Η διαδικασία περιελάμβανε την εμβάπτιση των δοκιμίων έως ότου καλυφθεί πλήρως η επιφάνειά τους σε κατάλληλο διάλυμα. Το διάλυμα στο οποίο πραγματοποιήθηκε η εμβάπτιση για 7sec σε κάθε δοκίμιο είχε την παρακάτω σύσταση:

- 20 ml Διάλυμα Poulton
- 10 ml HNO_3
- Διάλυμα 4.8 gr Cr_2O_3 σε 16 ml H_2O

Το διάλυμα Poulton αποτελείται από:

- 12 ml HCl
- 1 ml HF
- 6 ml HNO_3
- 1 ml H_2O

Μετά την εμβάπτιση ακολούθησε πλύση των δοκιμίων για την παύση της αντίδρασης. Κατόπιν απομακρύνθηκε το υγρό στοιχείο από τις βρεγμένες επιφάνειες με την παροχή θερμού αέρα και τα τεμάχια τοποθετήθηκαν για οπτική ανάλυση.

Οπτική στερεοσκοπία

Για την μακροσκοπική εξέταση τόσο των προδρόμων όσο και των αφροποιημένων δοκιμίων ως προς την μορφολογία και το τοπογραφικό ανάγλυφο, χρησιμοποιήθηκε το οπτικό στερεοσκόπιο Leica MZ26 της Εικόνας 2.4.7 του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Το εν λόγω στερεοσκόπιο διαθέτει 5 διαφορετικές κλίμακες μεγένθυσης, με μέγιστη δυνατότητα εστίασης σε κλίμακα 6.3: 1.



Εικόνα 2.4.7 - Οπτικό στερεοσκόπιο Leica MZ6.

Οπτική μικροσκοπία

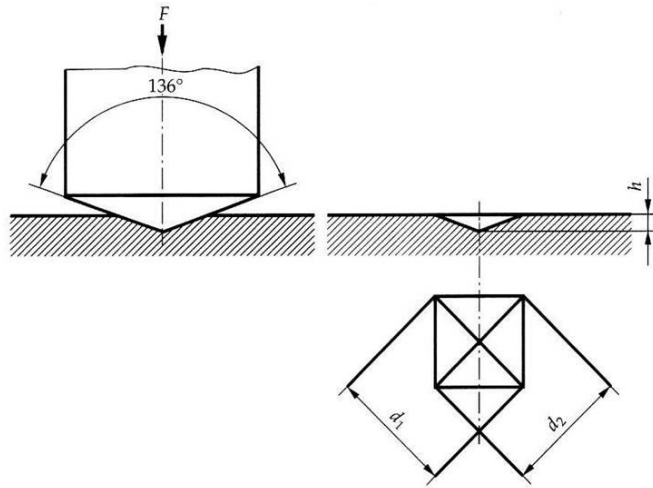
Κατ' αντιστοιχία, για την μικροσκοπική παρατήρηση της επιφάνειας των δοκιμίων έγινε χρήση του μικροσκοπίου Leica DMLIM της Εικόνας 2.4.8. Με την τοποθέτηση του δοκιμίου κοντά στον αντικειμενικό φακό απεικονίστηκε το είδωλό του σε πραγματικό μέγεθος. Στην συνέχεια, ο προσοφθαλμιακός φακός μεγένθυσε το πραγματικό είδωλο και κατ' αυτόν τον τρόπο σχηματίστηκε το φανταστικό είδωλο, το οποίο βρισκόταν μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης απόστασης ευκρινούς όρασης. Εν προκειμένω, χάριν της χημικής προβολής που έχει προηγηθεί, οι προσπίπτουσες ακτίνες ορατού φωτός ανακλάστηκαν ανάλογα από το τοπογραφικό ανάγλυφο της επιφάνειας του δοκιμίου και κατέστη δυνατή η εξέταση μικροσκοπικά.



Εικόνα 2.4.8 - Οπτικό στερεοσκόπιο *Leica DML1M*.

Σκληρομέτρηση

Η επιβολή θερμικών και μηχανικών φορτίων σε ένα δοκίμιο οδηγούν στην μεταβολή των ιδιοτήτων του υλικού του και μεταξύ άλλων επηρεάζουν την σκληρότητά του. Με τον όρο σκληρότητα περιγράφεται η αντίσταση που προβάλλει ένα υλικό κατά την κάθετη διείσδυση ενός άλλου σκληρότερου υλικού σε εκείνο. Όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος του αποτυπώματος, δηλαδή η διείσδυση του δευτέρου υλικού σε εκείνο του πρώτου, τόσο μικρότερη είναι η τιμή της σκληρότητας του υπό εξέταση υλικού. Μία από τις μεθόδους μέτρησης της σκληρότητας ενός υλικού είναι η μέθοδος Vickers, η οποία επιλέχθηκε για την μέτρηση της σκληρότητας στα δοκίμια της εν λόγω πειραματικής διαδικασίας. Ακολουθώντας τη μέθοδο Vickers, εφαρμόστηκε σταθερή δύναμη σε μια αδαμάντινη πυραμίδα τετραγωνικής βάσης, η κορυφή της οποίας σχημάτιζε γωνία 136° .



Εικόνα 2.4.9 - Σκληρομέτρηση με την χρήση της μεθόδου Vickers.

Η σκληρότητα υπολογίστηκε από το πηλίκο της δύναμης που εφαρμόστηκε προς την επιφάνεια του αποτυπώματος με την βοήθεια του παρακάτω τύπου:

$$HV \text{ ή } VPN = \frac{F}{d^2} 2\eta\mu \frac{136^\circ}{2} = 1.854 \frac{F}{d^2}$$

όπου F η εφαρμοσμένη δύναμη (5 – 120 Kg) για 15 sec και d η μέση τιμή των δύο διαγωνίων του αποτυπώματος.

Οι μετρήσεις της σκληρότητας πραγματοποιήθηκαν στον σκληρομετρητή Wolpert-Werke GMBH της Amsler της Εικόνας 2.4.10.



Εικόνα 2.4.10 - Σκληρομετρητής Wolpert-Werke GMBH της Amsler.

2.5 Πειραματικές συνθήκες

1^η Σειρά πειραμάτων

Για την πρώτη σειρά δειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια από 5 αύλακες διαφορετικού αριθμού επανάληψης της διεργασίας FSP, βάθους 3.9 mm. Οι εν λόγω αύλακες αντιστοιχούσαν σε επιφάνειες που υπέστησαν 1, 2, 3, 5 και 8 περάσματα αντίστοιχα και για τον κάθε έναν εξετάστηκε 1 δοκίμιο σε πρόδρομη μορφή και 2 δοκίμια σε αφροποιημένη. Από την παρατήρηση της αφροποίησης του 1^{ου} δοκιμίου για ένα πέρασμα (δοκίμιο A2), σημειώθηκε μέγιστη διόγκωση στην χρονική διάρκεια των 2.5 min, ενώ η κατάρρευση αυτού επήλθε σε εκείνη των 5 min. Βάσει των δύο προαναφερθέντων χρόνων αποφασίστηκε τα 2 προς αφροποίηση δοκίμια από κάθε αύλακα να υποστούν θερμική κατεργασία διάρκειας 2.5 min και 5 min αντίστοιχα. Κατά την διάρκεια της αφροποίησης των δοκιμίων καταγράφηκε η διαδικασία, με στόχο την εύρεση του βέλτιστου χρόνου εξόδου για κάθε ένα. Για τον υπολογισμό του βέλτιστου χρόνου και με την βοήθεια του προγράμματος ImageJ, μετρήθηκε το ύψος διόγκωσης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές από τα στιγμιότυπα που συλλέχθηκαν από τα βίντεο διάρκειας 5 min (δοκίμια 2, 4, 6, 8, 10) και στην συνέχεια αποτυπώθηκε συγκριτικό διάγραμμα για τις διάφορες περιπτώσεις επανάληψης της διαδικασίας.

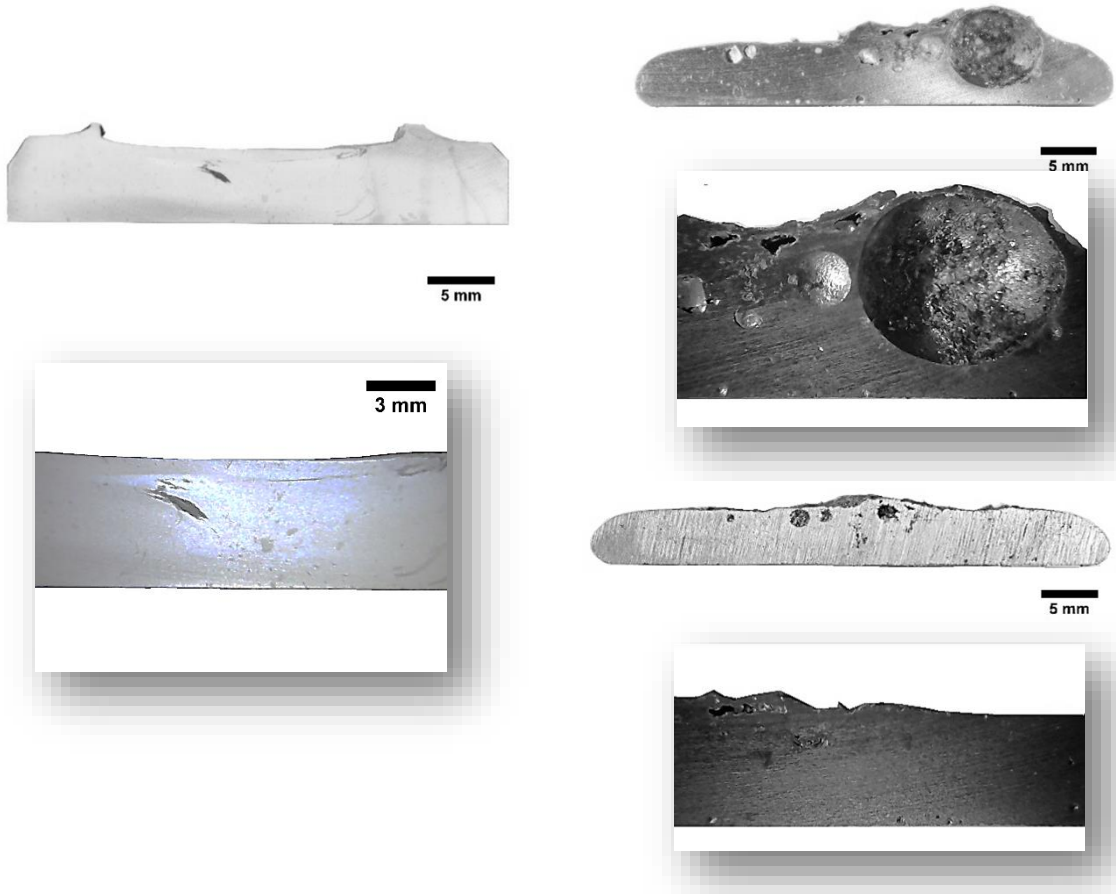
Τα δοκίμια της 1^{ης} σειράς δειγμάτων εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 750°C, αφού τοποθετήθηκαν πάνω σε προθερμασμένες πλάκες χάλυβα πριν την εισαγωγή τους στον επαγωγικό φούρνο. Οι συνθήκες που μελετήθηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Δοκίμιο/Μεταλλικός αφρός	Αριθμός περασμάτων	Χρόνος παραμονής στον φούρνο (min)
A1	1	2,5
A2	1	5
A3	2	2,5
A4	2	5
A5	3	2,5

A6	3	5
A7	5	2,5
A8	5	5
A9	8	2,5
A10	8	5

Ανάλυση αποτελεσμάτων 1^{ης} σειράς

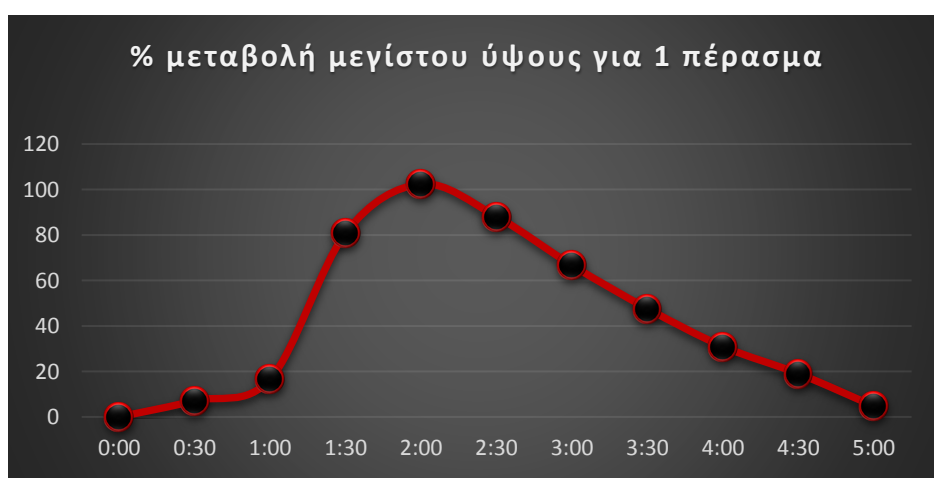
Δοκίμια ενός περάσματος



Εικόνα 2.5.1 - Πρόδρομο και αφροποιημένα δοκίμια ενός περάσματος.

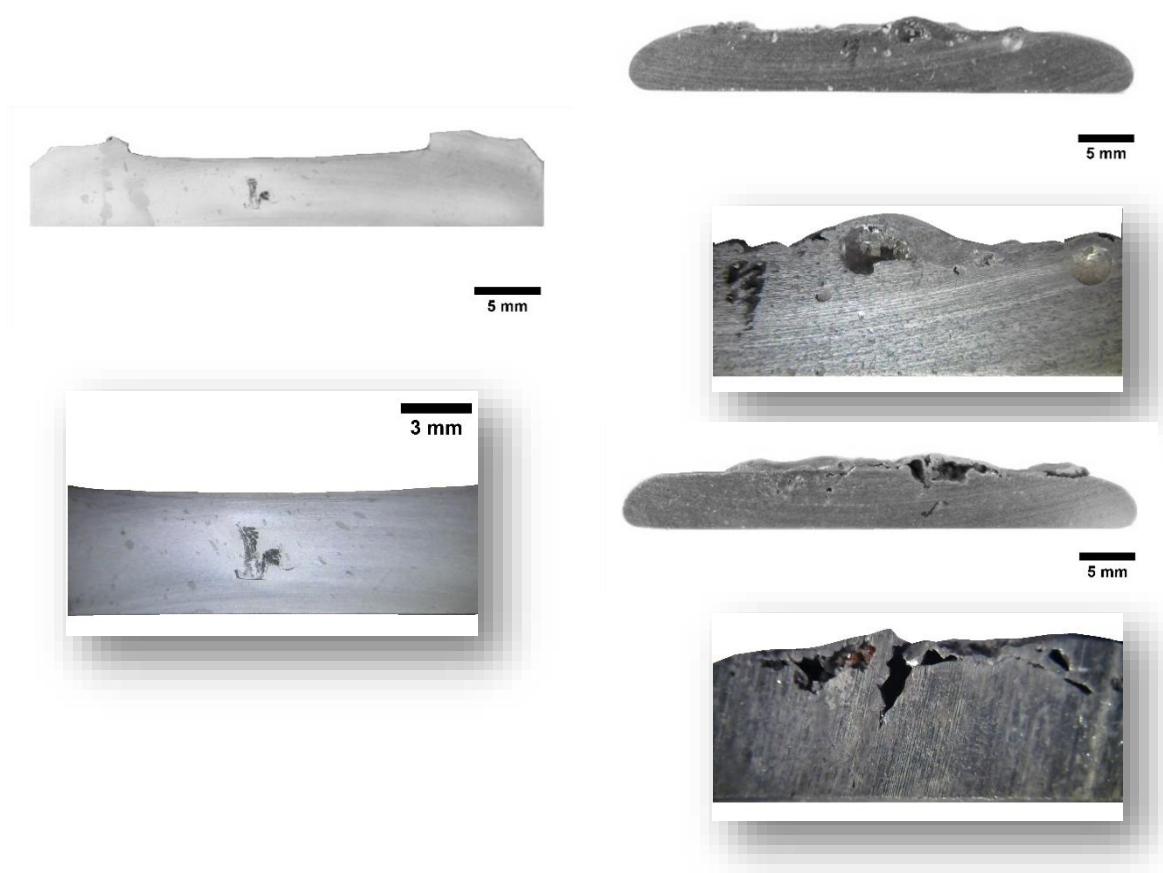
Η στερεοσκοπική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για το πρόδρομο αφροποιήσιμο υλικό, στο οποία η διεργασία FSP εφαρμόστηκε μόνο μια φορά, φαίνεται στα αριστερά. Στο επάνω μέρος απεικονίζεται ολόκληρο το δοκίμιο που παρελήφθη από τις διαδοχικές κατεργασίες, ενώ στο κάτω η εικόνα εστιάζει στην συγκέντρωση του μίγματος του αφριστικού παράγοντα και του κεραμικού υλικού μέσα στην ζώνη ανάδευσης που έχει δημιουργηθεί. Από την μεγένθυση του προδρόμου παρατηρείται μονόπλευρη συγκέντρωση του μίγματος εισαγωγής σε οριακή θέση εντός της “λεκάνης”, που έχει σχηματιστεί από την βύθιση του εργαλείου και την ανάμειξη των υλικών. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει την ανομοιογένεια του

σύνθετου υλικού, την ανεπαρκή ανάδευσή του και προδιαθέτει μια επερχόμενη αφροποίηση, η οποία επίσης αναμένεται να χαρακτηριστεί από ανόμοια κατανομή μάζας υλικού και πόρων. Ύστερα από την παρατήρηση των εικόνων που αντιστοιχούν στους μεταλλικούς αφρούς, με διάρκεια παραμονής στον φούρνο για 2.5 min και 5 min (επάνω και κάτω αριστερά αντίστοιχα), επαληθεύεται η αναμενόμενη ανομοιογένεια στην πορώδη δομή τους. Στην περίπτωση του δοκιμίου A1 εμφανίζεται διακριτό πορώδες, το οποίο όμως συγκεντρώνεται σε συγκεκριμένη περιοχή και από το οποίο δεν χαρακτηρίζεται στην έκτασή του ο μεταλλικός αφρός. Η μεγάλη διακύμανση αποτελεί ακόμη στοιχείο ανεπαρκούς ανάδευσης των υλικών. Ακολούθως, για το δοκίμιο A2 σημειώνεται κατάρρευση των κελιών του αφρού, αφού η ανεπαρκής ανάδευση έχει οδηγήσει στην συσσώρευση υλικού στην περιοχή κοντά στη επιφάνεια του αφρού και στην άμεση διαφυγή του αφριστικού παράγοντα. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως κατά την διαδικασία αφροποίησης και για τα δύο δοκίμια, από μετέπειτα παρακολούθηση των βίντεο, η διαρροή του αφριστικού παράγοντα μετά τα 60 sec ήταν αρκετά έντονη με αλληπάλληλες εκρήξεις του, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται ακανόνιστα η γεωμετρία των δειγμάτων.



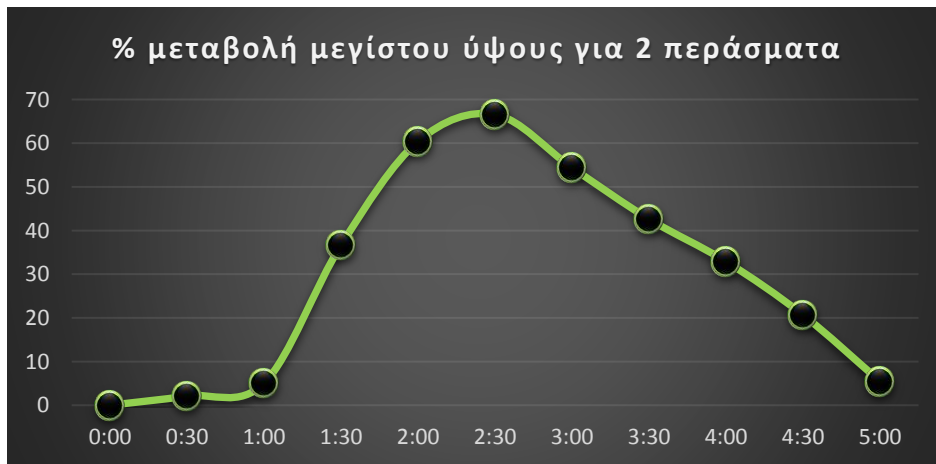
Εικόνα 2.5.2 - Ποσοστιαία μεταβολή μεγίστου ύψους για 1 πέρασμα.

Δοκίμια 2 περασμάτων



Εικόνα 2.5.3 - Πρόδρομο και αφροποιημένα δοκίμια δύο περασμάτων.

Όμοια με την παρουσίαση των δοκιμών για 1 πέρασμα, παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών για 2 περάσματα. Η ανάδευση στο πρόδρομο δοκίμιο εμφανίζεται ομαλότερη σε σχέση με εκείνη του ενός περάσματος και παρατηρείται συσσώρευση του μίγματος στον πυρήνα. Ακόμη, η ολότητα του μίγματος εντός της μεταλλικής μήτρας χαρακτηρίζεται από μία στενότητα (σε σχέση με το πλάτος της ζώνης ανάδευσης) και μια άνιση κατανομή η οποία, όπως έχει ήδη σημειωθεί, ενδέχεται να επηρεάσει την αφροποίηση του μετάλλου. Πράγματι, με την εικόνα και από τους δύο αφρούς των διαφορετικών χρονικών παραμέτρων αφροποίησης φαίνεται η παραπάνω ανομοιομορφία να έχει επηρεάσει την όλη διαδικασία. Στο δοκίμιο A3 παρατηρείται μια πολύ μικρή αφροποίηση, η οποία αιτιολογείται από την περιορισμένη ανάδευση που φάνηκε και στην επιφάνεια του προδρόμου, ενώ στο δοκίμιο A4 η γενική κατάρρευση των πόρων αποτελεί σημάδι ανεπιτυχούς διεργασίας της FSP.



Εικόνα 2.5.4 - Ποσοστιαία μεταβολή μεγίστου ύψους για 2 περάσματα.

Δοκίμια 3 περασμάτων



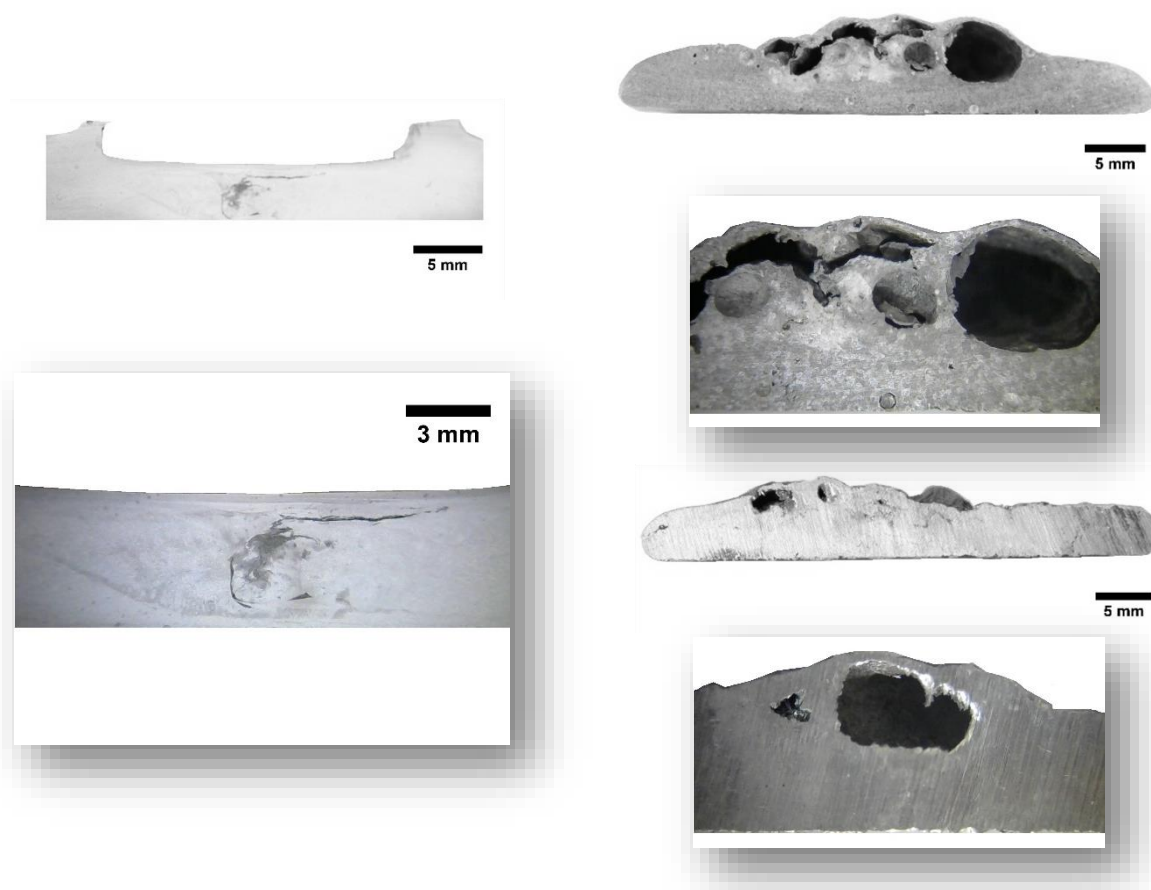
Εικόνα 2.5.5 - Πρόδρομο και αφροποιημένα δοκίμια τριών περασμάτων.

Από την στερεοσκοπική ανάλυση του προδρόμου μετάλλου για 3 περάσματα παρατηρείται μεγαλύτερη συσσώρευση μίγματος συγκριτικά με τις άλλες δύο περιπτώσεις. Αρκετή ποσότητα ωστόσο φαίνεται να βρίσκεται κοντά στην κατεργασμένη επιφάνεια, στοιχείο που αποτελεί ένδειξη για πιθανή μαζική διαφυγή του αφριστικού παράγοντα κατά την αφροποίηση. Στον πυρήνα συγκεντρώνεται μικρή ποσότητα μίγματος, η οποία δεν προδιαθέτει για ικανοποιητική αφροποίηση του δοκιμίου και την δημιουργία ομοιόμορφης πορώδους δομής. Στο δοκίμιο A5 επάνω αριστερά (2.5 min παραμονής στον φούρνο) εμφανίζεται μικρή αφροποίηση στην μεσαία περιοχή με σχετική κατάρρευση του πορώδους. Το μικρό χρονικό διάστημα παραμονής του δοκιμίου στον φούρνο σε συνδυασμό με την κατάρρευση είναι αποτέλεσμα της ανεπαρκούς ανάδευσης, η οποία στα 3 πλέον περάσματα ίσως σχετίζεται με την ποσότητα της σκόνης του μίγματος που έχει προστεθεί στο μέταλλο και αφορά το βάθος του αύλακα. Η αναποτελεσματικότητα της ανάδευσης επιβεβαιώνεται και από το δοκίμιο A6 των 5 min, το οποίο φαίνεται να μην έχει αφροποιηθεί καθόλου.



Εικόνα 2.5.6 - Ποσοστιαία μεταβολή μεγίστου ύψους για 3 περάσματα.

Δοκίμια 5 περασμάτων



Εικόνα 2.5.7 - Πρόδρομο και αφροποιημένα δοκίμια πέντε περασμάτων.

Η διασπορά του μίγματος, στην περίπτωση των δοκιμών των 5 περασμάτων, εμφανίζεται πιο σφαιρική από πριν γύρω από την ζώνη ανάδευσης. Το μίγμα φαίνεται να έχει απλωθεί στο μεγαλύτερο μέρος του πάχους του δοκιμίου, με εντονότερη παρουσία στο ύψος του πυρήνα. Μια μικρή ποσότητα που εμφανίζεται σε ευθεία κοντά στην επιφάνεια είναι πιθανό να οφείλεται σε κορεσμό του μίγματος γύρω από την περιοχή, με αποτέλεσμα την ελάχιστη ανάδευση και κατά συνέπεια την παραμονή του στο συγκεκριμένο ύψος. Κατόπιν αφροποίησης του δοκιμίου A7 (επάνω αριστερά) εμφανίζεται στην επιφάνειά του πορώδες αρκετά μεγαλύτερο από τα δοκίμια που εξετάστηκαν μέχρι τώρα. Η αφροποίηση έχει πραγματοποιηθεί στο μεγαλύτερο μέρος του δοκιμίου και σε πλάτος που προσεγγίζει τη

διάμετρο του περιαιχηνίου. Στις περιοχές εκατέρωθεν της αφροποιημένης περιοχής το μέταλλο βάσης βρίσκεται σε καθαρή μορφή χωρίς προσμίξεις, γι' αυτό και δεν αναπτύσσεται πορώδης δομή. Η εμφανής κατάρρευση αρκετών πόρων, λαμβάνοντας υπ' όψιν τον μικρό χρόνο παραμονής σε περιβάλλον θερμοκρασίας 750°C, όπως συνέβη και στην περίπτωση των 3 περασμάτων, αποτελεί ένδειξη ταχείας διαφυγής του TiH_2 . Στην περίπτωση του δοκιμίου των 5 min (δοκίμιο A8) η αφροποίηση είναι μικρότερη από εκείνη των 2.5 min με ακόμη μεγαλύτερη κατάρρευση, η οποία παρατηρείται από τους εναπομείναντες συρρικνωμένους πόρους. Η εικόνα του αφρού στα 5 min επιβεβαιώνει την ούτως ή άλλως ταχεία διαφυγή του αφριστικού παράγοντα και αποκλείει την πιθανότητα για μελλοντική αποκάλυψη των πόρων.

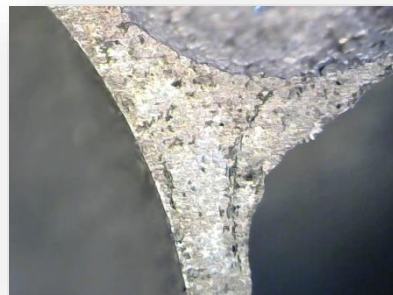
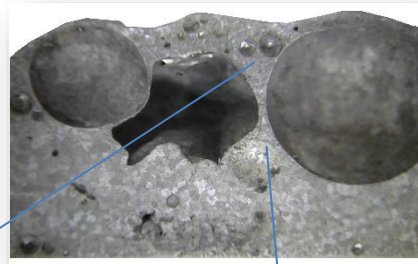
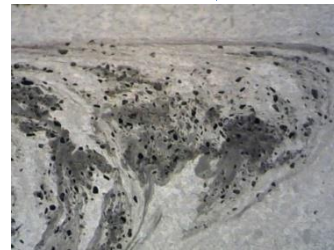
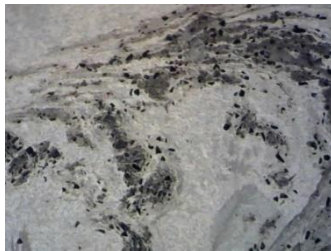
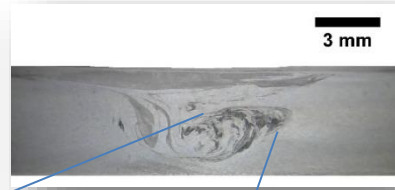


Εικόνα 2.5.8 - Ποσοστιαία μεταβολή μεγίστου ύψους για 5 περάσματα.



Εικόνα 2.5.9 - Στάδια αφροποίησης δοκιμίου A8.

Δοκίμα 8 περασμάτων



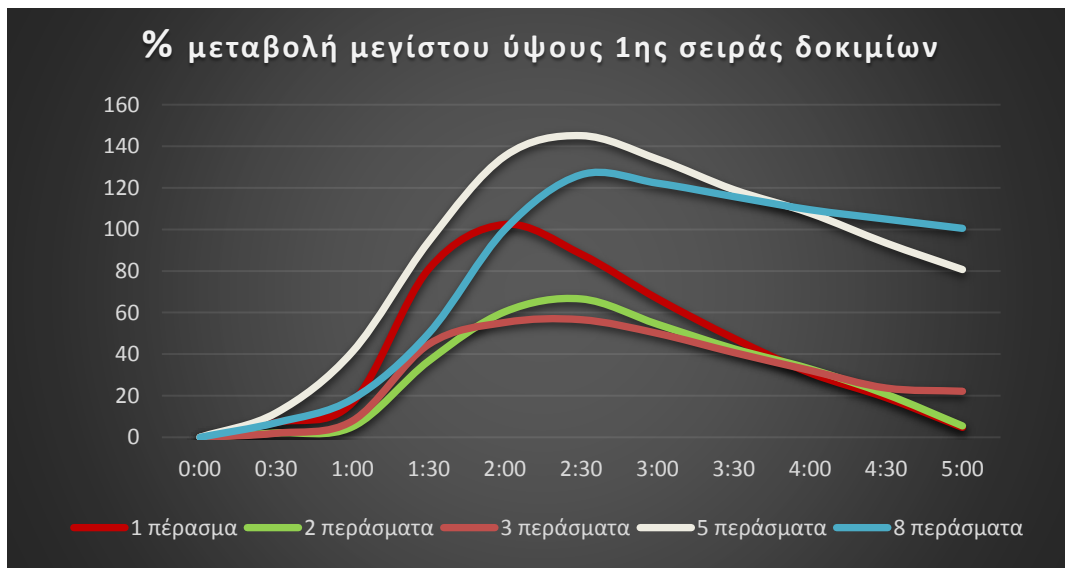


Εικόνα 2.5.10 - Πρόδρομο και αφροποιημένα δοκίμια οχτώ περασμάτων.

Η πρώτη σειρά ολοκληρώνεται με την μελέτη των δοκιμίων για 8 επαναλήψεις της διαδικασίας. Από τις εικόνες του στερεοσκοπίου το πρόδρομο δοκίμιο εμφανίζει σε μεγάλο βαθμό ικανοποιητική ανάδευση και με τις λήψεις από το μικροσκόπιο εξετάζεται σε βάθος η κατανομή του πρόσθετου υλικού. Τα σωματίδια, σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις, έχουν απομακρυνθεί από την κατεργασμένη επιφάνεια και έχουν δημιουργήσει μια κατανομή όμοια με εκείνη του αποτυπώματος της κεφαλής του εργαλείου. Όπως έχει σημειωθεί και στο θεωρητικό μέρος για την κατεργασία της FSP, παρατηρείται ροή του μετάλλου από την υποχωρούσα πλευρά με φορά προς την προωθούμενη, όπου το όριο της ζώνης ανάδευσης με την θερμομηχανικά επηρεαζόμενη ζώνη εμφανίζεται έντονο. Μετά την θέρμανση του υλικού για 2.5 min (δοκίμιο A9) παραλαμβάνεται ένας αφρός αλουμινίου με ικανοποιητικό πορώδες, χαρακτηριστικό του οποίου είναι η σφαιρικότητα των πόρων και τα διακριτά τείχη που μεσολαβούν. Η κατανομή του υλικού χαρακτηρίζεται από ομοιογένεια και αυτό φαίνεται από τα μεγέθη των πόρων, τα οποία δεν παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις. Το ίδιο αποτέλεσμα δεν παρατηρείται στην περίπτωση έκθεσης του υλικού για 5 min, όπως αποκαλύπτει η τελευταία σειρά εικόνων. Το στίγμα των συρρικνωμένων πόρων, με έμφαση στην περιοχή εισχώρησης του πείρου, υποδεικνύει την κατάρρευσή τους. Το μικρό του βάθος δεν προδιαθέτει για μελλοντική αφροποίηση, γεγονός που παρατηρήθηκε και από την πορεία του δοκιμίου κατά την αφροποίηση του, με την χρήση του βίντεο.



Εικόνα 2.5.11 - Στάδια αφροποίησης δοκιμίου A10.



Εικόνα 2.5.12 - Ποσοστιαία μεταβολή μεγίστου ύψους 1ης σειράς πειραμάτων.

Ύστερα από την οπτική ανάλυση των δοκιμίων της 1ης σειράς και την συγκριτική ποσοστιαία μεταβολή μεγίστου ύψους για τις 5 διαφορετικές τιμές περασμάτων, διαπιστώθηκε πως τα δοκίμια των περασμάτων 1, 2, 3 παρουσιάστηκαν ελάχιστα διογκωμένα και κατά συνέπεια χαρακτηρίστηκαν από πολύ χαμηλό πορώδες. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια του ενός περάσματος, σύμφωνα με το διάγραμμα αφροποίησης αλλά και τις εικόνες των δύο αφρών στα 2.5 min και 5 min (δοκίμια 1, 2), σημείωσαν μεγάλες διακυμάνσεις όσον αφορά στο μέγεθος των πόρων αλλά και στο ποσοστό του πορώδους, γεγονός που επιβεβαίωσε την χαμηλή ποιότητα ανάδυσής τους. Για τις περιπτώσεις των περασμάτων 2, 3 (δοκίμια 3-6) καταγράφηκαν οι χαμηλότερες τιμές μέγιστης διογκωσης κατά την αφροποίηση, χωρίς όμως να παρατηρείται σε αυτά η αστάθεια που εμφανίστηκε στα δοκίμια του ενός περάσματος. Για τους αφρούς 7 και 8, που προήλθαν από 5 επαναλήψεις τις διεργασίας FSP, επετεύχθη η μέγιστη ποσοστιαία διογκωση και το ποσοστό του πορώδους αυξήθηκε αισθητά σε σχέση με

τα δοκίμια 1-6. Η συρρίκνωση των πόρων βέβαια, ακόμη και για τον αφρό 7 (2.5 min), αποτέλεσε ένδειξη της ανομοιογένειας του σύνθετου υλικού και της αναποτελεσματικής ανάδευσης των επιμέρους υλικών του. Οι αφροί των 8 επαναλήψεων, όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα, παρουσίασαν μια πιο σταθερή απόκριση ως προς την διόγκωσή τους, συγκριτικά με τα υπόλοιπα δοκίμια. Στην περίπτωση του μεταλλικού αφρού 9 η ικανοποιητική ανάδευση του προδρόμου αφροποιήσιμου υλικού οδήγησε στην δημιουργία σφαιρικών πόρων. Η κατάρρευση ωστόσο του δοκιμίου 10 έδειξε ότι και για τον μεγαλύτερο αριθμό περασμάτων που χρησιμοποιήθηκε ο περιορισμός του αφριστικού παράγοντα στα επιθυμητά επίπεδα δεν κατέστη δυνατός.

Συμπερασματικά, για την 1^η σειρά δειγμάτων παρατηρήθηκε πως όσο αυξανόταν ο αριθμός επαναλήψεων της διεργασίας FSP, τόσο βελτιωνόταν η εικόνα της ζώνης ανάδευσης του προδρόμου, αλλά και η πορώδης δομή του αντίστοιχου αφρού. Όσον αφορά τους χρόνους παραμονής για κάθε αύλακα, η χρονική διάρκεια των 2.5 min παρουσίασε καλύτερα αποτελέσματα στην δομή του αφρού με αισθητά μικρότερα ποσοστά κατάρρευσης. Ακόμη, πιο βελτιωμένη απόκριση των αφρών σημειώθηκε με την αύξηση του αριθμού περασμάτων, τόσο για τα δοκίμια των 2.5 min όσο και για εκείνα των 5 min. Η εμφανής κατάρρευση για όλα τα δοκίμια με χρονική διάρκεια των 5 min, ανεξάρτητα του αριθμού περασμάτων, αποτελεί ένδειξη της ανεπιτυχούς διασποράς της σκόνης του μίγματος στο κράμα αλουμινίου, που είχε ως συνέπεια την διαφυγή του αφριστικού παράγοντα.

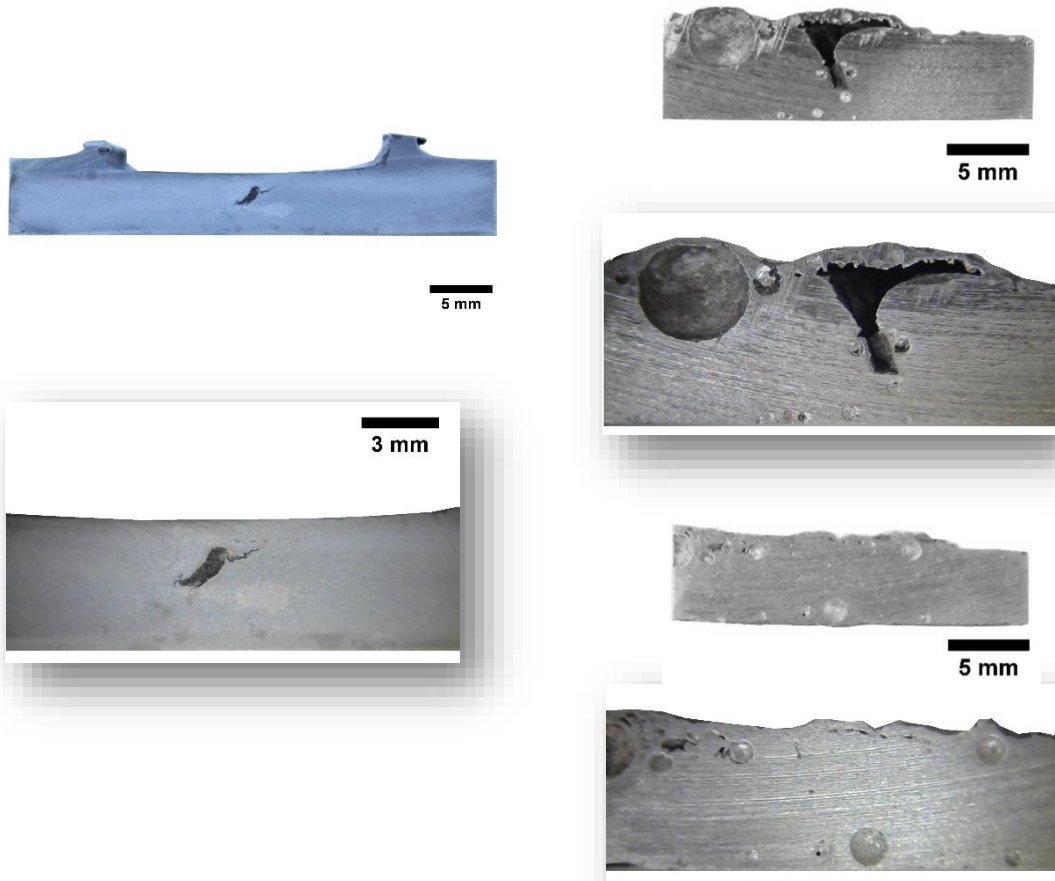
2^η Σειρά πειραμάτων

Βάσει των αποτελεσμάτων της 1^{ης} σειράς δειγμάτων, όπου η διαφυγή του αφριστικού παράγοντα ήταν έντονη ιδίως στα 1, 2 και 3 περάσματα, αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί μια 2^η σειρά δοκιμών με μικρότερο βάθος αυλακών. Με αυτήν την τροποποίηση, η πιθανότητα μεγάλης συσσώρευσης της σκόνης του μίγματος ανά περιοχές εντός της μεταλλικής μήτρας αναμένονταν να είναι μικρότερη, ενώ η δημιουργία ομοιόμορφου πορώδους μεγαλύτερη. Στην προσπάθεια της λήψης όσο το δυνατόν πιο έγκυρων αποτελεσμάτων επιλέχθηκε να μην εξεταστεί αύλακας που να έχει υποστεί την κατεργασία FSP μόνο μία φορά, λόγω της μεγάλης διασποράς και ανομοιογένειας που παρουσίασε ο αντίστοιχος κατά την 1^η σειρά δειγμάτων. Έτσι παρασκευάστηκαν δοκίμια από αύλακες διαφορετικού αριθμού περασμάτων (2, 3, 5, 8 περάσματα) σε βάθος 2.9 mm. Η χρονική διάρκεια παραμονής του εκάστοτε δοκιμίου εντός του επαγωγικού φούρνου φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί, ενώ η θερμοκρασία της κατεργασίας ορίστηκε όπως και στην 1^η σειρά στους 750°C. Ο υπολογισμός του βέλτιστου χρόνου αφροποίησης εντοπίστηκε όπως και στην 1^η σειρά από τα βίντεο διάρκειας 5 min (δοκίμια 2, 4, 6, 8) για καθέναν από τους 4 αύλακες.

Δοκίμιο/ Μεταλλικός αφρός	Αριθμός περασμάτων	Χρόνος παραμονής στον φούρνο (min)
B1	2	2,5
B2	2	5
B3	3	2,5
B4	3	5
B5	5	2,5
B6	5	5
B7	8	2,5
B8	8	5

Ανάλυση αποτελεσμάτων 2^{ης} σειράς

Δοκίμια 2 περασμάτων



Εικόνα 2.5.13 - Πρόδρομο και αφροποιημένα δοκίμια δύο περασμάτων.

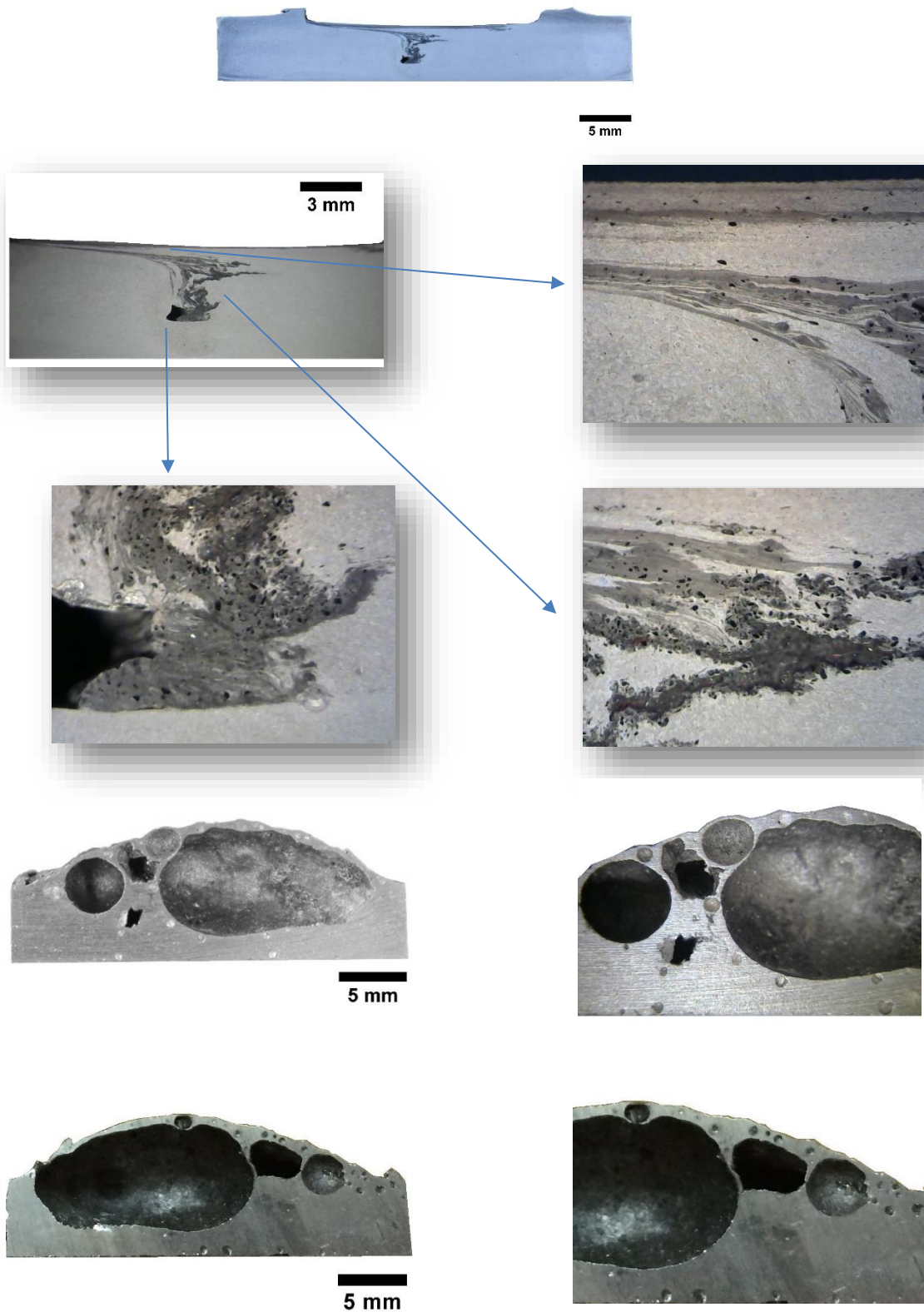
Αφού ακολουθήθηκε η διαδικασία από την αρχή και επεξεργάστηκαν οι πλάκες αλουμινίου με βάθος 2.9 mm αυτή τη φορά, πραγματοποιήθηκε εκ νέου στερεοσκοπική ανάλυση για την 2^η σειρά πειραμάτων με αρχή την περίπτωση των 2 περασμάτων. Στην κάθετη επιφάνεια του προδρόμου παρατηρείται μικρή συγκέντρωση μίγματος στην ζώνη ανάδευσης του υλικού, η οποία ωστόσο δεν εμφανίζεται σε βάθος παρά βρίσκεται κοντά στην κατεργασμένη επιφάνεια. Η λεπτότητα που χαρακτηρίζει την ζώνη ανάδευσης, συνυπολογίζοντας τον χαμηλό αριθμό περασμάτων, δεν προδιαθέτει για ομαλή διόγκωση και ανάπτυξη ομοιόμορφου πορώδους. Τόσο για το δοκίμιο B1 όσο και για το δοκίμιο B2 τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ανεπαρκή ανάδευση που φάνηκε στο πρόδρομο δοκίμιο.

Παρόλο που έχει επέλθει μερική αφροποίηση στην πρώτη περίπτωση, παρατηρείται ανομοιογένεια στη διασπορά του πορώδους και ακόμη έχει προκύψει αφροποιημένη περιοχή, που λόγω έλλειψης υλικού δεν παρουσιάζει σφαιρική δομή. Για το δοκίμιο B2 η αφροποίηση είναι ελάχιστη και οι πόροι οι οποίοι έχουν δημιουργηθεί δεν έχουν την ανάλογη ανάπτυξη και στις τρεις διαστάσεις (μικρό βάθος). Επιπλέον δεν παρατηρούνται διακριτοί πόροι, γεγονός που οφείλεται στην μικρή εισαγωγή μίγματος, όπως ακριβώς είχε παρατηρηθεί και στο πρόδρομο.



Εικόνα 2.5.14 - Ποσοστιαία μεταβολή μεγίστου ύψους για 2 περάσματα.

Δοκίμια 3 περασμάτων

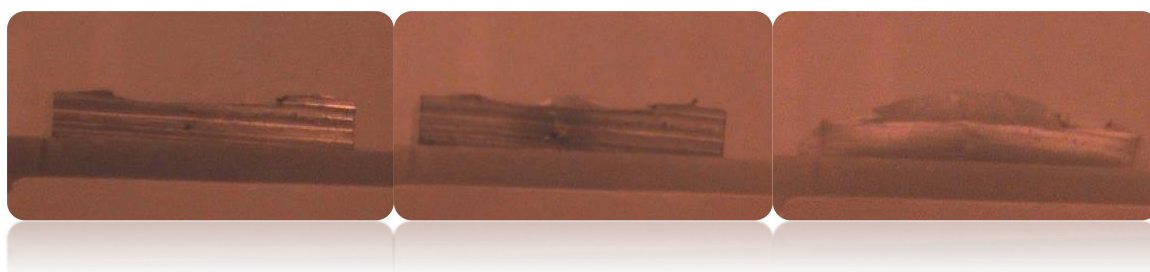


Εικόνα 2.5.15 - Πρόδρομο και αφροποιημένα δοκίμια τριών περασμάτων.

Με την αύξηση του αριθμού περασμάτων σε 3 η ζώνη ανάδευσης του προδρόμου υλικού επεκτείνεται και το μίγμα διασπείρεται ομοιογενώς από την επιφάνεια κατεργασίας μέχρι το μέγιστο βάθος. Από τις εικόνες που βρίσκονται σε μεγέθυνση φαίνεται ότι οι κόκκοι του SiC βρίσκονται σε μεγάλο βαθμό εντός της κατεργασμένης επιφάνειας, γεγονός που υποδεικνύει την ομαλή ανάδευσή του κατά την διεργασία FSP. Στην υποχωρούσα πλευρά είναι διακριτή η εισαγωγή του μίγματος με τρόπο ομαλό, ενώ στην προωθούμενη το υλικό φαίνεται να παγιδευτεί χωρίς την περαιτέρω εξάπλωσή του εκτός της ζώνης ανάδευσης. Κάτι τέτοιο είναι δυνατόν να επηρεάζει αρνητικά την διασπορά του υλικού με αποτέλεσμα μια ανεπιθύμητη δομή μετά την αφροποίηση. Ο μεταλλικός αφρός (δοκιμιο Β3), που έχει προκύψει από την διόγκωση του προδρόμου μετάλλου, χαρακτηρίζεται από υψηλό ποσοστό πορώδους με έναν πόρο να έχει υπερβολικά μεγάλο μέγεθος σε σχέση με τους υπόλοιπους. Το εν λόγω αποτέλεσμα είναι πιθανό να οφείλεται σε μεγάλη συγκέντρωση του αφριστικού παράγοντα στο σημείο εκείνο.

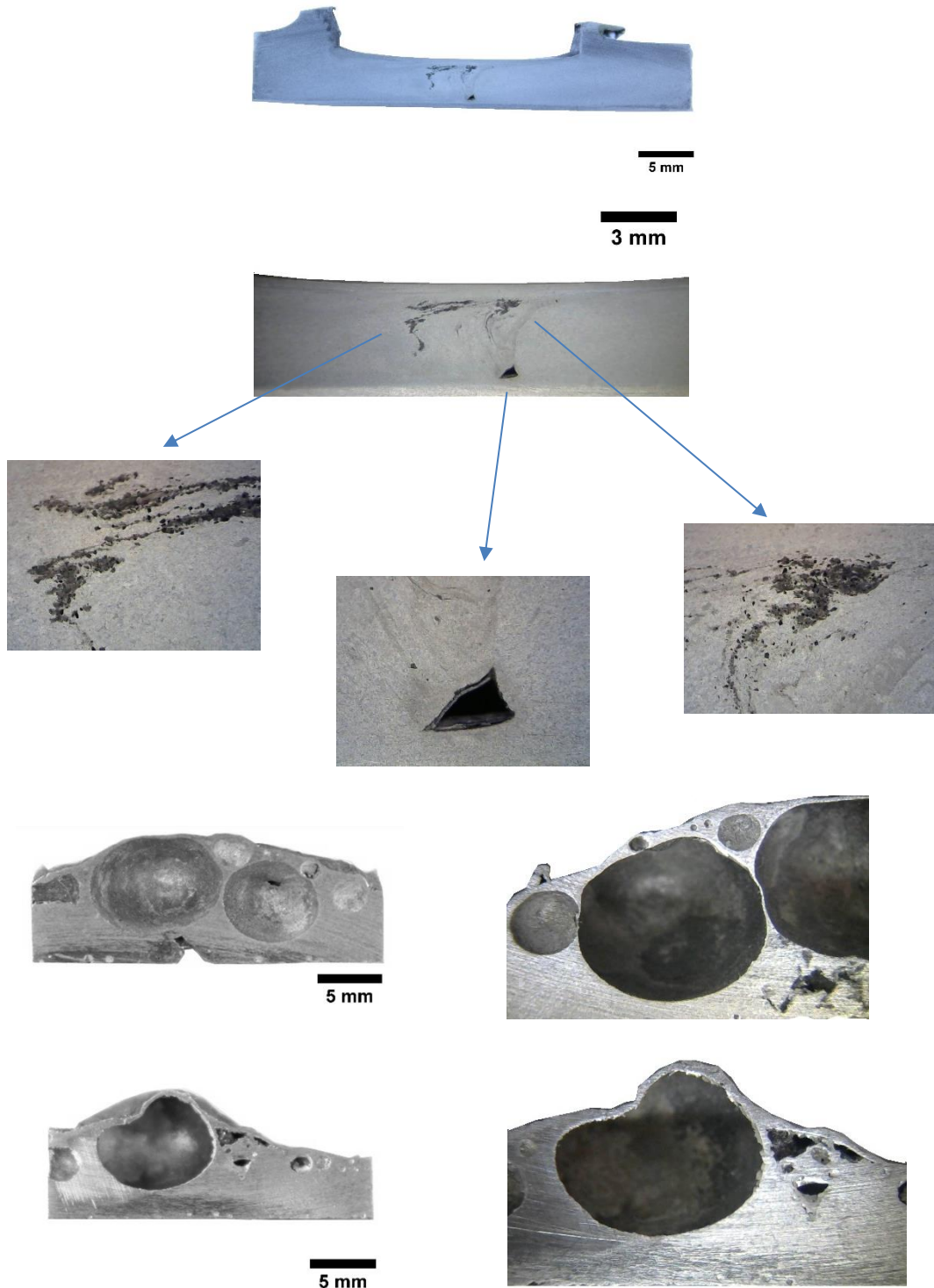


Εικόνα 2.5.16 - Ποσοστιαία μεταβολή μεγίστου ύψους για 3 περάσματα.



Εικόνα 2.5.17 - Στάδια αφροποίησης δοκιμίου Β4.

Δοκίμια 5 περασμάτων

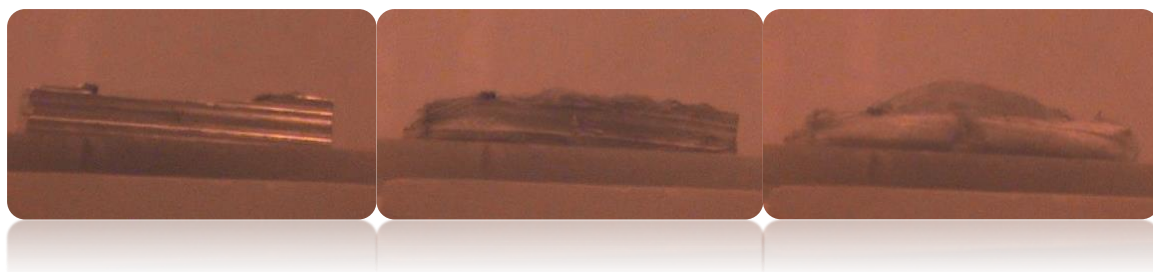


Εικόνα 2.5.18 - Πρόδρομο και αφροποιημένα δοκίμια πέντε περασμάτων.

Το πρόδρομο των 5 περασμάτων εμφανίζει καλή διασπορά του μίγματος μέσα στην ζώνη ανάδευσης, με πλάτυνσή της συγκριτικά με τις περιπτώσεις χαμηλότερου αριθμού περασμάτων. Από τις εικόνες του μικροσκοπίου η κεραμική φάση ενίσχυσης φαίνεται να κατανέμεται ομοιόμορφα με μέσο μέγεθος μικρότερο από εκείνο των 3 περασμάτων. Κοντά στο ύψος της βάσης εντοπίζεται η παρουσία ατέλειας τύπου worm-hole/tunnel defect, από την οποία αναμένεται να υπάρξει άμεση διαφυγή του εγκλωβισμένου υδρογόνου. Το δοκίμιο B5 (2.5 min) παρουσιάζει υψηλό πορώδες με ικανοποιητική διασπορά, ωστόσο η διακύμανση των διαμέτρων των πόρων του είναι μεγάλη. Στο δοκίμιο B6 παρατηρείται αρκετά μικρότερο πορώδες με συρρίκνωση των πόρων, χωρίς ωστόσο να έχει εμφανίσει έντονη αλλαγή συμπεριφοράς κατά την αφροποίηση, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα μεταβολής μεγίστου ύψους.

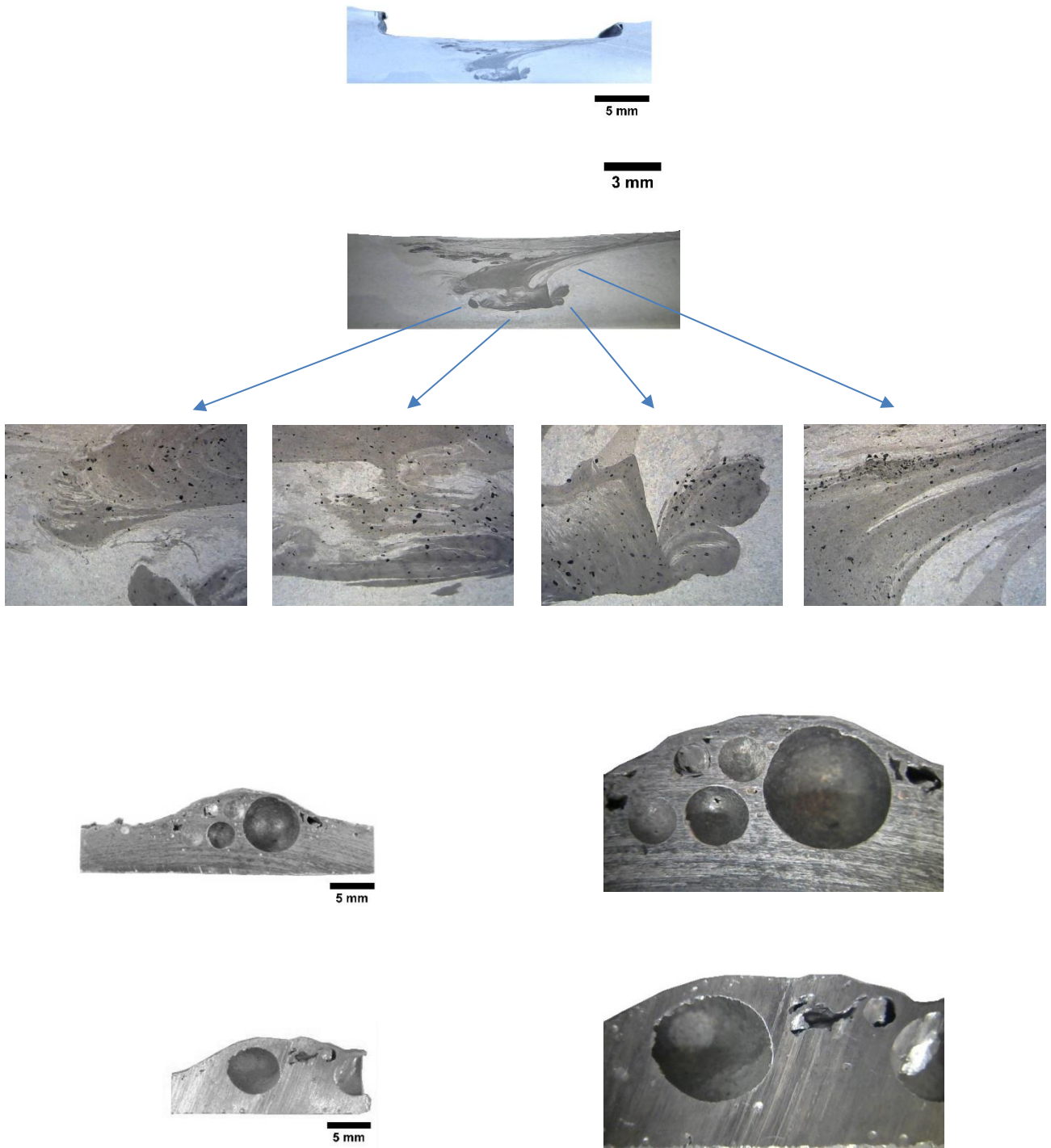


Εικόνα 2.5.19 - Ποσοστιαία μεταβολή μεγίστου ύψους για 5 περάσματα.



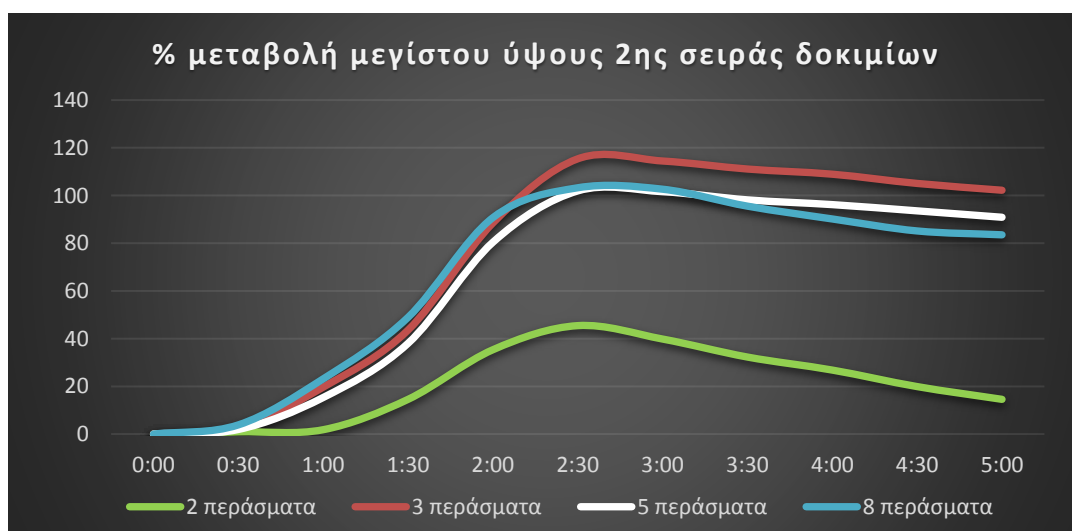
Εικόνα 2.5.20 - Στάδια αφροποίησης δοκιμίου B6.

Δοκίμια 8 περασμάτων



Εικόνα 2.5.21 - Πρόδρομο και αφροποιημένα δοκίμια τριών περασμάτων.

Με το πέρας της διαδικασίας για την 2^η σειρά πειραμάτων εξετάζεται το δοκίμιο των 8 επαναλήψεων της διεργασίας FSP. Στερεοσκοπικά παρατηρείται μια ομοιογενής ανάδευση με ικανοποιητικά μεγάλο πλάτος ακόμη και στο μέγιστο βάθος. Με την βοήθεια των εικόνων του μικροσκοπίου φαίνεται να έχει πραγματοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό η διασπορά του μίγματος στο μεταλλικό υλικό για κάθε ύψος εντός της ζώνης ανάδευσης. Ως αποτέλεσμα της αφροποίησης του προδρόμου δοκιμίου B7 παραλαμβάνεται ένας μεταλλικός αφρός με ομοιόμορφα κατανεμημένο πορώδες, οι πόροι του οποίου διακρίνονται για την σφαιρικότητά τους. Επιπλέον, για τον εν λόγω αφρό είναι σημαντική η ελάχιστη παρουσία πόρων υπό κατάρρευση, καθώς και ατελειών εντός του σύνθετου υλικού. Για το αφροποιημένο δοκίμιο των 5 min παρατηρείται μία αισθητή μείωση στο πορώδες του αφρού, ενώ η κατάρρευση των πόρων είναι εντονότερη σε σχέση με το δοκίμιο των 2.5 min.

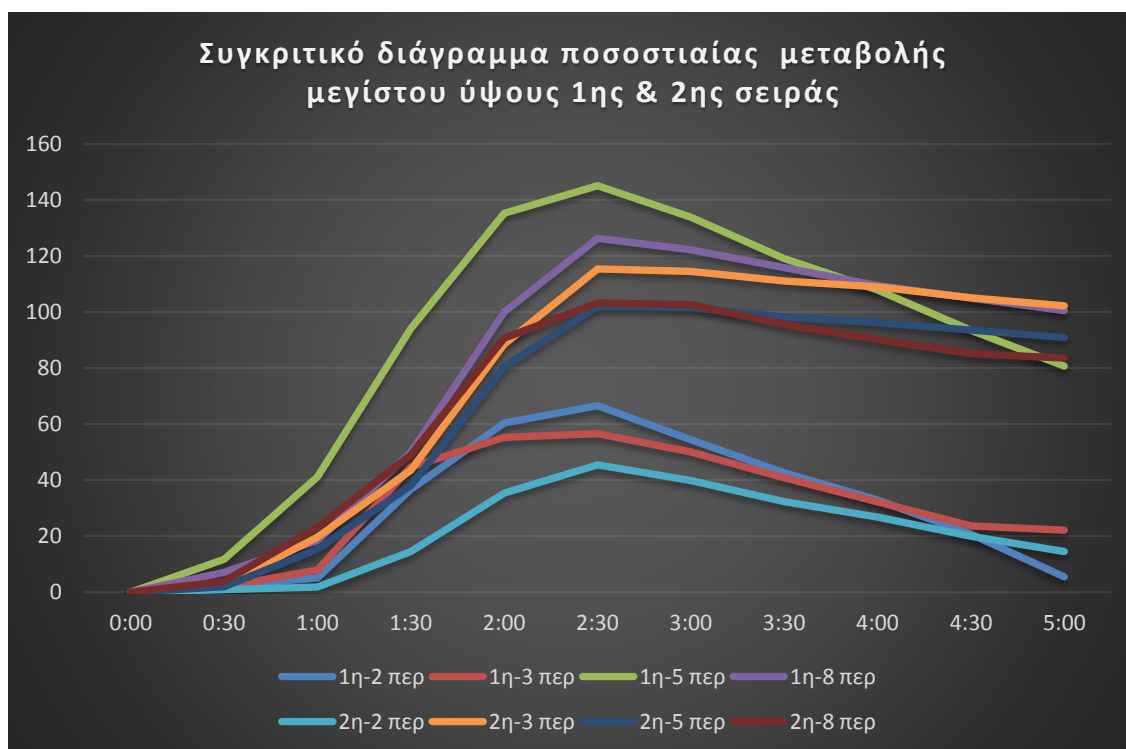


Εικόνα 2.5.22 - Ποσοστιαία μεταβολή μεγίστου ύψους 2^{ης} σειράς πειραμάτων.



Εικόνα 2.5.23 - Στάδια αφροποίησης δοκιμίου B8.

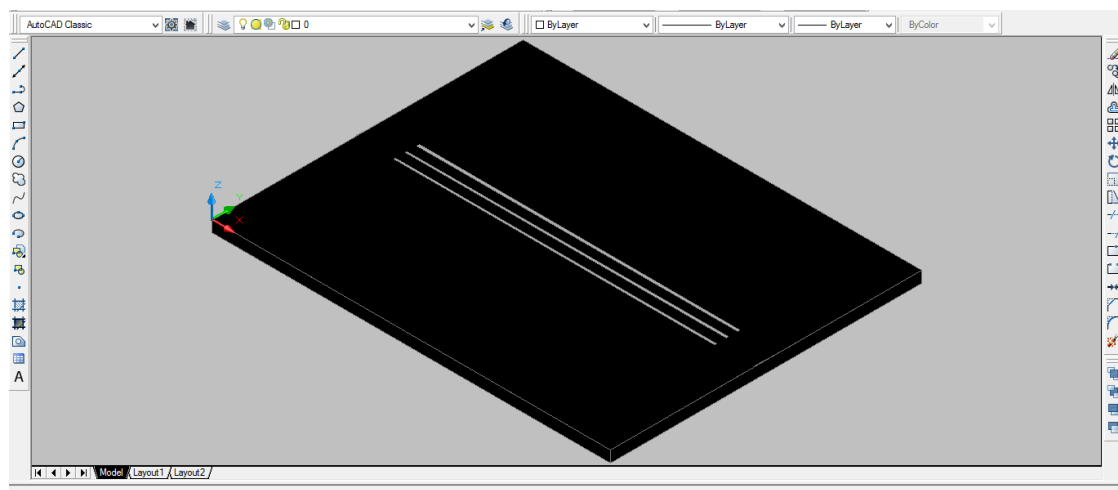
Αφού ολοκληρώθηκαν τα αποτελέσματα και της 2^{ης} σειράς πειραμάτων και συγκρίθηκαν με εκείνα της 1^{ης}, παρατηρήθηκε πως για το βάθος των 2.9 mm, που χρησιμοποιήθηκε στην 2^η σειρά, παρασκευάστηκαν αφροί με πιο βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση του βάθους συνεισέφερε σε πιο ομαλές αναδεύσεις ακόμη και για πιο χαμηλό αριθμό περασμάτων. Ακόμη, οι αφροποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα δοκίμια της 2^{ης} σειράς παρουσίασαν μικρότερη διαρροή του αφριστικού παράγοντα και λιγότερες εκρήξεις, κάτι που έγινε αντιληπτό ύστερα από την παρατήρηση των αντίστοιχων βίντεο. Όπως φαίνεται και από το ποσοστιαίο διάγραμμα μεταβολής μεγίστου ύψους, τα δοκίμια της 2^{ης} σειράς εμφάνισαν πιο σταθερή απόκριση κατά την αφροποίηση και μια ομαλότερη κατάληξη στην φάση εξόδου τους από τον φούρνο. Στην επιφάνεια των αφροποιημένων δοκιμίων της 2^{ης} σειράς εμφανίστηκε μεγαλύτερο ποσοστό πορώδους, μικρότερη κατάρρευση πόρων και παρουσία ατελειών. Επιπλέον, οι μεταλλικοί αφροί της 2^{ης} σειράς παρουσίασαν μικρότερη διακύμανση στις τιμές των διαμέτρων των πόρων, οι οποίοι χαρακτηρίζονταν από μεγαλύτερη σφαιρικότητα.



Εικόνα 2.5.24 - Ποσοστιαία μεταβολή μεγίστου ύψους των δοκιμίων της 1^{ης} και 2^{ης} σειράς πειραμάτων.

3^η Σειρά πειραμάτων

Εξετάζοντας την δυνατότητα παραγωγής μεταλλικών αφρών σε βιομηχανικό επίπεδο με τοπική κατεργασία του μετάλλου βάσης, μελετήθηκε η εφαρμογή της FSP σε δοκίμιο μεγαλύτερων διαστάσεων από εκείνα των δύο προηγούμενων σειρών. Για να καταστεί η μέθοδος βιομηχανικά εφικτή, έπρεπε να ληφθεί υπ' όψιν τόσο ο οικονομικός όσο και ο χρονικός παράγοντας. Δεδομένων των παραπάνω και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δύο προηγούμενες σειρές, αποφασίστηκε η κατεργασία πλάκας αλουμινίου 5083 διαστάσεων 205 * 160 * 6 mm με τρεις παράλληλους αύλακες, αντί για δύο, για την εισαγωγή του μίγματος σκόνης. Στην περίπτωση αυτή μελετήθηκαν δοκίμια που περιελάμβαναν εντός τους και τους 3 κατεργασμένους αύλακες, αφού η κοπή πραγματοποιήθηκε κάθετα σε αυτούς. Η απόσταση μεταξύ των αυλακών ορίστηκε έπειτα από την μέτρηση του πλάτους της ζώνης ανάδευσης στο πρόδρομο δοκίμιο των 8 περασμάτων της 2^{ης} σειράς (λόγω της ομοιογένειας που παρουσίασε), έτσι ώστε να δημιουργηθούν 3 ζώνες ανάδευσης με την μικρότερη δυνατή αλληλοεπικάλυψη. Οι εν λόγω εσοχές, αφού σχηματίστηκαν ανά 6 mm πάνω στην επιφάνεια της πλάκας, κατεργάστηκαν δια της μεθόδου FSP από 3 φορές έκαστη (συνολικά 9 περάσματα) με τις κεφαλές του εργαλείου των δύο προηγούμενων σειρών. Μετά το πέρας της παρασκευής του σύνθετου υλικού εκείνο κόπηκε σε τέσσερα μέρη, εκ των οποίων τα 3 προορίζονταν για αφροποίηση (διαστάσεις 33 * 30 mm) και το ένα μελετήθηκε στην πρόδρομη μορφή ως προς τη ζώνη ανάδυσής του.



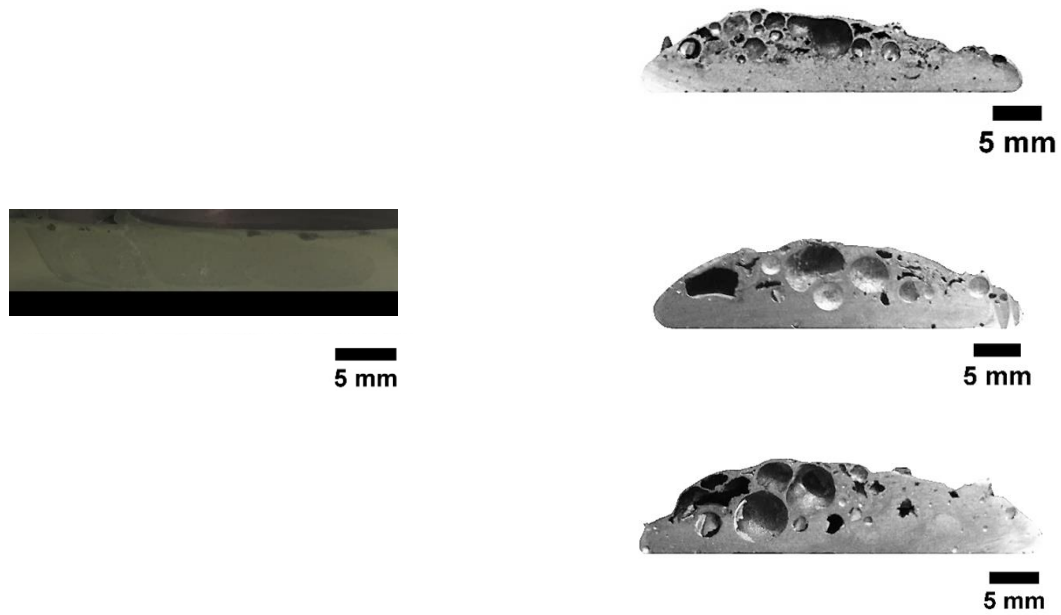
Εικόνα 2.5.25 - Πλάκα αλουμινίου 5083-H111 για την 3^η σειρά πειραμάτων.

Όμοια με την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τις 2 πρώτες σειρές και εξηγήθηκε στην υποενότητα της πειραματικής ακολουθίας, τα 3 αφροποιήσιμα δοκίμια εισήχθησαν εντός του επαγωγικού φούρνου όπου κατεργάστηκαν θερμικά για διαφορετικούς χρόνους παραμονής. Οι χρόνοι αντιστοιχούσαν σε 2.5 min, 3.5 min και η μέγιστη τιμή στα 4.5 min, μιας και η συντριπτική πλειοψηφία των δοκιμών που αφροποιήθηκαν με χρόνο παραμονής στα 5 min παρουσίασε σημάδια κατάρρευσης. Με την αύξηση του χρόνου και δεδομένη την αντίστοιχη προκύπτουσα δομή των παραγόμενων αφρών στοχεύονταν η εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με το πορώδες και το μέγεθος των πόρων του.

Βάσει βιβλιογραφίας αναμένεται αρχικά να εμφανιστεί στην μεταλλική μήτρα πορώδης δομή, αποτελούμενη από πολλούς πόρους μικρής διαμέτρου. Με την αύξηση της διάρκειας αφροποίησης προσδοκάται η διόγκωση των πόρων και η συνένωσή τους με άλλους, γεγονός που δύναται να οδηγήσει στην σταδιακή μείωση του πλήθους τους. Στη μέγιστη διάρκεια (εν προκειμένω 4.5 min) αρκετές φυσαλίδες ενδέχεται να απεγκλωβιστούν, οδηγώντας στην κατάρρευση των πόρων, ενώ οι συσσωματώσεις αναμένεται να λιγοστεύσουν.

Δοκίμιο/ Μεταλλικός αφρός	Αριθμός περασμάτων	Χρόνος παραμονής στον φούρνο (min)
Γ1	3	2:30
Γ2	3	3:30
Γ3	3	4:30

Ανάλυση αποτελεσμάτων 3^{ης} σειράς



Εικόνα 2.5.26 - Πρόδρομο και αφροποιημένα δοκίμια 3^{ης} σειράς πειραμάτων.

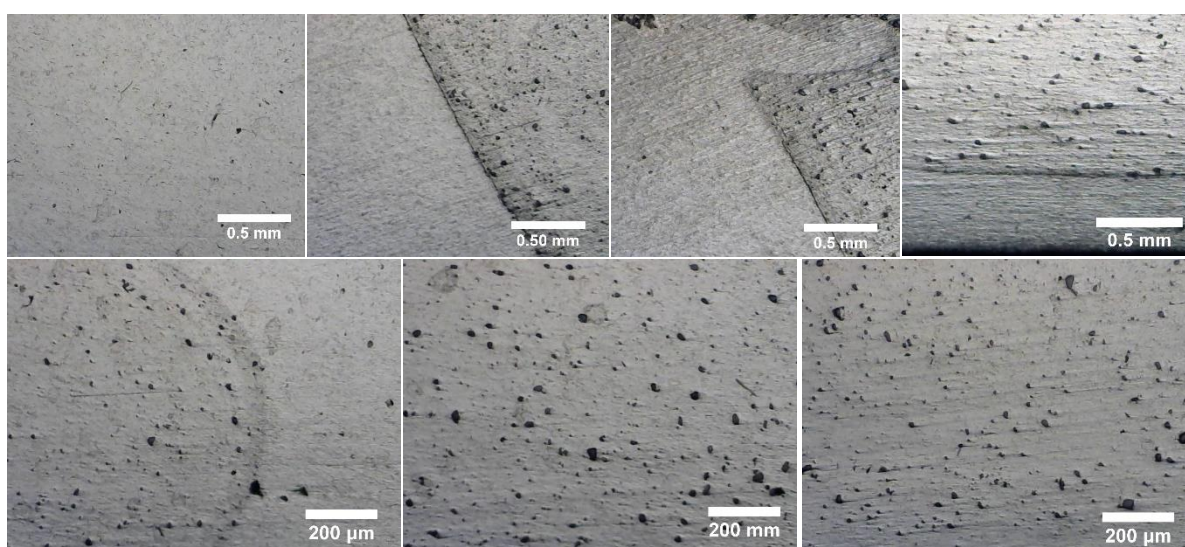
Πρόδρομο δοκίμιο

Από την στερεοσκοπική εξέταση του προδρόμου για την 3^η σειρά δειγμάτων για 3 περάσματα παρατηρήθηκε ικανοποιητική ανάδευση του μίγματος, με επαρκές πλάτος ακόμη και στην μέγιστη τιμή βάθους. Ακόμη, φαίνεται να έχει πραγματοποιηθεί ομοιογενής διασπορά της προστιθέμενης σκόνης χωρίς την εμφάνιση ανωμαλιών.



Εικόνα 2.5.27 - Ζώνη ανάδευσης στο πρόδρομο δοκίμιο.

Με την χρήση του μικροσκοπίου είναι δυνατός ο εντοπισμός των σωματιδίων του καρβιδίου, τα οποία εμφανίζονται εντός της μεταλλικής μήτρας καταλαμβάνοντας θέσεις με παρόμοιο τρόπο στις περιοχές της ζώνης ανάδευσης. Χαρακτηριστικές είναι οι περιπτώσεις όπου η ζώνη ανάδευσης συνορεύει με την θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη, όπου συσσωρεύεται μεγάλη ποσότητα SiC δημιουργώντας τα μεταξύ τους όρια. Εκατέρωθεν αυτών η δομή του μετάλλου εμφανίζεται όμοια με εκείνη του μετάλλου βάσης που όμως έχει επηρεαστεί θερμικά, όπως συναντάται στο αντίστοιχο θεωρητικό κεφάλαιο των μικροδομικών ζωνών.



Εικόνα 2.5.28 - Μικροσκοπική απεικόνιση προδρόμου δοκιμίου 3^{ης} σειράς πειραμάτων.

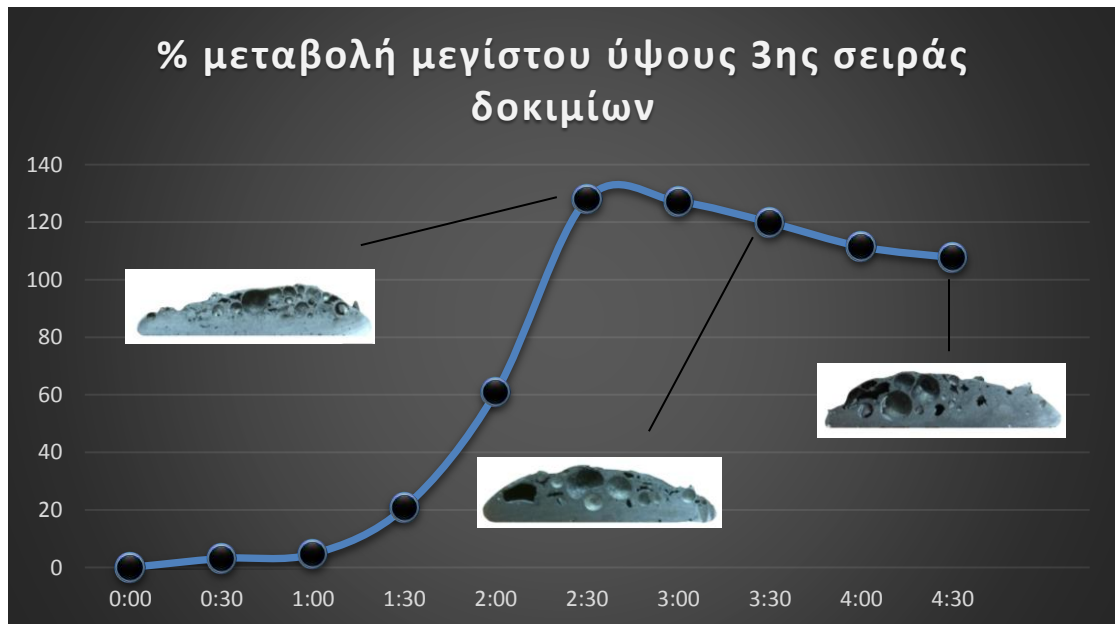
Μεταλλικοί αφροί

Ο μεταλλικός αφρός Γ1 εμφανίζει, όπως αναμενόταν, ένα μεγάλο πλήθος ομοιογενών πόρων μικρής διαμέτρου. Οι εν λόγω πόροι χαρακτηρίζονται από την σφαιρική τους αλλά και από τα διακριτά και συμπαγή τοιχώματα που παρεμβάλλονται ανάμεσά τους. Συγκριτικά με τον μικρό χρόνο παραμονής του σε υψηλή θερμοκρασία, ο συγκεκριμένος αφρός φέρει ικανοποιητικό ποσοστό πορώδους με ευδιάκριτους πόρους, γεγονός που επιβεβαιώνει την επαρκή ανάδευση που παρατηρήθηκε στο πρόδρομο αφροποιήσιμο υλικό σε προηγούμενη αναφορά. Όσον αφορά την διασπορά του κεραμικού υλικού μέσα στην μεταλλική μήτρα φαίνεται να έχει πραγματοποιηθεί ομοιογενώς, καθώς έχει περιορίσει την διαφυγή του

αφριστικού παράγοντα. Χάριν της σταθεροποιητικής του ικανότητας, το κεραμικό υλικό δεσμεύει μεγάλο όγκο αερίου στα ανώτερα επίπεδα, δημιουργώντας ιδιαίτερα λεπτά τοιχώματα.

Για το αφροποιημένο δοκίμιο Γ2 παρατηρείται σημαντική μείωση του πλήθους των πόρων, με παράλληλη αύξηση του μέσου μεγέθους αλλά και του βάθους αυτών. Ακόμη, εντοπίζονται ανά περιοχές συσσωματώσεις ή ενδείξεις μελλοντικών συνενώσεων, όπως επίσης και φαινόμενα κατάρρευσης πόρων. Οι μικρότεροι πόροι, οι οποίοι δεν καταφέρνουν να διογκωθούν περαιτέρω, φαίνονται να καταρρέουν γύρω από τους μεγάλους πόρους και διαμορφώνονται ανάλογα με την συμπεριφορά του αερίου στην προσπάθειά του να απεγκλωβιστεί. Αντίθετα, οι πόροι μεγαλύτερων μεγεθών συνεχίζουν να επεκτείνονται από τις αλληλεπιδράσεις τους με άλλους και λόγω του μεγέθους τους, όπως εξηγήθηκε κατά την διόγκωση των πόρων για τα κυψελοειδή υλικά στο θεωρητικό μέρος, τείνουν να καταλάβουν υψηλότερες θέσεις στην μεταλλική μήτρα.

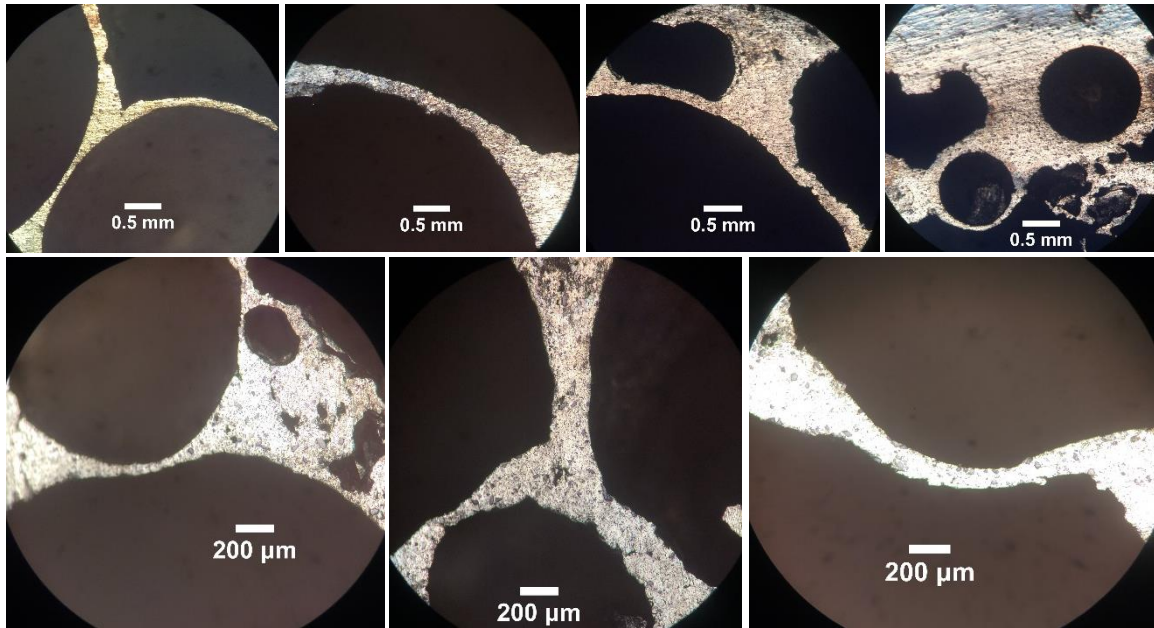
Με την αφροποίηση του προδρόμου αφροποιήσιμου υλικού διάρκειας 4.5 min προκύπτει ο μεταλλικός αφρός Γ3, ο οποίος παρουσιάζει την μεγαλύτερη μέση διάμετρο πόρων όπως φαίνεται και από το αντίστοιχο σχήμα. Το πλήθος των πόρων του είναι πολύ μικρότερο από εκείνο του αφρού Γ1 και οι πόροι του λιγότερο ομοιογενείς. Σε σχέση με τον αφρό Γ2 το δοκίμιο Γ3 εμφανίζει αυξημένο βάθος πόρων, όπως επίσης και προχωρημένο στάδιο κατάρρευσης πόρων. Επιπλέον, οι πόροι του εν λόγω δοκιμίου χαρακτηρίζονται από έλλειψη σφαιρικότητας, αλλά και ιδιαίτερα λεπτά τείχη που βρίσκονται στα πρόθυρα της καθίζησης. Σημαντικό στοιχείο για την δομή του αφρού Γ3 αποτελεί η μονομερής συσώρευση του πορώδους, με αποτέλεσμα την διαφοροποίηση της δομής αλλά και της συμπεριφοράς του αφρού στις δύο διακριτές περιοχές.



Εικόνα 2.5.29 - Ποσοστιαία μεταβολή μεγίστου ύψους 3^{ης} σειράς πειραμάτων.

Μελέτη οπτικής μικροσκοπίας

Την στερεοσκοπική ανάλυση των τριών αφροποιημένων δοκιμίων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως ακολούθησε η μικροσκοπική ανάλυση για το δοκίμιο Γ2. Η παρατήρηση της ανάδευσης των υλικών με την βοήθεια του μικροσκοπίου, αποσκοπούσε στον εντοπισμό των θέσεων τους μέσα στην μεταλλική μήτρα. Από τις εικόνες που συλλέχθηκαν από κατά τόπους σημεία παρατηρήθηκε ομοιογένεια στην μικροδομή των κυτταρικών τειχών, τα οποία με την παρουσία του κεραμικού υλικού παρουσιάστηκαν ικανοποιητικά συμπαγή.



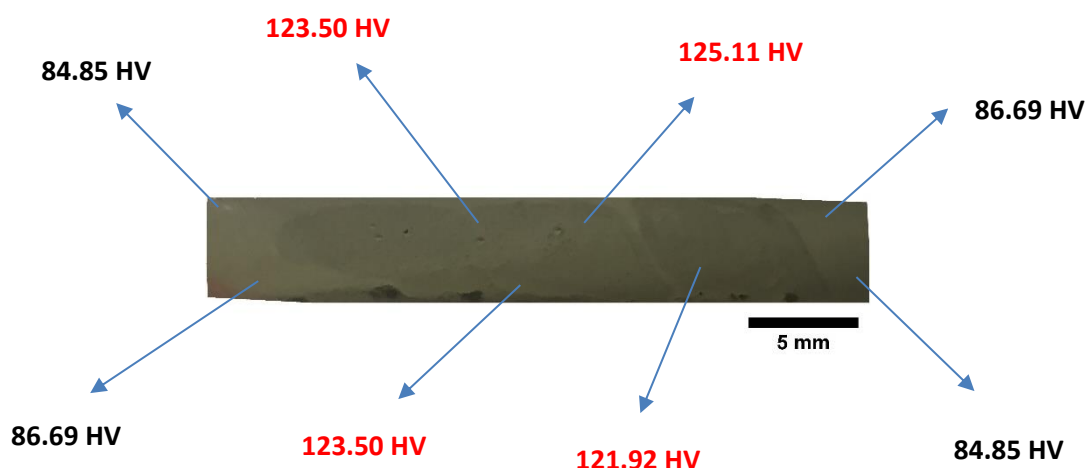
Εικόνα 2.5.30 - Μικροσκοπική απεικόνιση αφροποιημένου δοκιμίου Γ2.

Η επαρκής ανάδευση που παρατηρήθηκε πρωτίστως στο δοκίμιο του προδρόμου αφροποιήσιμου υλικού επιβεβαιώθηκε και μικροσκοπικά, αφού κατέστη δυνατός και ο εντοπισμός του παράγοντα ενίσχυσης στην μεταλλική μήτρα. Η διασπορά του καρβιδίου στο σύνολο του μεταλλικού αφρού φάνηκε να έχει πραγματοποιηθεί επιτυχώς χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις, γεγονός που εξασφάλισε κοινά χαρακτηριστικά του μακροπορώδους. Εν συνεχεία, οι ατέλειες που εμφανίζονται στην μικροδομή του αφρού με την μορφή διακένων συναντώνται σε χαμηλό βαθμό και είναι πιθανό να οφείλονται στο χαμηλό ενεργειακό δυναμικό συσσωμάτωσης της μικροκρυσταλλικής κεραμικής φάσης.

2.6 Σκληρομέτρηση

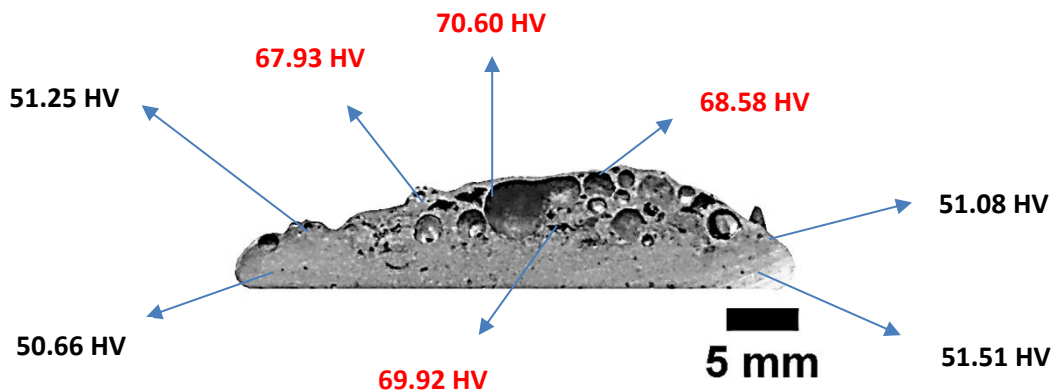
Η εισαγωγή του SiC εντός της μεταλλικής μήτρας απέβλεπε στην αύξηση της σκληρότητας του σύνθετου υλικού, αλλά και στην βελτίωση της μηχανικής του απόκρισης. Όσον αφορά το πρόδρομο υλικό πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις εντός και εκτός της ζώνης ανάδευσης, ούτως ώστε να συγκριθούν οι τιμές σκληρότητας πριν και μετά την εισαγωγή της ενισχυτικής φάσης.

Εκτός της ζώνης ανάδευσης του προδρόμου, στην θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη, παρατηρείται μια ελαφριά αύξηση της τιμής σκληρότητας από 80 HV σε 85.7 HV, σε σύγκριση με το αρχικό κράμα. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στο φαινόμενο της ενδο-τράχυνσης και στα επαυξημένα πεδία παραμόρφωσης που έχουν ενεργήσει στην συγκεκριμένη περιοχή. Εντός της ζώνης ανάδευσης η άνοδος που σημειώνεται στις τιμές της σκληρότητας είναι πολύ μεγαλύτερη, ως αποτέλεσμα της παρουσίας του κεραμικού υλικού στην μεταλλική μήτρα.



Εικόνα 2.5.31 - Προσδιορισμός σκληρότητας εντός της ζώνης ανάδευσης (κόκκινο χρώμα) και εκατέρωθεν αυτής, εντός της θερμικά κατεργασμένης περιοχής του μητρικού υλικού (μαύρο χρώμα).

Για τον ενδεικτικό προσδιορισμό της σκληρότητας των αφρών πραγματοποιήθηκε σκληρομέτρηση του δοκιμίου Γ1. Εντός της ζώνης ανάδευσης ο αφρός απέδωσε μέση τιμή σκληρότητας 69 HV. Εκατέρωθεν της ζώνης ανάδευσης, όπου δεν πραγματοποιήθηκε διασπορά της ενισχυτικής φάσης, παρατηρήθηκε έντονη πτώση της μέσης τιμής σκληρότητας στα 51.5 HV συγκριτικά με την τιμή του μετάλλου βάσης AA5083-111 (80 HV). Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην αύξηση του μέσου μεγέθους ανάπτυξης των κόκκων του μετάλλου βάσης υπό την θερμική κατεργασία αφροποίησης. Το φαινόμενο της αύξησης του μέσου μεγέθους των κόκκων πραγματοποιείται μέσα από μηχανισμούς ανάπτυξης, οι οποίοι εξαρτώνται από τον παράγοντα του χρόνου.



Εικόνα 2.5.32 - Προσδιορισμός σκληρότητας εντός της αφροποιημένης ζώνης (κόκκινο χρώμα) και εκατέρωθεν αυτής, χωρίς την παρουσία κεραμικού υλικού (μαύρο χρώμα).

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα της 3^{ης} σειράς, συμπεραίνεται αρχικά πως είναι εφικτή η παρασκευή μεταλλικών αφρών από πλάκα αλουμινίου 5083-H111 και για μεγαλύτερα δοκίμια από εκείνα των 2 πρώτων σειρών κατόπιν τοπικής κατεργασίας με τρία περάσματα. Ανάλογα με το ζητούμενο μέγεθος των πόρων και την δομή του αφρού επιλέγεται ο αντίστοιχος χρόνος παραμονής του δοκιμίου στον επαγωγικό φούρνο. Ο μικρότερος χρόνος παραμονής επιφέρει μεγαλύτερο πλήθος πόρων και συγχρόνως μεγαλύτερο πλήθος αυτών, ενώ με την αύξηση της διάρκειας αφροποίησης του δοκιμίου παραλαμβάνεται αφρός μεγαλύτερων πόρων αλλά μικρότερου πλήθους. Η ποσοστιαία μεταβολή μεγίστου ύψους για τις συγκεκριμένες συνθήκες παρατηρείται σε χρονική διάρκεια αφροποίησης 2.5 min, όπου η πορώδης μορφή εμφανίζεται ομοιόμορφη. Από τις εικόνες του μικροσκοπίου (δοκίμιο Γ2) φαίνεται πως στην μικροδομή του υλικού το ενισχυτικό φάσης έχει καλή διασπορά μετά από 3 επαναλήψεις της διαδικασίας, ωστόσο το έντονο φαινόμενο της συσσωμάτωσης των πόρων στα δοκίμια Γ2 και Γ3 εκτιμάται πως επηρεάζεται αρνητικά από το μεγάλο της μέγεθος. Η σκληρομέτρηση ανά περιοχές της επιφάνειας του δοκιμίου Γ1 δείχνει πως η σκληρότητα του αφρού εκτός της ζώνης ανάδευσης έχει μειωθεί αισθητά (συγκριτικά με το AA5083-H111), κάτι που δεν συμβαίνει εντός της ζώνης ανάδευσης λόγω της παρουσίας του κεραμικού υλικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3.1 Συμπεράσματα

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν ύστερα από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνοψίζονται στην συνέχεια:

- Όσο αυξανόταν ο αριθμός επανάληψης της διαδικασίας τόσο μεγαλύτερη ομοιομορφία παρατηρούνταν στο σύνθετο υλικό μεταλλικής μήτρας.
- Όσο πιο ομοιόμορφη ήταν η κατανομή υλικού στο πρόδρομο δοκίμιο τόσο πιο σταθερή εμφανίστηκε η απόκρισή του κατά την αφροποίηση και τόσο πιο ομοιόμορφο ήταν το πορώδες του δοκιμίου που προέκυπτε κατόπιν αυτής.
- Για βάθος αύλακα 2.9 mm σημειώθηκε καλύτερη ανάμειξη και διασπορά του μίγματος ενισχυτικού-αφριστικού παράγοντα απ' ότι για βάθος 3.9 mm, με συνέπεια την παρασκευή αφρών με μεγαλύτερο μέγεθος πόρων και ποσοστό πορώδους.
- Με αύξηση της επιφάνειας των υπό εξέταση δοκιμίων και την προσθήκη 2 επιπλέον αυλακών σε απόσταση 6 mm για 3 επαναλήψεις της διεργασίας FSP, κατέστη δυνατή η παρασκευή μεταλλικών αφρών με ισομεγεθείς πόρους.
- Για δοκίμια μεγαλύτερης επιφάνειας παρατηρήθηκε πως όσο μικρότερος είναι ο χρόνος αφροποίησης τόσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των πόρων, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από μικρές διαμέτρους. Αντιθέτως, με αύξηση του χρόνου παραμονής αυξάνεται η διάμετρος αυτών, ενώ το πλήθος τους μειώνεται.
- Η ποσοστιαία μεταβολή μεγίστου ύψους στα δοκίμια και για τις τρεις σειρές δειγμάτων σημειώθηκε στην χρονική διάρκεια των 2.5 min.
- Στην περιοχή του αφροποιημένου δοκιμίου που δεν περιείχε την ενισχυτική φάση SiC σημειώθηκε έντονη πτώση στις τιμές σκληρότητας, ενώ εντός της αφροποιημένης περιοχής, παρουσία του κεραμικού υλικού, οι τιμές σκληρότητας ήταν υψηλές παρά την αύξηση του μέσου μεγέθους των κόκκων του μεταλλικού υλικού.

- Η διαρκής συνένωση των πόρων που παρατηρήθηκε κατά την αφροποίηση των δοκιμίων και για τις 3 σειρές φαίνεται να σχετίζεται με το μεγάλο μέγεθος της διαμέτρου των κόκκων του κεραμικού υλικού.

3.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επιτεύχθηκε η παρασκευή σύνθετου επιφανειακού υλικού μεταλλικής μήτρας με διασπορά σωματιδίων καρβιδίου του πυριτίου διαμέτρου 43 μm (SiC) σε μήτρα κράματος αλουμινίου 5083. Το υλικό που παρασκευάστηκε εμφάνισε ικανοποιητική διασπορά της προστιθέμενης σκόνης, εξαιτίας του μεγέθους της οποίας παρουσιάστηκαν φαινόμενα έντονης συνένωσης των πόρων. Εξαιτίας των παραπάνω, οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα είναι οι εξής:

- Επανεκτέλεση της κατεργασίας δια τριβής με ανάδευση με μεγαλύτερη θερμική παροχή (μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής-μικρότερη ταχύτητα πρόωσης).
- Προσθήκη ενισχυτικής φάσης (SiC) μικρότερης κοκκομετρίας για την παραγωγή του σύνθετου υλικού.
- Υποβολή των αφροποιημένων δοκιμίων σε μηχανικές δοκιμές, προκειμένου να προσδιοριστούν οι μηχανικές τους ιδιότητες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης, Δημήτρης Ι. Παντελής, 2008, *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- [2] Π.Ν. Μπότσαρης, Π.Δ. Σπάρης, 2010, *Στοιχεία Τεχνολογίας Παραγωγής*, Αυτοέκδοση, Ξάνθη.
- [3] William D. Jr. Callister., 2007, *Materials Science and Engineering*, 7th edition, John Wiley & Sons.
- [4] U.S. Congress, Office of Technology Assessment, 1988, *Advanced Materials by Design*, U.S. Government Printing Office, Washington.
- [5] Laughlin D., Hono K., 2014, *Physical Metallurgy*, 5th edition, Elsevier, Amsterdam.
- [6] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson and H.N.G. Wadley, 2000, *Metal Foams: A Design Guide*, Butterworth-Heinemann, Woburn, MA.
- [7] J. Banhart, 2001, 'Manufacture Characterization and Application of cellular metals and metal foams', *Progress in Materials Science*, Volume 46, 559-632.
- [8] L.J. Gibson, M.F. Ashby, 1997, *Cellular solids, structure and properties*, Cambridge University press.
- [9] Stergioudi F., 2011, *Production of porous materials and evaluation of their properties*, Doctoral dissertation, A.U.T.H, Thessaloniki.
- [10] Q.M. Li, I. Magkiriadis, J.J. Harrigan, 2006, 'Compressive strain at the onset of densification of cellular solids', *J Cell Plast*, Volume 42, 371-392.
- [11] M. Avalle; A. Scattina, 2014, *Mechanical properties and impact behavior of a microcellular structural foam*, Politecnico di Torino, 24 – 10129 Torino, Italy.
- [12] Vafai K., 2015, *Handbook of porous media*, 3rd edition, Taylor and Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton.
- [13] H.P. Degischer, B. Kriszt, (Eds), 2002, *Handbook of Cellular Metals: Production, Processing Application*, Wiley-VCH, Germany.

- [14] Q.M. Li, I. Magkiriadis, J.J. Harrigan, 2006, 'Compressive strain at the onset of densification of cellular solids', *Journal of Cellular Plastics*, Volume 42, 371-392.
- [15] D. Talbot, J.Talbot, 1998, *Corrosion Science and Technology*, CRC Press, Florida.
- [16] Koerner C., 2008, *Integral Foam Molding of Light Metals*, Springer-Verlag, Verlag Berlin Heidelberg.
- [17] Francisco García-Moreno, 2016, 'Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production', *Materials*, Volume 9(2), 85.
- [18] Tetsuji Miyoshi, Masao Itoh, Shigeru Akiyama and Akira Kitahara, 2000, 'ALPORAS Aluminum Foam: Production Process, Properties, and Applications', *Advanced engineering materials*, Volume 2, No 4.
- [19] Mancin Simone, Zilio Claudio, Diani Andrea, Rossetto Luisa, 2013, 'Air forced convection through metal foams: Experimental results and modeling', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 62, 112–123.
- [20] D. M. Elzey and H. N. G. Wadley, 2001, 'The limits of solid state foaming', *Acta Materialia*, Volume 49, 849-859.
- [21] Παπαδόπουλος Δ., 2004, 'Μεταλλικοί Αφροί', *Στρατιωτική Επιθεώρηση*, Τεύχος 141, 140-154.
- [22] Τσιλιγκήρ Φ., Μπουμπούν Ο., 2013, *Υλικά και μοντέρνες μέθοδοι κατασκευής πλαισίων Ι.Χ. αυτοκινήτων*, Πτυχιακή Εργασία, Τ.Ε.Ι. Καβάλας, Καβάλα.
- [23] P. Quadbeck , K. Kümmel , R. Hauser , G. Standke , J. Adler , G. Stephani, 2010, 'Open Cell Metal Foams – Application-oriented Structure and Material Selection', *International Conference on Cellular Materials (CellMat)*, Dresden.
- [24] Louis-Philippe Lefebvre, John Banhart, David C. Dunand, 2008, 'Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments', *Advanced Engineering Materials*, Volume 10(9), 775-787.
- [25] R.S. Mishraa, Z.Y. Mab, 2005, 'Friction stir welding and processing', *Materials Science and Engineering*, Volume 50, 1–78.

- [26] B. London, M. Mahoney, B. Bingel, M. Calabrese, D. Waldron, 2001, Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan.
- [27] W.J. Arbegast, in: Z. Jin, A. Beaudoin, T.A. Bieler, B. Radhakrishnan (Eds.), 2003, *Hot Deformation of Aluminum Alloys III*, TMS, Warrendale, PA, USA 313-319.
- [28] P.B. Berbon, W.H. Bingel, R.S. Mishra, C.C. Bampton, M.W. Mahoney, 2001, 'Friction stir processing: a tool to homogenize nanocomposite aluminum alloys', *Scripta Materialia*, Volume 44, 61-75.
- [29] Adem Kurta, Ilyas Uygurb, Eren Cetec, 2011, 'Surface modification of aluminium by friction stir processing', *Materials Processing Technology*, Volume 211, 313–317.
- [30] Byung-Wook AHN, Don-Hyun CHOI, Yong-Hwan KIM, Seung-Boo JUNG, 2012, 'Fabrication of SiCp/AA5083 composite via friction stir welding', *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Volume 22, 634638.
- [31] Y. Morisada, H. Fujii, T. Nagaoka, M. Fukusumi, 2006, 'Effect of friction stir processing with SiC particles on microstructure and hardness of AZ31', *Materials Science and Engineering A*, Volume 433, 50–54.
- [32] T. Utsunomiya, K. Tamura and others, 2010, 'Effects of Tool Rotating Rate and Pass Number on Pore Structure of A6061 Porous Aluminum Fabricated by Using Friction Stir Processing', *Materials Transactions*, Volume 51, 542–547.
- [33] S. Lowell, Joan E. Shields, Martin A. Thomas, Matthias Thommes, 2004, *Characterization of Porous Solids and Powders: Surface Area, Pore Size and Density*, Springer, Dordrecht.