

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

Διπλωματική εργασία:

# Παρασκευή μεταλλικών αφρών με χρήση μεταλλικών κόνεων και αφριστικού παράγοντα

[Production of metallic foams using metallic powders and foaming agent]



<u>Προπτυχιακός φοιτητής:</u>

Αλατάς Μιχαήλ

AM: 02104115

Επιβλέπων:

Δημήτριος Μανωλάκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π., Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

## <u>Ευχαριστίες</u>

Το πειραματικό μέρος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας εκπονήθηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής των Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στα πλαίσια της έρευνας και της μελέτης των ιδιοτήτων και των εφαρμογών των μεταλλικών αφρών.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Δημήτριο Μανωλάκο, Καθηγητή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, για την ανάθεση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, καθώς μου έδωσε με αυτόν τον τρόπο τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον επιστημονικό θέμα, που εξελίσσεται ραγδαία στην εποχή μας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ιωάννη Παπαντωνίου για την άριστη συνεργασία που αναπτύξαμε όλο αυτό το διάστημα εντός και εκτός Εργαστηρίου, για την πολύτιμη καθοδήγησή του σε κομβικά σημεία με τις γνώσεις και τις συμβουλές του, αλλά κυρίως για την ενθάρρυνση και την εμπιστοσύνη που μου παρείχε μέχρι τέλους καθ'όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της Διπλωματικής μου Εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ το προσωπικό του Εργαστηρίου του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών για την πολύτιμη βοήθεια και το καλό κλίμα που μου πρόσφερε απλόχερα κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων και τη χρήση εργαλείων ή μηχανημάτων, τα οποία απαιτούσε η φύση της Διπλωματικής μου Εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου την οικογένειά μου, τους φίλους μου αλλά και την κοπέλα μου, χωρίς την στήριξη και την συμπαράσταση των οποίων δε θα μπορούσα να τελειώσω την συγγραφή της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Σας ευχαριστώ όλους για την υπομονή και το ενδιαφέρον που μου δείξατε στις δύσκολες στιγμές μου αλλά και για την επιμονή σας να γίνω καλύτερος άνθρωπος και καλύτερος μηχανικός.

Αθήνα, Μάρτιος 2016

Αλατάς Μιχαήλ

## <u>Περίληψη</u>

Τα πορώδη μεταλλικά υλικά, ευρέως γνωστά ως μεταλλικοί αφροί, αποτελούν μια νέα κατηγορία μη τοξικών και ανακυκλώσιμων υλικών, τα οποία γνωρίζουν σημαντική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια εξαιτίας των πολύ ενδιαφέροντων και διαφορετικών ιδιοτήτων τους σε σχέση με τα συμβατικά μέταλλα. Βασικό πλεονέκτημα των μεταλλικών αφρών είναι ο άριστος συνδυασμός μηχανικών, θερμικών και ηχομονωτικών ιδιοτήτων τους αναφορικά με το χαμηλό τους βάρος.

Σε διαρκή εξέλιξη βρίσκονται πολλές ερευνητικές προσπάθειες ανά τον κόσμο για την φθηνότερη και πιο τυποποιημένη παραγωγή μεταλλικών αφρών υψηλών προδιαγραφών, λόγω των συνεχώς αυξανόμενων εφαρμογών τους κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροναυπηγική, τη βιομηχανία χημικών προϊόντων, τη βιομηχανία επίπλων και την κατασκευή κτιρίων και οικοδομών.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η παραγωγή μεταλλικών αφρών με τη χρήση κονιομεταλλουργίας και αφριστικού παράγοντα με στόχο την περαιτέρω μελέτη και ανάλυση του πορώδους και της εσωτερικής δομής τους.

Πιο αναλυτικά, στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο ανάμιξη μεταλλικών κόνεων αλουμινίου με τον αφριστικό παράγοντα υδρίδιο του τιτανίου. Οι μεταλλικές κόνεις αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκαν ήταν διαφορετικής κοκκομετρίας και σε συνδυασμό με τον αφριστικό παράγοντα δημιουργήθηκαν διαφορετικά μίγματα, τα οποία συμπιέστηκαν σε μονοαξονική πρέσα. Τα πρόδρομα δοκίμια που παράχθηκαν οδηγήθηκαν στη συνέχεια σε επαγωγικό φούρνο, όπου πραγματοποιήθηκε η αφροποίησή τους κάτω από υψηλές θερμοκρασίες και καταγράφηκε η όλη διαδικασία με τη βοήθεια κάμερας. Έπειτα μελετήθηκαν μέσω των βίντεο οι παράγοντες της θερμοκρασίας αφροποίησης και ο χρόνος παραμονής στο φούρνο με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου εκείνου χρόνου εξόδου κάθε δοκιμίου από τον φούρνο, ώστε να έχει επιτευχθεί η μέγιστη διόγκωσή του και επομένως η μεγαλύτερη τιμή του πορώδους του. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε δεύτερη σειρά πειραμάτων, στην οποία τα δοκίμια εξήλθαν από το φούρνο στο βέλτιστο χρόνο εξόδου, που είχε υπολογιστεί προηγουμένως από την πρώτη σειρά πειραμάτων. Τέλος, για τον υπολογισμό του πορώδους των δοκιμίων βέλτιστου χρόνου, τη μελέτη της εσωτερικής τους μορφολογίας αλλά και την εξαγωγή συμπερασμάτων, λήφθησαν φωτογραφίες από στερεοσκόπιο και αναλύθηκαν με κατάλληλα προγράμματα επεξεργασίας εικόνας.

<u>Λέξεις κλειδιά:</u> Μεταλλικοί αφροί, Κονιομεταλλουργία, Αφριστικός παράγοντας, Θερμοκρασία αφροποίησης, Βέλτιστος χρόνος εξόδου, Πορώδες.

## <u>Abstract</u>

Porous metallic materials, widely known as metal foams, are an innovative category of non-toxic and recyclable materials, which attract a lot of attention in recent years because of their very interesting and different properties compared to conventional metals. A key advantage of metal foams is their excellent combination of mechanical, thermal and sound insulating properties in relation to their low weight.

There is a significant number of ongoing research projects around the world aiming at cheaper and more standardized production of metal foams with high standards, because of their ever-increasing applications mainly in automotive, aerospace, chemical and furniture industry, as well as building and construction.

The subject of this particular thesis is the production of metal foams using powder metallurgy and foaming agent in order to further study and analyze their porosity and internal structure.

More specifically, in the experimental procedure performed in laboratory the mixing of metallic aluminum powder with the titanium hydride foaming agent was realized. Metal powders of different grain size were used, which in combination to the foaming agent created various mixtures, which were compressed in a specific press. The precursor samples produced were led then to a furnace, so as the foaming procedure to take place under high temperatures. The whole process was recorded by camera. Then the foaming temperature and the residence time in the furnace were studied, targeting at finding the optimal residence time in the furnace for each specimen, corresponding to the maximum expansion and therefore the maximum porosity value. Next, another set of experiments was performed, in which the specimens remained in the furnace as long as the optimal residence time dictated, according to the first set of experiments. Finally, pictures of the specimens of optimal residence time were taken by a stereoscope and processed, so as their porosity to be calculated and their internal morphology to be studied.

<u>Keywords:</u> Metal foams, Powder metallurgy, Foaming agent, Foaming temperature, Optimal residence time, Porosity.

## Περιεχόμενα

Ευχαρι	ιστίες.		3
Περίλη	<b>ιψη</b>		4
Abstra	ct		5
КЕФА/	\AIO 1	: Εισαγωγή στα πορώδη μεταλλικά υλικά	. 14
1.1	Γενι	κά	. 14
1.1	1.1	Ορισμός μεταλλικού αφρού	. 16
1.2	Ιστο	ρικά στοιχεία	. 17
1.3	Γενι	κά χαρακτηριστικά	. 19
1.3	3.1	Πλεονεκτήματα	. 20
1.3	3.2	Μειονεκτήματα	. 21
1.3	3.3	Παράγοντες χρήσης	. 21
КЕФА/	\AIO 2	: Τεχνολογίες παραγωγής μεταλλικών αφρών	. 23
2.1	Γενι	κές αρχές μεθόδων παραγωγής μεταλλικών αφρών	. 23
2.2	1.1	Παραγωγή αφρού από τηγμένο μέταλλο	. 23
2.2	1.2	Παραγωγή αφρού από μεταλλικές κόνεις	. 25
2.2	1.3	Παραγωγή αφρού από ατμό ή ιόντα μετάλλων	. 26
2.2	Μέθ	θοδοι χύτευσης	. 26
2.2	2.1	Η τεχνολογία Alcan/Norsk	. 27
2.2	2.2	Η τεχνολογία Alporas	. 27
2.2	2.3	Χύτευση δύο σταδίων - Duocel	. 28
2.2	2.4	Δημιουργία τρισδιάστατης δικτυωτής δομής	. 30
2.2	2.5	Δημιουργία μεταλλικών σπόγγων μεταβλητού πορώδους	. 31
2.3	Κον	ιομεταλλουργία	. 32
2.3	3.1	Διαδικασία αφροποίησης μεταλλικής κόνεως	. 32
2.3	3.2	Τεχνολογία παραγωγής IFAM	. 34
2.3	3.3	Τεχνολογία παραγωγής MEPURA	. 35
2.3	3.4	Παραγωγή αφρού πολύπλοκης μορφής	. 37
2.3	3.5	Παραγωγή αφρού με παγιδευμένο αέριο	. 38
2.3	3.6	Παραγωγή μεταλλικών αφρών με πυροσυσσωμάτωση κόνεων	. 39

2.4	Μέθοδοι εναπόθεσης μετάλλου41						
2.5	Χημική εναπόθεση ατμών (CVD)4						
2.6	Κατεργασίες αφρών	. 45					
ΚΕΦΑΛ	AIO 3: Μέθοδοι χαρακτηρισμού μεταλλικών αφρών	. 48					
3.1	Δομικά χαρακτηριστικά μεταλλικών αφρών						
3.2	Χαρακτηρισμός των κυψελοειδών μεταλλικών υλικών	. 51					
3.3	Μη καταστροφικές μέθοδοι 52						
3.4	Καταστροφικές μέθοδοι5						
ΚΕΦΑΛ	AIO 4: Ιδιότητες και εφαρμογές μεταλλικών αφρών	. 57					
4.1	Γενικά στοιχεία	. 57					
4.2	Μηχανικές ιδιότητες	. 57					
4.2	.1 Συμπίεση και απορρόφηση ενέργειας	599					
4.2	.2 Μέτρο ελαστικότητας	. 62					
4.3	Φυσικές και χημικές ιδιότητες	. 62					
4.4	Εφαρμογές μεταλλικών αφρών	. 63					
4.4	.1 Κριτήρια επιλογής	. 63					
4.4	.2 Κατασκευαστικοί τομείς	. 64					
4.4	.3 Λειτουργικοί τομείς	. 69					
ΚΕΦΑΛ	AIO 5: Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας	. 76					
5.1	Εισαγωγή	. 76					
5.2	Ποσότητες υλικών	. 79					
5.3	Πρόδρομα Δοκίμια	. 82					
5.4	Πειραματικές συνθήκες	. 86					
ΚΕΦΑΛ	AIO 6: Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων	. 88					
6.1	Τελικά δοκίμια	. 88					
6.2	Ανάλυση βίντεο και εύρεση βέλτιστου χρόνου	. 91					
6.2	.1 Μικρογραφίες και διαγράμματα δοκιμίων	. 92					
6.3	Σύγκριση διαγραμμάτων δοκιμίων	101					
6.4	Πειράματα βέλτιστου χρόνου	104					
6.5	Συμπεράσματα1						
6.6	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα11						
Βιβλιογραφία							

## Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1: Εσωτερική άποψη της δομής του τοιχώματος μίσχου
Εικόνα 1.2: Τομή φύλλου15
Εικόνα 1.3: Τομή της εσωτερικής δομής ενός αγκαθιού από σκαντζόχοιρο (Δεξιά σε μεγέθυνση)
Εικόνα 1.4: Χαρακτηριστικό παράδειγμα μεταλλικού αφρού [6]
Εικόνα 1.5: Πατέντα που απονεμήθηκε στον Sosnick (1951) για την παραγωγή «σπογγώδους μετάλλου» [10]17
Εικόνα 1.6: Δομή τύπου σάντουιτς με πυρήνα από αφρό αλουμινίου (Fraunhofer and Studiengesellschaft Stahlanwendungen) [8]19
Εικόνα 2.1: Διαδικασία αντιγραφής πολυμερικού αφρού για την παραγωγή μεταλλικού αφρού [4]
Εικόνα 2.2: Διαδικασία χύτευσης γύρω από σωματίδια για την παραγωγή μεταλλικού αφρού [4]
Εικόνα 2.3: Διαδικασία εναπόθεσης ιόντων για την παραγωγή μεταλλικού αφρού [4] 26
Εικόνα 2.4: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου παραγωγής Alcan/Norsk Hydro [9] 27
Εικόνα 2.5: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου παραγωγής Alporas [9]
Εικόνα 2.6: Μεταλλικός αφρός Duocel με κυψελοειδή ανοικτή δομή [19]
Εικόνα 2.7: Τετραεδρικό πλέγμα με δικτυακή δομή από χύτευση αντικατάστασης του πολυμερικού προτύπου με κράμα χαλκού-βηρυλλίου (Cu-Be2%) [22]
Εικόνα 2.8: Απεικόνιση της μεθόδου παρασκευής μεταλλικών σπόγγων μεταβλητού πορώδους [20]
Εικόνα 2.9: Απεικόνιση της διεπιφάνειας μεταξύ δύο περιοχών διαφορετικού πορώδους [20]
Εικόνα 2.10: Βαθμός ανάπτυξης πόρων αφρού AlSi7 σε κάθε χρονικό σημείο [19]. 34
Εικόνα 2.11: Παραγωγή αφρού αλουμινίου με την τεχνολογία IFAM [9]
Εικόνα 2.12: Παραγωγή αφρού αλουμινίου με την τεχνολογία MEPURA [9]
Εικόνα 2.13: Σωλήνες γεμισμένοι με αφρό αλουμινίου [34]
Εικόνα 2.14: Πολυστρωματικό πάνελ αλουμινίου [34]
Εικόνα 2.15: Πάνελ τύπου σάντουιτς με πυρήνα από αφρό αλουμινίου [34]
Εικόνα 2.16: Παραγωγή τεμαχίων πολύπλοκης μορφής από μεταλλικό αφρό [9] 38
Εικόνα 2.17: Σύνδεση πορώδους πυρήνα με το εξωτερικό φύλλο Ti6All4V [22] 39

Εικόνα 2.18: (Αριστερά) Διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης κόκκων μετάλλου, (Δεξιά) Κοντινή άποψη του σημείου σύνδεσης μεταξύ 2 κόκκων [23]
Εικόνα 2.19: Α) Μεταλλικός αφρός από χαλκό (SEM), Β) Μεταλλικός αφρός από άργυρο, Β) Μεταλλικός αφρός από νικέλιο, Β) Μεταλλικός αφρός από χαλκό (μικρότερη μεγέθυνση)[26]
Εικόνα 2.20: (Αριστερά) Διαπίδυση της πολυουρεθανης από την κυψελίδα νικελίου, (Δεξιά) Τομή αφρού νικελίου με το στάδιο της θέρμανσης [26]
Εικόνα 2.21: Εικόνες SEM από τομές αφρών νικελίου διαφορετικού πορώδους [29] 
Εικόνα 2.22: Σχηματική απεικόνιση δύο διαφορετικών διαδικασιών συγκόλλησης με laser [31]
Εικόνα 2.23: Κοπή δομής σάντουιτς από αφρό αλουμινίου με jet νερού [30] 47
Εικόνα 3.1: Μεταλλικός αφρός κλειστών κυψελών [40]
Εικόνα 3.2: Μεταλλικός αφρός ανοικτών κυψελών [40]
Εικόνα 3.3: Δείγματα αφρών αλουμινίου διαφορετικής πυκνότητας πορώδους με διαβαθμισμένη κλίμακα χιλιοστού [35]
Εικόνα 3.4: Τετράεδρο και δεκάεδρο μιας κυψέλης [35]
Εικόνα 3.5: Ιδανικό τετράεδρο και εξάεδρο μιας κυψέλης [35]
Εικόνα 3.6: Σχηματική απεικόνιση της αρχής του Αρχιμήδη για τη μέτρηση της πυκνότητας [18]
Εικόνα 3.7: 3D εικόνα υψηλής ανάλυσης αφρού ψευδαργύρου [39]
Εικόνα 3.8: Σχηματική αναπαράσταση απορρόφησης ήχου από μεταλλικό αφρό (Αριστερά) και η αντίστοιχη μέτρηση του συντελεστή μείωσης θορύβου συναρτήσει της συχνότητας (Δεξιά) [41]
Εικόνα 4.1: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης μεταλλικών αφρών διαφορετικής πυκνότητας [43]
Εικόνα 4.2: Απεικόνιση απορροφούμενης ενέργειας στο διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης [46]
Εικόνα 4.3: Διάγραμμα δοκιμής συμπίεσης μεταλλικού αφρού [8]
Εικόνα 4.4: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης σε αφρούς αλουμινίου διαφορετικής πυκνότητας και διαφορετικών κραματικών στοιχείων [9]
Εικόνα 4.5: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης για σωλήνες με και χωρίς μεταλλικό αφρό [9]61
Εικόνα 4.6: Συσχέτιση του μέτρου ελαστικότητας με την πυκνότητα του μεταλλικού αφρού [18]

Εικόνα 4.7: Κατηγοριοποίηση εφαρμογών πορώδων υλικών σε σχέση με το είδος της εφαρμογής και το άνοιγμα του πορώδους υλικού [18]
Εικόνα 4.8: Εφαρμογή μεταλλικών αφρών στο αμάξωμα ενός Audi A8 [47]65
Εικόνα 4.9: Πειραματική διάταξη στο NASA Glenn Research Center για την έλεγχο της δυνατότητας μείωσης του θορύβου από το περίβλημα μεταλλικού αφρού [49] 67
Εικόνα 4.10: Διάχυση ενέργειας στους αποσβεστήρες μεταλλικού αφρού [48] 69
Εικόνα 4.11: Φίλτρα από διάφορα είδη μεταλλικών αφρών [11]
Εικόνα 4.12: Χρήση αφρών κραμάτων νικελίου σε ηλεκτρόδια μπαταριών [51] 71
Εικόνα 4.13: Πορώδες υλικό με δυνατότητα απορρόφησης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [52]
Εικόνα 4.14: Οδοντιατρικά εμφυτεύματα από αφρό τιτανίου [53]
Εικόνα 4.15: Σωλήνας θερμότητας με μεταλλικό αφρό για την ενίσχυση της απόδοσής του [57]
Εικόνα 4.16: Καταλύτης από αφρό χαλκού με υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα [59] 74
Εικόνα 5.1: Η σκόνη λεπτόκοκκου αλουμινίου (fine Al) που χρησιμοποιήθηκε 77
Εικόνα 5.2: Η σκόνη χονδρόκοκκου αλουμινίου (coarse Al) που χρησιμοποιήθηκε. 78
Εικόνα 5.3: Οι νιφάδες αλουμινίου (Al flakes) που χρησιμοποιήθηκαν
Εικόνα 5.4: Ο αφριστικός παράγοντας ΤiH₂ που χρησιμοποιήθηκε
Εικόνα 5.5: Η ψηφιακή ζυγαριά του εργαστηρίου80
Εικόνα 5.6: Ο τόρνος του εργαστηρίου στον οποίο πραγματοποιήθηκε η ανάδευση 81
Εικόνα 5.7: Πρέσα κονιομεταλλουργίας 100 τόνων του εργαστηρίου
Εικόνα 5.8: Το μικρόμετρο του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκε
Εικόνα 5.9: Σχηματική απεικόνιση των διαστάσεων του κυλινδρικού δοκιμίου 84
Εικόνα 5.10: Ρυθμιστής θερμοκρασίας επαγωγικού φούρνου Osmund
Εικόνα 5.11: Ο επαγωγικός φούρνος Osmund του εργαστηρίου (αριστερά), Η ταμπέλα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φούρνου (δεξιά)
Εικόνα 5.12: Το πυρίμαχο γυαλί που τοποθετήθηκε στη κεντρική οπή του φούρνου 
Εικόνα 5.13: Η δισκοτόμος του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκε
Εικόνα 6.1: Εσωτερική μορφολογία δοκιμίου 1
Εικόνα 6.2: Εσωτερική μορφολογία δοκιμίου 2

Εικόνα 6.3: Εσωτερική μορφολογία δοκιμίου 3
Εικόνα 6.4: Εσωτερική μορφολογία δοκιμίου 490
Εικόνα 6.5: Εσωτερική μορφολογία δοκιμίου Χ190
Εικόνα 6.6: Εσωτερική μορφολογία δοκιμίου Χ291
Εικόνα 6.7: Μικρογραφίες στιγμιότυπων του δοκιμίου 1 μέσα στο φούρνο
Εικόνα 6.8: Μικρογραφίες στιγμιότυπων του δοκιμίου Χ1 μέσα στο φούρνο94
Εικόνα 6.9: Μικρογραφίες στιγμιότυπων του δοκιμίου 2 μέσα στο φούρνο95
Εικόνα 6.10: Μικρογραφίες στιγμιότυπων του δοκιμίου Χ2 μέσα στο φούρνο 97
Εικόνα 6.11: Μικρογραφίες στιγμιότυπων του δοκιμίου 3 μέσα στο φούρνο 98
Εικόνα 6.12: Μικρογραφίες στιγμιότυπων του δοκιμίου 4 μέσα στο φούρνο - α' μέρος
Εικόνα 6.13: Μικρογραφίες στιγμιότυπων του δοκιμίου 4 μέσα στο φούρνο - β' μέρος
Εικόνα 6.14: Εσωτερική μορφολογία δοκιμίου 5
Εικόνα 6.15: Εσωτερική μορφολογία δοκιμίου 9
Εικόνα 6.16: Ο λειαντήρας του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκε (Αριστερά), Το στερεοσκόπιο Leica MZ6 του εργαστηρίου (Δεξιά)
Εικόνα 6.17: Το δοκίμιο 9 στους 750 °C (Αριστερά), Το δοκίμιο 5 στους 800 °C (Δεξιά)
Εικόνα 6.18: Εσωτερική μορφολογία κυψελίδων δοκιμίου 5
Εικόνα 6.19: Εσωτερική μορφολογία κυψελίδων δοκιμίου 9
Εικόνα 6.20: Στιγμιότυπα επεξεργασίας των δοκιμίων με το πρόγραμμα ImageJ 108
Εικόνα 6.21: Σχηματισμός πολυγώνου στο δοκίμιο 5 με το πρόγραμμα ImageJ 109
Εικόνα 6.22: Σχηματισμός πολυγώνου στο δοκίμιο 9 με το πρόγραμμα ImageJ 109
Εικόνα 6.23: Αφροποίηση της κάτω επιφάνειας του δοκιμίου λόγω αγωγής θερμότητας από τη χαλύβδινη πλάκα του φούρνου

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας	4.1: Ιδ	ιότητες μεταλλικοι	ύ αφρού	Al 99,5	5% που έχει π	παραχθεί με	δύο	
διαφορετικές τεχνολογίες [13]57								
Πίνακας κατασκει	5.1: νάστηκα	Χαρακτηριστικά χν	μεγέθη	των	πρόδρομων	δοκιμίων	που 83	
Πίνακας 5.2: Πειραματικές συνθήκες των 6 πρώτων δοκιμίων στο φούρνο								

## Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 6.1: Συσχέτιση του ανηγμένου εμβαδού με το χρόνο παραμονής στο Διάγραμμα 6.2: Συσχέτιση του ανηγμένου εμβαδού με το χρόνο παραμονής στο φούρνο του δοκιμίου Χ1......95 Διάγραμμα 6.3: Συσχέτιση του ανηγμένου εμβαδού με το χρόνο παραμονής στο Διάγραμμα 6.4: Συσχέτιση του ανηγμένου εμβαδού με το χρόνο παραμονής στο Διάγραμμα 6.5: Συσχέτιση του ανηγμένου εμβαδού με το χρόνο παραμονής στο Διάγραμμα 6.6: Συσχέτιση των καμπυλών των 4 δοκιμίων από fine Al, που Διάγραμμα 6.7: Συσχέτιση των καμπυλών των δοκιμίων 1 και Χ1 διαφορετικού υλικού, που θερμάνθηκαν σε ίδια θερμοκρασία αφροποίησης στο φούρνο...... 102 Διάγραμμα 6.8: Συσχέτιση των καμπυλών των δοκιμίων 2 και Χ2 διαφορετικού υλικού, που θερμάνθηκαν σε ίδια θερμοκρασία αφροποίησης στο φούρνο...... 103 Διάγραμμα 6.9: Ραβδόγραμμα κατανομής εμβαδού πόρων του δοκιμίου 5 ...... 110 Διάγραμμα 6.10: Σύγκριση δοκιμίου 2 (800°C - 10min) και δοκιμίου 5 (800°C -2:53min). Εμφάνιση μεγάλης επιφάνειας κατάρρευσης (drainage) στη βάση του Διάγραμμα 6.11: Ραβδόγραμμα κατανομής εμβαδού πόρων του δοκιμίου 9 ...... 111 Διάγραμμα 6.12: Σύγκριση δοκιμίου 1 (750°C - 10min) και δοκιμίου 9 (750°C -5:16min). Εμφάνιση μεγάλης επιφάνειας κατάρρευσης (drainage) στη βάση του 

## ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή στα πορώδη μεταλλικά υλικά

## 1.1 <u>Γενικά</u>

Η παρουσία οπών ή πόρων στο εσωτερικό ενός υλικού ανέκαθεν θεωρούνταν ελάττωμα και γι' αυτό το λόγο στόχος της μεταλλουργίας ήταν η ανακάλυψη και μελέτη μεθόδων παρασκευής υλικών που θα εξαλείφουν τέτοιες ατέλειες. Αντίθετα με αυτή την άποψη, ο Ashby είχε επισημάνει ότι αρκετά φυσικά υλικά, σε αντίθεση με τα συμβατικά, διαθέτουν πορώδες, συνδυάζοντας στιβαρότητα, υψηλή αντοχή και καλή αναλογία βάρους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι το ξύλο, τα οστά και τα κοράλλια. [1-3]

Τα κύρια στοιχεία της δομής ενός πορώδους υλικού είναι το μέγεθος, το πλήθος, ο τύπος των κελιών και το πορώδες του. Έτσι το μικρό πορώδες σημαίνει ότι η πυκνότητα του πορώδους υλικού πλησιάζει αυτή του μητρικού υλικού, ενώ όσο αυξάνεται το πορώδες μειώνεται η σχετική πυκνότητα. Αυτά τα χαρακτηριστικά της κυψελοειδούς δομής έχουν πραγματική εφαρμογή στην φύση, όπως φαίνονται στις ακόλουθες Εικόνες, επιδεικνύοντας σχεδιαστική τελειότητα και επιτυγχάνοντας ένα βέλτιστο μηχανικό αποτέλεσμα. [3]



Εικόνα 1.1: Εσωτερική άποψη της δομής του τοιχώματος μίσχου

Η Εικόνα 1.1 δείχνει ότι η κυψελοειδής δομή του μίσχου αυξάνει τη στιβαρότητα του φυτού και προσφέρει ένα εκτεταμένο δίκτυο αγωγών τροφοδοσίας.



Εικόνα 1.2: Τομή φύλλου

Η Εικόνα 1.2 δείχνει την εσωτερική δομή, που προσφέρει υψηλό λόγο επιφάνειας / βάρους, έτσι ώστε το φυτό να χρησιμοποιεί τη μέγιστη επιφάνεια για φωτοσύνθεση.



Εικόνα 1.3: Τομή της εσωτερικής δομής ενός αγκαθιού από σκαντζόχοιρο (Δεξιά σε μεγέθυνση)

Η Εικόνα 1.3 δείχνει τη συγκεκριμένη δομή, η οποία προσφέρει αντοχή και λειτουργεί ως εναλλάκτης θερμότητας για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του ζώου.

Τα κελιά μπορούν να είναι (α) ανοικτού τύπου, ή (β) κλειστού τύπου. Στο πορώδες υλικό ανοικτού τύπου, κάθε κελί ενώνεται με τα γειτονικά του και το υλικό απαρτίζει το πλαίσιο κάθε κελιού. Για πορώδες κλειστού τύπου, κάθε κελί είναι κλειστό και δε συνδέεται με τα γειτονικά του, δηλαδή το υλικό βρίσκεται και στο πλαίσιο και στις πλευρές κάθε κελιού. Αυτά διαφέρουν όχι μόνο στον τρόπο παραγωγής, αλλά και στις ιδιότητες που έχουν καθώς και στις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται. [2, 17]

Από την προηγούμενη δεκαετία, τα πορώδη μεταλλικά υλικά κέντρισαν το ενδιαφέρον των επιστημόνων ήδη με την έρευνα και την κατασκευή υλικών με μικρό ή μεγάλο πορώδες. Από την άλλη πλευρά, τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί ιδιαίτερα το ενδιαφέρον για τους μεταλλικούς αφρούς. Ο κυριότερος λόγος για την αύξηση της έρευνας στον τομέα είναι κυρίως για εφαρμογές, όπου υπάρχει απαίτηση μικρού βάρους υλικών. [7]

### 1.1.1 Ορισμός μεταλλικού αφρού

Με τον όρο «μεταλλικός αφρός» νοείται ένας στερεός αφρός, ο οποίος είναι υποκατηγορία της ευρύτερης οικογένειας των πορώδων υλικών. Σύμφωνα με τον Banhart [4], ο όρος αφρός χαρακτηρίζει τη διάχυση αερίου σε υγρό. Αυτή η μορφολογία μπορεί κατόπιν να διατηρηθεί με την ταχεία στερεοποίηση του υγρού, λαμβάνοντας έτσι τον «στερεό αφρό». Ως αφροί, μεταλλικοί ή κεραμικοί, χαρακτηρίζονται τα πορώδη υλικά με μεγάλο πορώδες, συνήθως της τάξης του 65-95%. Κλειδί στην εξέλιξη της έρευνας των πορωδών υλικών και κατ' επέκταση των αφρών είναι η εύρεση τεχνικών για τον έλεγχο του ποσοστού του πορώδους και του μεγέθους των κελιών κατά την παρασκευή τους. [5]

Οι μεταλλικοί αφροί διατηρούν κάποιες από τις ιδιότητες του μητρικού υλικού, όμως η πυκνότητα τους είναι κατά πολύ μικρότερη, ενώ άλλες ιδιότητες διαφέρουν ανάλογα και με το μέγεθος του πορώδους. Οι μεταλλικοί αφροί έχουν χαρακτηριστικές ιδιότητες όπως χαμηλό βάρος, ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και ήχου, ενώ επίσης είναι άφλεκτοι. [3-5]



Εικόνα 1.4: Χαρακτηριστικό παράδειγμα μεταλλικού αφρού [6]

## 1.2 Ιστορικά στοιχεία

Ο Benjamin Sosnicki υπήρξε από τους πρωτοπόρους στην παραγωγή μεταλλικών αφρών στα τέλη της δεκαετίας του '40. Η πατέντα του αφορούσε την παραγωγή «σπογγώδους μετάλλου» (foamlike metal), η οποία του απονεμήθηκε το 1951 (Εικόνα 1.5). Η παρασκευή του βασιζόταν στην εξάχνωση στοιχείων με χαμηλό σημείο τήξης μέσα σε μεταλλική μήτρα. [10]

Patented May 15, 1951

2,553,016

## UNITED STATES PATENT OFFICE

2,553,016 FOAMLIKE METAL Benjamin Sosnick, San Francisco, Calif. No Drawing. Application December 26, 1947, Serial No. 794,087 4 Claims. (Cl. 148—31)

Εικόνα 1.5: Πατέντα που απονεμήθηκε στον Sosnick (1951) για την παραγωγή «σπογγώδους μετάλλου» [10]

Συγκεκριμένα, η παρασκευή βασιζόταν στη μεγάλη διαφορά στο σημείο βρασμού που έχουν οι διαφορετικές φάσεις ορισμένων κραμάτων και άρα η τήξη και ο βρασμός της μιας φάσης μπορεί να γίνει ανεξάρτητα από την άλλη. Αρχικά απαιτείται ένα πολυφασικό κράμα, το οποίο πρέπει να έχει τέτοια σύσταση, ώστε όταν θερμαίνεται, το ένα συστατικό να βράζει, ενώ το άλλο να έχει μόλις ξεκινήσει να τήκεται.

Πρόκειται για διαδικασία υψηλής πίεσης, καθώς όσο διαρκεί η θέρμανση πρέπει το κράμα να βρίσκεται μέσα σε αυτόκλειστο. Αυτό είναι απαραίτητο ώστε το μέταλλο που έχει ξεκινήσει να βράζει και βρίσκεται στην αέρια φάση να μην μπορεί να φύγει από το υγρό μέταλλο. Αν μειωθεί η πίεση, προκαλείται ξαφνικός βρασμός του κράματος. Αν στη συνέχεια ψυχθεί, παράγεται ένα στερεό γεμάτο με κλειστούς πόρους, λόγω του αέριου συστατικού που έχει εγκλωβιστεί. Το νέο αυτό υλικό είναι πολύ πιο ανθεκτικό, ενώ παράλληλα έχει και βελτιωμένες θερμομονωτικές και ηχομονωτικές ιδιότητες.

Για να είναι εφικτή η τεχνική αυτή, πρέπει το σημείο βρασμού της μιας από τις φάσεις να είναι πολύ χαμηλό. Αυτό συμβαίνει όταν το κράμα περιλαμβάνει στη σύστασή του ψευδάργυρο, κάδμιο ή υδράργυρο. Δεν χρησιμοποιήθηκε όμως ποτέ, καθώς παρήγαγε μικρή ποσότητα, ήταν αρκετά ακριβή και περιείχε επικίνδυνα μέταλλα. [10-12] Προς το τέλος της δεκαετίας του '50 έγινε η πρώτη προσπάθεια παραγωγής μεταλλικών αφρών με ανοιχτούς πόρους, όπου πολύ σημαντικές καινοτομίες στην παραγωγή τους σημειώθηκαν από την ερευνητική ομάδα της εταιρίας United Aircraft Corporation. Η νέα αυτή μέθοδος παραγωγής περιελάμβανε ανάμιξη του κονιοποιημένου μετάλλου με μια σκόνη που χρησίμευε στην παραγωγή αερίων. Η επιλογή του υλικού για την παραγωγή ικανής ποσότητας αερίου πρέπει να γίνει προσεκτικά ώστε να έχει παραπλήσια θερμοκρασία αποσύνθεσης με την αντίστοιχη θερμοκρασία τήξης του μετάλλου. [10-12]

Το πρόβλημα που ανέκυπτε από την εν λόγω διαδικασία αφορούσε την ψύξη του αφρού. Οι Hardy και Peisker (1962) παρουσίασαν μια καινούργια μέθοδο, στην οποία προσέθεταν κατευθείαν τον αφριστικό παράγοντα στο τήγμα του μετάλλου. Επρόκειτο για μια οικονομικότερη μέθοδο, καθώς ήταν πολύ πιο φθηνή από την προαναφερθείσα με το κονιοποιημένο μέταλλο. Σε γενικές γραμμές όμως η παραγωγή των μεταλλικών αφρών ήταν αρκετά δαπανηρή, μη αξιόπιστη και γινόταν περισσότερο στα εργαστήρια των Πανεπιστημίων για εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Τα επόμενα χρόνια πραγματοποιήθηκε περαιτέρω έρευνα που οδήγησε σε νέες δημοσιεύσεις και ευρεσιτεχνίες, χωρίς όμως να παρουσιαστεί μεγάλη πρόοδος. Τη δεκαετία του 1990 παρουσιάστηκε σημαντική ανάπτυξη στον τομέα των ελαφρών κατασκευών, με τη βοήθεια ευρωπαϊκών προγραμμάτων (EFG, InnoZelmet, LISA, MURI, ULMA), ενώ εμφανίστηκαν εταιρίες που επιθυμούσαν να αναλάβουν την εμπορική εκμετάλλευση των νέων υλικών. Η ύπαρξη τεχνογνωσίας σχετικά με την παραγωγή σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας (MMC) έδωσε ώθηση στην ανάπτυξη και των νέων αυτών υλικών, καθώς η συμπεριφορά τους υπακούει στους ίδιους νόμους και διέπεται από τους ίδιους περιορισμούς. [10-12]

Από τη δεκαετία του '90 ως σήμερα οι μεταλλικοί αφροί έχουν βρει αρκετές εφαρμογές και πλέον απαιτείται παραπάνω ανάπτυξη στον τομέα των πορωδών υλικών. Σε παγκόσμιο επίπεδο υπάρχουν διάφορες εταιρίες, που προσφέρουν προϊόντα από αφρούς κατασκευασμένους μέσω τήξης. Όμως, λόγω του ότι η παραγωγή ενός τέτοιου αφρού με υψηλές προδιαγραφές ποιότητας είναι αρκετά δαπανηρή, η αγορά μεταλλικών αφρών είναι αρκετά περιορισμένη.

Σήμερα σχεδόν όλη η έρευνα επικεντρώνεται στους αφρούς αλουμινίου, λόγω της χαμηλής πυκνότητας, της αντοχής σε διάβρωση και του χαμηλού σημείου τήξης, το οποίο τους δίνει υψηλή κατεργασιμότητα. Παρ' όλα αυτά, άλλα χρησιμοποιούμενα υλικά για την παραγωγή αφρών είναι ο σίδηρος, το νικέλιο και ο μόλυβδος. Πιο ειδικά, οι αφροί του νικελίου χρησιμοποιούνται σαν χημικά φίλτρα, ενώ οι άλλοι λόγω της χαμηλής τους ποιότητας απασχολούν πιο πολύ σε ερευνητικό επίπεδο. [13]

## 1.3 Γενικά χαρακτηριστικά

Γενικά, τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για να φτιαχτούν δομές μεταλλικών αφρών, οι οποίες όμως δεν βρήκαν εφαρμογή λόγω του υψηλού κόστους. Επίσης, ένα άλλο πρόβλημα ήταν το γεγονός ότι δεν μπορούσε να γίνει επιτυχής αναπαραγωγή των ιδιοτήτων των εν λόγω δομών. Αυτό μπορεί να οφειλόταν παραδείγματος χάριν στη χαμηλή αφριστικότητα του λιωμένου μετάλλου, στη μεγάλη διασπορά, στο μέγεθος των πόρων ή στη συρρίκνωση κατά την στερεοποίηση. Μετά από εκτεταμένη έρευνα, ανακαλύφθηκαν καινούργιες τεχνολογίες παραγωγής μεταλλικών αφρών οι οποίες έχουν μειώσει στο ελάχιστο ή έχουν εξαλείψει αυτά τα προβλήματα, με αποτέλεσμα την παραγωγή αφρών υψηλής ποιότητας. [14]

Αν και τα πορώδη μεταλλικά υλικά είναι μια αναπτυσσόμενη και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, προς το παρόν η παραγωγή των μεταλλικών αφρών είναι σχετικά περιορισμένη. Λίγες είναι οι εταιρίες ανά τον κόσμο που εμπλέκονται στην παραγωγή τους και για εξειδικευμένες χρήσεις. [9]

Υπάρχουν φυσικά πολλές εφαρμογές, στις οποίες χρησιμοποιούνται οι μεταλλικοί αφροί, όπως στη μηχανολογία, στις κατασκευές, στις οικοδομές, στις οικιακές συσκευές και στην βιομηχανία των χημικών. Πιο εξέχουσα εφαρμογή είναι η ενσωμάτωσή τους στο εσωτερικό στρώμα δομών τύπου σάντουιτς, που χρησιμοποιούνται σε κατασκευαστικές εφαρμογές (Εικόνα 1.6), όπου η μείωση του βάρους είναι ο απώτερος στόχος, όπως στην αεροναυπηγική.



Εικόνα 1.6: Δομή τύπου σάντουιτς με πυρήνα από αφρό αλουμινίου (Fraunhofer and Studiengesellschaft Stahlanwendungen) [8]

Η Εικόνα 1.6 παρουσιάζει ένα πλαίσιο με δομή τύπου σάντουιτς, όπου ο πυρήνας είναι αφρός αλουμινίου, με πάχος 12 mm, ενώ η επιφάνεια είναι 2 φύλλα χάλυβα.

Στην αυτοκινητοβιομηχανία εκμεταλλεύονται την εκπληκτική δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας των μεταλλικών αφρών στους προφυλακτήρες, καθώς μεγάλο ποσοστό της ενέργειας της πρόσκρουσης μετατρέπεται σε πλαστικό έργο κατά την παραμόρφωση του αφρού. [9]

Αξιοσημείωτες εφαρμογές είναι η χρήση τους ως φίλτρα, ως εναλλάκτες θερμότητας, ως απορροφητές ενέργειας στην καταπόνηση σωλήνων και ως απορροφητές ήχου. Ακόμη μελετάται η εφαρμογή τους στην ιατρική ως εμφυτεύματα σε οστά. Προς το παρόν οι αφροί αλουμινίου παράγονται από λίγες εταιρίες ανά τον κόσμο, σε μικρή κλίμακα και για συγκεκριμένες εφαρμογές. [8]

Επίσης, μπορεί να γίνει μια κατηγοριοποίηση των μεταλλικών αφρών ανάλογα με:

- τη σχετική πυκνότητά τους
- την τοπολογία των κυψελών, δηλαδή τον τύπο των κελιών (ανοιχτό ή κλειστό), το μέγεθος και το σχήμα τους
- τις ιδιότητες του μεταλλικού υλικού που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του αφρού

## 1.3.1 Πλεονεκτήματα

Το ευρύ φάσμα των εφαρμογών οφείλεται στα πλεονεκτήματα των πορωδών μεταλλικών υλικών που βασίζονται στο υλικό τους (μπορεί να είναι καθαρό μέταλλο ή κράμα). Ορισμένα από αυτά είναι η υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κατά την κρούση ή την συμπίεση, ανεξάρτητα από την φορά της φόρτισης. Ο εξαιρετικός συνδυασμός μηχανικών ιδιοτήτων (κυρίως αντοχή και ακαμψία) και χαμηλού βάρους είναι εξίσου σημαντικά προτερήματα. Επιπρόσθετα, είναι πολύ αποτελεσματικά στην απορρόφηση ταλαντώσεων, ήχου και ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. [5-8]

Υπάρχουν πολλές βασικές αρχές που έχουν προταθεί για το χαρακτηρισμό και τη μοντελοποίηση αυτής της σχέσης. Αυτές, που είχαν αρχικά αναπτυχθεί για τα πολυμερή, βασίζονται στη σχετική πυκνότητα του αφρού και γι αυτό προϋποθέτουν ομοιόμορφη κατανομή των κυψελίδων, τουλάχιστον σε μακροσκοπικό επίπεδο. Όμως, οι μεταλλικοί αφροί διαφέρουν σε σημαντικό βαθμό από τους πολυμερικούς, μιας και οι τελευταίοι συνήθως έχουν κανονική δομή, σε αντίθεση με τους μεταλλικούς που είναι «ακατάστατοι» και παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία μεγέθους και σχήματος κελιών. Επίσης, υπάρχουν πολλές ατέλειες στη δομή, όπως ρωγμές ή οπές ή αυλακώσεις στους τοίχους των κυψελίδων. Τα στοιχεία αυτά μπορούν να αποδοθούν στις σημαντικά υψηλότερες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της κατασκευής τους εν αντιθέσει με τους πολυμερικούς αφρούς. [15] Κατασκευάζοντας έναν αφρό από μέταλλο, σε αντίθεση με τα πολυμερή, αυξάνεται η ακαμψία, διευρύνεται η θερμοκρασία λειτουργίας και μεγαλώνει η αντίσταση σε πολλές διαλυτικές ουσίες και στη φωτιά. Από την άλλη, σε σύγκριση με τους κεραμικούς αφρούς, εμφανίζονται βελτιωμένα αποτελέσματα σε σχέση με την ανθεκτικότητα και την αντοχή σε κόπωση, την θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, καθώς και την (καλύτερη) ικανότητα μορφοποίησης. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι είναι πλήρως ανακυκλώσιμα υλικά, χωρίς να εμφανίζεται μόλυνση ή κατασπατάληση, ένα σημείο το οποίο δεν μπορεί να αγνοηθεί, καθώς η παραγωγή, η χρήση και η διάθεση νέων προηγμένων υλικών συχνά έχει αρνητικές επιδράσεις κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. [14-16]

## 1.3.2 Μειονεκτήματα

Ορισμένα από τα κύρια μειονεκτήματα των μεταλλικών αφρών είναι:

- Το υψηλό κόστος παραγωγής τους
- Η χρονοβόρα διαδικασία παραγωγής τους
- Η δυσκολία αναπαραγωγής αφρών συγκεκριμένης δομής και ιδιοτήτων
- Δυσκολία της μαζικής παραγωγή τους

Παρόλα τα εμπόδια, τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί νέες μέθοδοι οι οποίες έχουν μειώσει στο ελάχιστο ή έχουν εξαλείψει τα προαναφερθέντα προβλήματα, οδηγώντας σε παραγωγή μεταλλικών αφρών υψηλής ποιότητας. Αυτές οι μέθοδοι στρέφονται σε απλές διαδικασίες παραγωγής με χαμηλό κόστος και είναι φιλικές προς το περιβάλλον χρησιμοποιώντας συμβατικά υλικά. [3, 12]

#### 1.3.3 Παράγοντες χρήσης

Σήμερα, όχι μόνο οι μεταλλικοί αφροί, αλλά και τα πορώδη μεταλλικά υλικά γενικότερα, δοκιμάζονται και υιοθετούνται σε ένα συνεχώς αυξανόμενο πεδίο εφαρμογών. Η χρήση των μεταλλικών αφρών εξαρτάται από ορισμένους παράγοντες, οι οποίοι συνοψίζονται ως εξής: [13, 18]

 (i) <u>Μορφολογία</u>: Τύπος του πορώδους (π.χ. ανοικτό ή κλειστό), πυκνότητα του πορώδους, επιθυμητό μέγεθος πόρων, απαίτηση σε συνολική εσωτερική επιφάνεια του κυψελοειδές υλικού. (ii) <u>Μεταλλουργία</u>: Υγρής
κατάστασης ή
Κονιομεταλλουργία. [7]



- (ii) <u>Παραγωγική διαδικασία</u>: Δυνατότητα για μορφοποίηση του αφρού ή του πορώδους υλικού για κατασκευή εξαρτημάτων ή σύνθετων διατομών (profiles).
- (iv) <u>Οικονομοτεχνική μελέτη</u>: Ρυθμός και κόστος παραγωγής, ανταγωνιστικά υλικά, καταλληλότητα υλικού για μεγάλου όγκου κατασκευές.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: <u>Τεχνολογίες παραγωγής μεταλλικών</u> <u>αφρών</u>

### 2.1 Γενικές αρχές μεθόδων παραγωγής μεταλλικών αφρών

Ένας μεταλλικός αφρός μπορεί να παραχθεί με τη βοήθεια πολλών μεθόδων. Ανάλογα με τη μέθοδο, το μέταλλο πρέπει να βρίσκεται αρχικά είτε σε υγρή μορφή, είτε σε κονιορτοποιημένη μορφή, είτε μπορεί να απαιτείται ηλεκτρολύτης που περιέχει ιόντα μετάλλου. Δεν είναι όλες οι τεχνικές κατάλληλες για όλα τα μέταλλα, ενώ και ο αφρός που προκύπτει από κάθε μέταλλο παρουσιάζει διαφορετική μορφολογία και πυκνότητα.[4]

Ο Banhart χωρίζει όλες τις μεθόδους σε τέσσερις γενικές κατηγορίες, ανάλογα με την αρχική κατάσταση του μετάλλου που πρόκειται να υποστεί την επεξεργασία: [4]

- από τηγμένο μέταλλο
- από μέταλλο σε μορφή σκόνης
- από ατμό μετάλλων ή από αέριο μεταλλικό μίγμα
- από διαλύματα μεταλλικών ιόντων.

## 2.1.1 Παραγωγή αφρού από τηγμένο μέταλλο

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν όλες οι μέθοδοι, είτε βιομηχανικές είτε σε ερευνητικό επίπεδο, οι οποίες οδηγούν στην παραγωγή ενός μεταλλικού αφρού μέσω χύτευσης του υγρού μετάλλου και περαιτέρω επεξεργασίας. Η αφροποίηση μπορεί να γίνει είτε με έναν αφριστικό παράγοντα είτε χρησιμοποιώντας έναν πολυμερικό αφρό, είτε με χύτευση γύρω από στερεά σωματίδια, τα οποία στο τέλος απομακρύνονται και δημιουργούν τα κελιά του μεταλλικού αφρού. [4,5]

Η αφροποίηση ενός μετάλλου μπορεί να γίνει με την έγχυση ενός αερίου στο τηγμένο μέταλλο. Το ιξώδες του υγρού μετάλλου πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο, ώστε το τήγμα να παρασύρεται προς την επιφάνεια μαζί με το αέριο, το οποίο τείνει να ανέβει προς τα επάνω λόγω των ανωστικών δυνάμεων. Έτσι δημιουργούνται πόροι, το τμήμα που αφροποιείται ανεβαίνει στην επιφάνεια και απομακρύνεται με κατάλληλο τρόπο. Αν αφροποιηθεί όλη η μάζα του μετάλλου, το υλικό ψύχεται ώστε να στερεοποιηθεί, πριν διαφύγει το αέριο. Η αφροποίηση μπορεί να γίνει επίσης με την προσθήκη ενός αφριστικού παράγοντα αντί για αέριο. Ο αφριστικός παράγοντας σε κατάλληλη θερμοκρασία αντιδρά και εκλύει αέριο, το οποίο προκαλεί την αφροποίηση. [4,5] Ο έμμεσος τρόπος αφροποίησης βασίζεται στην αντιγραφή της μορφής ενός πολυμερικού αφρού, ο οποίος λειτουργεί ως πρότυπο για τον μεταλλικό αφρό. Υπάρχουν διάφορες γεωμετρίες πολυμερικών αφρών ανοικτού τύπου με διάφορες γεωμετρίες. Οι πόροι του πολυμερικού αφρού πληρώνονται με υλικό, το οποίο είναι ανθεκτικό στις υψηλές θερμοκρασίες. Το υλικό ψύχεται και στερεοποιείται και στη συνέχεια αφαιρείται η πολυμερική μήτρα. Τα κενά που μένουν μετά την αφαίρεση του πολυμερικού υλικού, πληρώνονται από το τήγμα που μετάλλου προς αφροποίηση, συνήθως υπό πίεση, το οποίο στη συνέχεια ψύχεται και στερεοποιείται. Μετά την αφαίρεση του καλουπιού προκύπτει ο μεταλλικός αφρός, ο οποίος έχει την ίδια ακριβώς μορφή με τον αρχικό πολυμερικό αφρό. Εποπτικά η διαδικασία παραγωγής του μεταλλικού αφρού από την μήτρα του πολυμερικού αφρού παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Διαδικασία αντιγραφής πολυμερικού αφρού για την παραγωγή μεταλλικού αφρού [4]

Ένας ακόμη τρόπος παραγωγής μεταλλικού αφρού είναι η χύτευση του μετάλλου γύρω από σωματίδια με μορφή κόκκων. Τα σωματίδια αυτά πρέπει να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά να είναι υδατοδιαλυτά και αφαιρώντας τα, να προκύπτει ο ζητούμενος μεταλλικός αφρός. Στη διαδικασία αυτή μπορεί να δημιουργηθεί πρόβλημα λόγω της επιφανειακής τάσης μεταξύ του υγρού μετάλλου και των κόκκων. Η χύτευση διευκολύνεται δημιουργώντας κενό ή ασκώντας πίεση. Η διαδικασία της χύτευσης γύρω από σφαίρες σωματιδίων παρουσιάζεται εποπτικά στην Εικόνα 2.2. [4]



Εικόνα 2.2: Διαδικασία χύτευσης γύρω από σωματίδια για την παραγωγή μεταλλικού αφρού [4]

## 2.1.2 Παραγωγή αφρού από μεταλλικές κόνεις

Στις μεθόδους που ανήκουν στη συγκεκριμένη κατηγορία, το μέταλλο από το οποίο θα προκύψει ο μεταλλικός αφρός βρίσκεται σε μορφή σκόνης, δηλαδή σε στερεή κατάσταση και παραμένει στην κατάσταση αυτή σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Στις συγκεκριμένες τεχνικές το μέταλλο δεν μεταπίπτει ποτέ στην υγρή φάση. Ορισμένες μέθοδοι είναι παρόμοιες με την περίπτωση της χρήσης τηγμένου μετάλλου.

Ένας τρόπος παραγωγής του μεταλλικού αφρού είναι η απευθείας πυροσυσσωμάτωση της σκόνης του μετάλλου. Η τεχνική αυτή οδηγεί σε αφρό με πορώδες 20%-50%. Αν πρέπει να αυξηθεί το πορώδες, συνήθως χρησιμοποιείται υλικό που καταλαμβάνει το χώρο μεταξύ των κόκκων του μετάλλου και το οποίο στη συνέχεια εξατμίζεται κατά την πυροσυσσωμάτωση [19]. Μια διαφορετική μέθοδος βασίζεται στη συμπίεση της σκόνης του μετάλλου και στη συνέχεια στη διοχέτευση ενός αερίου, το οποίο όμως πρέπει να εισχωρήσει μέσα στο συμπαγές υλικό. Το υλικό θερμαίνεται και το μέταλλο διογκώνεται λόγω της πίεσης που του ασκείται από το αέριο που έχει εισχωρήσει στο εσωτερικό του. Και η μέθοδος αυτή δεν οδηγεί σε ιδιαίτερα υψηλή τιμή πορώδους, φτάνοντας έως 50% [20]. Και στην περίπτωση της χρήσης σκόνης μετάλλου μπορεί να προστεθεί ένας αφροποιητικός παράγοντας, όπως περιγράφηκε και στην περίπτωση του τηγμένου μετάλλου. Είναι σημαντική πάντως η σταθεροποίηση του μίγματος κατά την εκτόνωσή του, αν εφαρμοσθεί η συγκεκριμένη τεχνική [21].

## 2.1.3 Παραγωγή αφρού από ατμό ή ιόντα μετάλλων

Στην περίπτωση αυτή παράγεται ο μεταλλικός ατμός σε θάλαμο κενού π.χ. με τη χρήση ηλεκτρικού τόξου. Στη συνέχεια ο ατμός αυτός συμπυκνώνεται στην επιφάνεια ενός στερεού υλικού, συνήθως πολυμερικού, δημιουργώντας ένα στρώμα, το πάχος του οποίου εξαρτάται από το χρόνο εναπόθεσης και την πυκνότητα του μετάλλου. Το στρώμα ψύχεται και στερεοποιείται ώστε να μπορεί να αφαιρεθεί το πολυμερές μέσω θερμικής ή χημικής επεξεργασίας. Το υλικό που απομένει υφίσταται πυροσυσσωμάτωση, ώστε να ενισχυθούν οι δεσμοί μεταξύ των πόρων. [4]

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στη μέθοδο εναπόθεσης ιόντων μετάλλου πάνω σε μια πρόδρομη πολυμερική δομή, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.3.



Εικόνα 2.3: Διαδικασία εναπόθεσης ιόντων για την παραγωγή μεταλλικού αφρού [4]

## 2.2 Μέθοδοι χύτευσης

Για να παραχθεί ένας μεταλλικός αφρός, το αρχικό μέταλλο που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να είναι είτε σε υγρή μορφή είτε σε μορφή πούδρας. Οι αφροί μεταλλικών τηγμάτων, όπως ονομάζονται όσοι προέρχονται από μέταλλο σε υγρή μορφή, απαιτούν αρχικά την τήξη του μετάλλου που πρόκειται να αφροποιηθεί.

### 2.2.1 Η τεχνολογία Alcan/Norsk

Η τεχνολογία Alcan/Norsk βασίζεται στα ακόλουθα βήματα. Αρχικά στο υγρό μέταλλο προστίθεται Al, SiC ή  $Al_2O_3$  σε ποσοστό 10%-15% ώστε να αυξηθεί το ιξώδες του τήγματος. Το επόμενο στάδιο είναι η προσθήκη ενός αερίου, αζώτου ή αργού, αναδεύοντας συνεχώς το τήγμα με περιστρεφόμενη προπέλα. Το επιπλέον υγρό πρέπει να απομακρύνεται από την επιφάνεια του παραγόμενου υλικού. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να παραχθεί φύλλο μεταλλικού αφρού με πορώδες 80%-97%.[9]



Εικόνα 2.4: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου παραγωγής Alcan/Norsk Hydro [9]

#### 2.2.2 Η τεχνολογία Alporas

Η τεχνολογία Alporas της ιαπωνικής εταιρίας Shinko Wire αποτελείται από τα ακόλουθα στάδια. Στο υγρό αλουμίνιο προστίθεται ασβέστιο σε ποσοστό 1,5% στους 680°C ώστε να αυξηθεί το ιξώδες και στη συνέχεια το τήγμα αναδεύεται για 6 min σε κανονικό περιβάλλον. Το πυκνότερο τήγμα που έχει προκύψει μεταγγίζεται σε καλούπι χύτευσης, στο οποίο αναδεύεται με περιστρεφόμενη προπέλα ενώ προστίθεται και υδρίδιο του τιτανίου (TiH<sub>2</sub>) ως αφριστικός παράγοντας. Λόγω της θερμοκρασίας προκαλείται αποσύνθεση του TiH<sub>2</sub> και έκλυση αερίου υδρογόνου. Έτσι ο αφρός διαστέλλεται και πληρώνει το καλούπι χύτευσης μέσα σε διάστημα 15 min. Στη συνέχεια ακολουθεί ψύξη του αφρού μέσω ανεμιστήρων, ώστε να στερεοποιηθεί και να προκύψουν χελώνες αφρού με πορώδες 89%-93%. Οι παραγόμενες χελώνες αφρού έχουν διαστάσεις της τάξης του mm<sup>2</sup> και το βάρος τους είναι 160 kg. Τέλος, η χελώνα αφρού μπορεί να κοπεί σε φύλλα επιθυμητού πάχους. [9]



Εικόνα 2.5: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου παραγωγής Alporas [9]

Υπάρχουν και άλλες τεχνολογίες παραγωγής αφρών αλουμινίου από τηγμένο μέταλλο. Μια από αυτές είναι η τεχνολογία GASAR, η οποία στηρίζεται στη μεταβολή της διαλυτότητας του υδρογόνου με την πίεση. Συγκεκριμένα με την αύξηση της πίεσης αυξάνεται και η διαλυτότητα του υδρογόνου στο τήγμα. Η τήξη του μετάλλου γίνεται μέσα σε αυτόκλειστο και στη συνέχεια, αφού αυξηθεί το ποσοστό του υδρογόνου λόγω της αύξησης της πίεσης, το τήγμα μεταγγίζεται σε καλούπι που είναι επίσης μέσα στο αυτόκλειστο. Εν συνεχεία η πίεση μειώνεται ώστε να γίνει κατευθυνόμενη στερεοποίηση, με αποτέλεσμα το υδρογόνο να παγιδευτεί στο μέτωπο στερεοποίησης σε μακρόστενους πόρους. Η διαδικασία αυτή οδηγεί σε παραγωγή αφρού με χαμηλό πορώδες, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 5%-75%. [9, 19]

Εφαρμόζονται επίσης και άλλες μέθοδοι, κατά τις οποίες παράγεται μεταλλικός αφρός ίδιος με μια αρχική δομή. Χρησιμοποιείται αρχικά δικτυωμένος αφρός πολυουρεθάνης, ο οποίος βυθίζεται σε θερμοανθεκτικό υλικό, ώστε να δημιουργηθεί το καλούπι. Ύστερα από ξήρανση, αφαιρείται ο αφρός της πολυουρεθάνης και στο καλούπι που προκύπτει εκχύνεται το χυτό μέταλλο. Στη συνέχεια, ο παραγόμενος μεταλλικός αφρός αφαιρείται από το καλούπι με τη χρήση νερού υπό πίεση. Το πορώδες του παραγόμενου αφρού, ο οποίος στην περίπτωση αυτή είναι αφρός με ανοικτούς πόρους, είναι 80% ως 97%. Αφρός μπορεί να παραχθεί επίσης αν το τήγμα εκχυθεί σε όγκο πληρωτικού υλικού που έχει τη μορφή ανόργανων κόκκων ή κούφιων σφαιρών. [9, 19]

#### 2.2.3 Χύτευση δύο σταδίων - Duocel

Η μέθοδος αυτή εφαρμόσθηκε πρώτη φορά το 1968 από την εταιρία Energy Research and Generation (E.R.G.) στις Η.Π.Α. και φέρει την εμπορική ονομασία Duocel. Τα στάδια για την παραγωγή κυψελοειδών μετάλλου ανοικτής δομής είναι τα ακόλουθα: [19]

- Δημιουργία πολυμερικού αφρού στη μορφή που επιθυμείται να έχει ο τελικός μεταλλικός αφρός
- Χύτευση μίγματος κεραμικών υλικών, όπως μουλίτης, φαινολική ρητίνη, ανθρακικό ασβέστιο, ώστε να καλύψει τον κενό χώρο του πολυμερικού αφρού
- Θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία (καύση) για αφαίρεση του πολυμερικού αφρού, αφού πρώτα έχει στερεοποιηθεί το κεραμικό μίγμα
- Προσθήκη μετάλλου μέσω χύτευσης στον κενό χώρο που έχει δημιουργηθεί μετά την καταστροφή της πολυμερικής μήτρας
- Απομάκρυνση του υλικού πλήρωσης, είτε μηχανικά είτε με νερό υπό πίεση, ώστε να μείνει ο μεταλλικός αφρός [19]

Για να προκύψει η επιθυμητή μορφή πρέπει να δοθεί σημασία στον τρόπο χύτευσης του μετάλλου και στον τρόπο αφαίρεσης του πληρωτικού υλικού. Η τήξη του μετάλλου πρέπει να γίνει σε πολύ υψηλή πίεση, ώστε να μειωθεί σημαντικά το ιξώδες, η χύτευση να γίνει με υψηλή πίεση, η αναρρόφηση του μετάλλου με αντλία κενού και η στερεοποίηση να είναι κατευθυνόμενη. Υπό τις παραπάνω συνθήκες, το μέταλλο θα εισρεύσει σε όλο τον κενό χώρο που δημιουργήθηκε από την απομάκρυνση του πολυμερούς. [21]



Εικόνα 2.6: Μεταλλικός αφρός Duocel με κυψελοειδή ανοικτή δομή [19]

Με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι εφικτή η κατασκευή πολύπλοκων μορφών με ανοικτή δομή. Η κατανομή των κυψελίδων είναι ομοιόμορφη. Η συγκεκριμένη τεχνική όμως είναι αρκετά κοστοβόρα, ενώ παράλληλα δημιουργούνται παραπροϊόντα που επιβαρύνουν το περιβάλλον. Μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ο περιορισμός στο μέγεθος του τελικού προϊόντος. [19,21]

## 2.2.4 Δημιουργία τρισδιάστατης δικτυωτής δομής

Η εταιρία Jamcorp (Jonathan Aerospace Materials Corporation) ήταν από τις πρώτες εταιρίες που κατασκεύασαν υλικά με δομή τρισδιάστατου πλέγματος, τα οποία ονομάζονται υλικά δικτυωτής δομής. Αποτελούνται από επανάληψη συμμετρικών μοτίβων στις δύο ή στις τρεις διαστάσεις, δομή η οποία ονομάζεται συντακτική ή περιοδική. Τα υλικά τα οποία παρουσιάζουν μόνο στατιστική ομοιομορφία ονομάζονται στοχαστικά. [22]

Το πρώτο βήμα της μεθόδου είναι η κατασκευή πολυμερικού προτύπου με δικτυακή δομή. Ακολουθεί η χύτευση του μετάλλου, το οποίο παίρνει τη θέση του πολυμερικού αφρού καθώς αυτός εξαερώνεται. Όταν το αρχικό πρότυπο έχει συμμετρική δομή, η χύτευση γίνεται πιο εύκολα και αποφεύγονται οι ατέλειες. Η διαδικασία μπορεί να γίνει με όλα τα χυτεύσιμα μέταλλα, αλλά προτιμώνται όσα έχουν ικανοποιητική ρευστότητα. Στην Εικόνα 2.7 παρουσιάζεται ένα τετραεδρικό πλέγμα με δικτυωτή δομή. Αρχικά δημιουργήθηκε το πολυμερικό πρότυπο, το οποίο στη συνέχεια αντικαταστάθηκε από κράμα χαλκού-βηρυλλίου. Το μήκος του τεμαχίου είναι 300 mm ενώ η διατομή κάθε στελέχους 1,2 mm. [22]



Εικόνα 2.7: Τετραεδρικό πλέγμα με δικτυακή δομή από χύτευση αντικατάστασης του πολυμερικού προτύπου με κράμα χαλκού-βηρυλλίου (Cu-Be2%) [22]

Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει υψηλό κόστος, ενώ παράλληλα οδηγεί στη δημιουργία πολύ ανοικτής δομής. Είναι δύσκολη η κατασκευή σύνθετων γεωμετρικών μορφών, ενώ παρουσιάζουν και μειωμένη στιβαρότητα. Στα πλεονεκτήματά της όμως συγκαταλέγονται η δυνατότητα δημιουργίας συντακτικής δομής, καθώς και η δυνατότητα δημιουργίας πολυστρωματικών κατασκευών μέσω της σύνδεσης μεμονωμένων τεμαχίων. [22]

## 2.2.5 Δημιουργία μεταλλικών σπόγγων μεταβλητού πορώδους

Η συγκεκριμένη διαδικασία είναι μια παραλλαγή της μεθόδου Duocel. Βασίζεται επίσης στη δημιουργία αναλώσιμων προτύπων από πολυμερικό αφρό, με διαφορετικό όμως πορώδες. Τα πρότυπα συνενώνονται με κερί ή ρητίνη και δημιουργείται ένα ενιαίο πρότυπο, το οποίο εμβαπτίζεται σε μίγμα κεραμικών και ακολούθως θερμαίνεται. Κατά τη θέρμανση απομακρύνεται το κερί ή η ρητίνη, ενώ το κεραμικό περίβλημα στερεοποιείται. Έτσι δημιουργείται η μήτρα χύτευσης για την κατασκευή του μεταλλικού σπόγγου. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.8. [20]



Εικόνα 2.8: Απεικόνιση της μεθόδου παρασκευής μεταλλικών σπόγγων μεταβλητού πορώδους [20]

Με τη μέθοδο αυτή είναι εφικτή η ταυτόχρονη δημιουργία μεταλλικών σπόγγων με διαφορετικό πορώδες, αν στο τέλος διαχωριστούν οι δύο δομές. Υπάρχουν όμως και ειδικές εφαρμογές, στις οποίες απαιτείται να μεταβάλλεται το πορώδες με ομαλό τρόπο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί το υλικό χωρίς να γίνει διαχωρισμός. Ο μεταλλικός σπόγγος μπορεί να αποτελέσει μήτρα για χύτευση ενός δεύτερου μετάλλου ή κράματος, ενώ το υλικό που παράγεται έχει ιδιότητες που εξαρτώνται από το τοπικό πορώδες του σπόγγου. [20]



Εικόνα 2.9: Απεικόνιση της διεπιφάνειας μεταξύ δύο περιοχών διαφορετικού πορώδους [20]

## 2.3 Κονιομεταλλουργία

#### 2.3.1 Διαδικασία αφροποίησης μεταλλικής κόνεως

Οι μέθοδοι που ακολουθούν αφορούν την παραγωγή μεταλλικού αφρού από μεταλλική πούδρα, αντί για τηγμένο μέταλλο. Αρχικά η μεταλλική σκόνη αναμιγνύεται με αφριστικό παράγοντα. Χρησιμοποιούνται επίσης και πρόσθετα σε μορφή σκόνης αν είναι απαραίτητο, τα οποία βοηθούν στη σταθεροποίηση της δομής. Η μέθοδος αυτή άρχισε να αναπτύσσεται στο ινστιτούτου Fraunhofer-IFAM της Γερμανίας, πλέον όμως εφαρμόζεται και από ορισμένες εταιρίες με την εμπορική ονομασία Foaminal (IFAM) και Alulight. [34]

Η μεταλλική σκόνη μπορεί να είναι από καθαρό αλουμίνιο, από κράμα αλουμινίου με χαλκό ή με μαγνήσιο και πυρίτιο, καθώς και από κράματα χύτευσης (AlSi7 ή AlSi12). Τα κράματα χύτευσης έχουν καλή αφριστικότητα, λόγω και του χαμηλού σημείου τήξης τους. Για την αφροποίηση του αλουμινίου και των κραμάτων του απαιτείται συνήθως 0,4%-0,6% κ.β. αφριστικός παράγοντας TiH<sub>2</sub> (υδρίδιο του τιτανίου). Αντίστοιχα για την αφροποίηση κραμάτων αλουμινίου και ψευδαργύρου

χρησιμοποιείται ZrH₂ (υδρίδιο του ζιρκονίου), ενώ για τους χάλυβες χρησιμοποιείται SrCO₃ (ανθρακικό στρόντιο). [34]

Στη συνέχεια, το μίγμα που προκύπτει από την ανάμιξη συμπιέζεται ώστε να δημιουργεί ένα πυκνό, ημιτελικό προϊόν. Η συμπίεση μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, οι οποίοι θα αναλυθούν στη συνέχεια. [9]

Μετά τη συμπίεση ακολουθεί θερμική κατεργασία κοντά στο σημείο τήξης της μεταλλικής μήτρας και σε θερμοκρασία απαραιτήτως μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία αποσύνθεσης του αφριστικού παράγοντα. Το στάδιο αυτό στοχεύει στην αποσύνθεση του αφριστικού παράγοντα ώστε να εκλυθεί αέριο υδρογόνο, το οποίο θα οδηγήσει στη διόγκωση του υλικού και στην δημιουργία πορώδους δομής με κλειστούς πόρους. Η διάρκεια της αφροποίησης ποικίλλει ανάλογα με τη θερμοκρασία και τον όγκο του συμπιεσμένου υλικού, και μπορεί να κυμαίνεται από λίγα δευτερόλεπτα ως μερικά λεπτά. Αν το διάστημα αυτό ξεπεραστεί, οι πόροι αναπτύσσονται υπερβολικά και συγχωνεύονται με αποτέλεσμα να καταρρεύσει η δομή. Το πορώδες αυτών των αφρών κυμαίνεται από 60% ως 85%. Για να σταματήσει η αφροποίηση πρέπει το υλικό να ψυχθεί κάτω από το σημείο τήξης. Στην Εικόνα 2.10 παρουσιάζεται η εξέλιξη της αφροποίησης μετάλλου ΑΙSI7. [9,34]



Εικόνα 2.10: Βαθμός ανάπτυξης πόρων αφρού AlSi7 σε κάθε χρονικό σημείο [19]

Η ποιότητα του αφρού που θα παραχθεί εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που αφορούν τις συνθήκες συμπίεσης (τεχνολογία, θερμοκρασία, πίεση, χρόνος συμπίεσης, βαθμός παραμόρφωσης), την ποιότητα της πούδρας (τύπος και μέγεθος κόκκων, είδος κράματος, συνθήκες ανάμιξης), την αφροποίηση (θερμοκρασία, ρυθμός θέρμανσης, χρόνος ψύξης) καθώς και τη γεωμετρία του ημιτελικού προϊόντος, Τέλος η πυκνότητα του αφού εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε αφριστικό παράγοντα, τη θερμοκρασία και το ρυθμό θέρμανσης. [19]

#### 2.3.2 Τεχνολογία παραγωγής IFAM

Στην Εικόνα 2.11 παρουσιάζονται τα στάδια της παραγωγής αφρού αλουμινίου μέσω της τεχνολογίας IFAM. Συνοπτικά, αναμιγνύεται η μεταλλική σκόνη με τον αφριστικό παράγοντα και μέσω έλασης ή διέλασης παράγεται ένα ημιτελικό προϊόν το οποίο ύστερα από θερμική επεξεργασία διογκώνεται λόγω της αποσύνθεσης του αφριστικού παράγοντα και προκύπτει ο μεταλλικός αφρός. [34]



Εικόνα 2.11: Παραγωγή αφρού αλουμινίου με την τεχνολογία IFAM [9]

## 2.3.3 Τεχνολογία παραγωγής MEPURA

Όταν ο μεταλλικός αφρός πρέπει να διαθέτει συγκεκριμένο γεωμετρικό σχήμα πρέπει να χρησιμοποιηθεί καλούπι με το επιθυμητό σχήμα. Στην περίπτωση αυτή πρώτα τοποθετείται η συμπιεσμένη σκόνη στο καλούπι και μετά θερμαίνεται. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να κατασκευαστούν και πολυστρωματικές δομές τύπου σάντουιτς, με συμπαγές εξωτερικό περίβλημα και πορώδες εσωτερικό. Στην Εικόνα 2.12 παρουσιάζεται η τεχνολογία MEPURA, όπου παράγεται πλαίσιο με μεταλλικό αφρό στο εσωτερικό του. [9, 19]



Εικόνα 2.12: Παραγωγή αφρού αλουμινίου με την τεχνολογία ΜΕΡURA [9]

Στην τεχνολογία MEPURA το ημιτελικό προϊόν πρέπει να εισαχθεί σε καλούπι, ώστε να πάρει την επιθυμητή μορφή. Η διαδικασία της αφροποίησης γίνεται μέσα σε κλειστό καλούπι και το υλικό θα πάρει το σχήμα του αντίστοιχου καλουπιού. Είναι επίσης εφικτή η ένωση κομματιών αφρού με κομμάτια μετάλλου. Στην Εικόνα 2.13 παρουσιάζονται διάφορα είδη σωλήνων, οι οποίοι στο εσωτερικό τους έχουν αφρό αλουμινίου. [9] Το συμπιεσμένο μίγμα κόνεως τοποθετείται στο εσωτερικό ενός κοίλου κυλίνδρου και θερμαίνεται. Το σημείο τήξης του μεταλλικού αφρού πρέπει να είναι χαμηλότερο από το σημείο τήξης του υλικού του κυλίνδρου.



Εικόνα 2.13: Σωλήνες γεμισμένοι με αφρό αλουμινίου [34]

Μπορούν να παραχθούν επίσης φύλλα αλουμινίου σε μορφή σάντουιτς που έχουν στο εσωτερικό τους μεταλλικό αφρό. Τα φύλλα αλουμινίου μπορούν να κολληθούν σε ένα φύλλο αφρού ή μπορούν να υποστούν έλαση, αφού έχουν ήδη τοποθετηθεί πάνω και κάτω από το πρόδρομο υλικό, ώστε να δημιουργηθούν μεταλλικοί δεσμοί στις επαφές μετάλλου και αφρού.


Εικόνα 2.14: Πολυστρωματικό πάνελ αλουμινίου [34]



Εικόνα 2.15: Πάνελ τύπου σάντουιτς με πυρήνα από αφρό αλουμινίου [34]

# 2.3.4 Παραγωγή αφρού πολύπλοκης μορφής

Για την παραγωγή πολύπλοκων σχημάτων, πρέπει να εισαχθεί ένας διογκωμένος υγρός αφρός σε κατάλληλο καλούπι, και εκεί να γίνει η τελική διόγκωση. Με τη διαδικασία αυτή παράγονται τελικά προϊόντα που έχουν πυκνότητα 0,5 gr/cm<sup>3</sup> και 1 gr/cm<sup>3</sup>. Αρχικά απαιτείται ανάμιξη της πούδρας αλουμινίου με τον αφριστικό παράγοντα και συνεχής διέλαση, ώστε να παραχθεί ένα συμπαγές αφροποιήσιμο πρόδρομο υλικό, όπως και στην τεχνολογία MEPURA. Στην περίπτωση αυτή όμως το

πρόδρομο υλικό πρέπει να θερμανθεί μέχρι τη θερμοκρασία τήξης του κράματος, ώστε να προκύψει υγρός αφρός, ο οποίος στη συνέχεια θα υποστεί χύτευση σε μεταλλικό καλούπι ή καλούπι άμμου. Με τον τρόπο αυτό είναι εφικτή η παραγωγή μικρής αλλά και μεγάλης κλίμακας, αλλά και η δημιουργία πρωτοτύπων, χωρίς το κόστος κατασκευής τους να είναι υπέρογκο. Τέτοιου είδους κομμάτια αφρού χρησιμεύουν ως πυρήνες στη χύτευση του αλουμινίου υπό πίεση. [9,19]



Εικόνα 2.16: Παραγωγή τεμαχίων πολύπλοκης μορφής από μεταλλικό αφρό [9]

# 2.3.5 Παραγωγή αφρού με παγιδευμένο αέριο

Ένας μεταλλικός αφρός, τέλος, μπορεί να παραχθεί χρησιμοποιώντας ένα παγιδευμένο αέριο με τον ακόλουθο τρόπο: Η πούδρα του αλουμινίου εισάγεται σε έναν ερμητικά κλειστό θάλαμο και στη συνέχεια εισάγεται στο θάλαμο ένα αέριο υπό πίεση, π.χ. αργό, το οποίο γεμίζει όλα τα κενά που υπάρχουν μεταξύ των κόκκων. Με τη θέρμανση του μίγματος αυτού, οι κόκκοι της πούδρας τήκονται και ενώνονται μεταξύ τους, παγιδεύοντας το εγκλωβισμένο αέριο. Η χελώνα αφρού που παράγεται υφίσταται έλαση και θερμαίνεται, ώστε το παγιδευμένο αέριο να εκτονωθεί και να παραχθεί ο μεταλλικός αφρός. [9]

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η παραγωγή σωλήνων με πορώδη πυρήνα, ενώ επίσης είναι δυνατή και η κατασκευή οποιουδήποτε γεωμετρικού σχήματος. Το μέταλλο παραμένει σε στερεή κατάσταση και άρα δεν καταπονούνται ιδιαίτερα τα εξωτερικά φύλλα. Συνεπώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ελάσματα πολύ μικρού πάχους. [9,22]

#### (Ti6Al4V)



Εικόνα 2.17: Σύνδεση πορώδους πυρήνα με το εξωτερικό φύλλο Ti6All4V [22]

# 2.3.6 Παραγωγή μεταλλικών αφρών με πυροσυσσωμάτωση κόνεων

Η διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την παραγωγή πορώδων δομών, χρησιμοποιώντας μεταλλικές κόνεις. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο το μέταλλο δεν μεταπίπτει ούτε στην υγρή ούτε στην ημιυγρή κατάσταση, αλλά παραμένει σε στερεή. Η Εικόνα 2.18 που ακολουθεί παραθέτει δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα, ώστε να γίνει αντιληπτή η δομή των κόκκων και των αναπτυσσόμενων συνδέσεων από τη διαδικασία. Όπως φαίνεται, οι κόκκοι έχουν σφαιρικό σχήμα και διατηρούν την αρχική τους μορφή, ενώ η σύνδεση τους γίνεται μέσω ενός λεπτού σχηματισμού. Οι μεταλλικοί αφροί που κατασκευάζονται είναι ανοικτού κελιού, εν αντιθέσει με τη διαδικασία της αφροποίησης που παράγονται κλειστού κελιού αφροί, λόγω των αναπτυσσόμενων επιφανειακών τάσεων που οδηγούν σε σφαιροποίηση των πόρων.[23]



Εικόνα 2.18: (Αριστερά) Διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης κόκκων μετάλλου, (Δεξιά) Κοντινή άποψη του σημείου σύνδεσης μεταξύ 2 κόκκων [23]

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τα βασικά στάδια της διαδικασίας, τα οποία είναι: κλασματοποίηση της μεταλλικής σκόνης, συμπίεση ή τοποθέτηση σε καλούπι και τέλος θέρμανση. Τα μεταλλικά υλικά, που χρησιμοποιούνται συνήθως σε εμπορικές εφαρμογές, είναι το τιτάνιο (Ti) και τα κράματά του , οι μπρούντζοι και οι ανοξείδωτοι χάλυβες. Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες γίνεται η πυροσυσσωμάτωση είναι διαφορετικές για το κάθε υλικό. Στην περίπτωση για παράδειγμα του μπρούντζου Cu89Sn11 δεν εφαρμόζεται επιπλέον συμπίεση και η θερμοκρασία συσσωμάτωσης φτάνει τους 820°C. Το πορώδες που επιτυγχάνεται κυμαίνεται από 20 έως 50% και ο αφρός χαρακτηρίζεται από σχετικά χαμηλή μηχανική αντοχή. Σε άλλα υλικά συνήθως εφαρμόζεται συμπίεση πριν τη θέρμανση. Η αξονική συμπίεση σε καλούπι , η ισοστατική συμπίεση και η εν θερμώ εξέλαση προκαλούν σύνδεση εν ψυχρώ των κόκκων αυξάνοντας έτσι την αντοχή του μεταλλικού αφρού. [24]

Ένα άλλο εξίσου σημαντικό υλικό που ενδείκνυται να χρησιμοποιηθεί είναι το καθαρό αλουμίνιο και τα κράματά του. Ο ανασταλτικός παράγοντας ευρείας χρήσης του εν λόγω μετάλλου είναι το επιφανειακό στρώμα της αλούμινας (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), το οποίο δυσχεραίνει την εν θερμώ σύνδεση. Έτσι αρχικά εφαρμόζεται συμπίεση , ώστε με την αναπτυσσόμενη μηχανική πίεση να προκληθεί θραύση του στρώματος οξειδίου και να γίνει εφικτή η σύνδεση των κόκκων μεταξύ τους. Το αρνητικό σημείο είναι ότι η συμπίεση προκαλεί παράλληλα μείωση του τελικού πορώδους. Έτσι υπάρχει ανάγκη προσθήκης επιπλέον σκόνης μετάλλου ως στοιχείο του κράματος, όπως χαλκός, μαγνήσιο ή πυρίτιο. Η προσθήκη βοηθά στη δημιουργία ευτηκτικών φάσεων, οι οποίες απαιτούν χαμηλότερη θερμοκρασία για την πυροσυσσωμάτωση και τη σύνδεση των κόκκων, περίπου 595 - 625°C. [25]

# 2.4 Μέθοδοι εναπόθεσης μετάλλου

Η συγκεκριμένη μέθοδος παραγωγής μεταλλικών αφρών είναι αμιγώς χημική διεργασία και για το λόγο αυτό δεν μπορεί να ενταχθεί στις προαναφερθείσες κατηγορίες παραγωγής. Η αρχή της μεθόδου στηρίζεται στη δημιουργία ενός κολλοειδούς κρυσταλλικού προτύπου από μικροσφαιρίδια οξειδίου του πυριτίου. Η διείσδυση του μετάλλου γίνεται είτε με χημική μετατροπή, είτε με κατευθυνόμενη εισαγωγή νανοκρυστάλλων , είτε με ηλεκτρολυτική εναπόθεση. Οι περισσότερες προσπάθειες χημικής εναπόθεσης αρχικά περιελάμβαναν τη χρήση επίπεδων αγώγιμων επιφανειών, που τοποθετούνταν κάτω από το στρώμα κολλοειδούς υλικού. Η δυσκολία της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η πυκνή διάταξη των μικροσφαιριδίων, η οποία αποτρέπει τη διείσδυση των ιόντων μετάλλου στον κενό χώρο του προτύπου. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι τα κολλοειδή υλικά έχουν μειωμένη αντοχή στη μηχανική καταπόνηση, που δημιουργείται από το εκλυόμενο αέριο κατά την αναγωγή των μεταλλικών ιόντων. [26]

Μια παραλλαγή της χημικής εναπόθεσης περιλαμβάνει την κατασκευή προτύπου από πολυστυρένιο. Στον κενό χώρο που δημιουργείται μπορεί να διεισδύσει το διάλυμα των ιόντων μετάλλου σε οξύ ή σε αραιό διάλυμα αιθανόλης, λόγω των τριχοειδών φαινομένων που αναπτύσσονται. Με την ολοκλήρωση του εμποτισμού, το πλεονάζον διάλυμα απομακρύνεται με τη βοήθεια αντλίας κενού. Στη συνέχεια, το πρότυπο διαβρέχεται με οξαλικό οξύ, το οποίο δημιουργεί ένα επιφανειακό στρώμα μεταλλικού οξαλικού άλατος. Το δείγμα θερμαίνεται σε αέρα ή σε άζωτο, ώστε να απομακρυνθεί το πολυστυρένιο και να σχηματισθεί οξείδιο μετάλλου (σε αέρα) ή καθαρό μέταλλο (σε άζωτο). Στην περίπτωση θέρμανσης σε αέρα, πρέπει να ακολουθήσει θέρμανση υπό άζωτο για την απομάκρυνση των οξειδίων. Όπως είναι κατανοητό οι συνθήκες της μεθόδου είναι καθοριστικής σημασίας για την τελική αναλογία καθαρού μετάλλου/οξειδίου στον μεταλλικό αφρό. Εξάλλου, η δομική αντοχή του μεταλλικού σπόγγου δεν επηρεάζεται από τα εκλυόμενα αέρια CO<sub>2</sub>. Μάλιστα, οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται μπορεί να ενισχύσουν την αντοχή του, λόγω της ανάπτυξης κόκκων στο πορώδες υπόστρωμα. Η μέση διάμετρος των πόρων του μεταλλικού αφρού μπορεί να φθάσουν τα 250 έως 500 nm. [26-28]

Μια εναλλακτική διαδικασία παραγωγής μεταλλικού αφρού ξεκινάει και αυτή με χρήση πολυστυρενίου για το κολλοειδές πρότυπο, όμως η διείσδυση των μεταλλικών ιόντων γίνεται άμεσα στο πρότυπο. Για την επιτυχία της μεθόδου χρησιμοποιείται διάλυμα με μεγάλο αριθμό νανοκρυστάλλων μετάλλου σε διασπορά. Το μέγεθος των νανοκρυστάλων κυμαίνεται από 12 έως 25 nm, και βοηθά στην ευκολότερη διείσδυσή τους στον κενό χώρο του πλέγματος. Ακολουθεί θέρμανση για την απομάκρυνση του πολυστυρενίου ή εναλλακτικά οξείδωση με θειικό οξύ ή διάλυση με τριχλωρομεθάνιο. Η χρήση των χημικών διαλυμάτων οδηγεί σε μέσο ή μακροπορώδες μεταλλικό αφρό, ενώ η θέρμανση σε μακροπορώδες. Η μέθοδος αυτή αρχικά χρησιμοποιήθηκε σε χρυσό, ενώ είναι δυνατό να εφαρμοστεί και σε άλλα μέταλλα υπό μορφή νανοκρυστάλλων.

Η ακόλουθη Εικόνα 2.19 παρουσιάζει ενδεικτικά παραδείγματα άλλων χρησιμοποιούμενων υλικών για την κατασκευή μεταλλικών αφρών. Τα χρησιμοποιούμενα υλικά είναι χαλκός, άργυρος και νικέλιο. Πιο ειδικά στην Εικόνα 2.19Α η διάμετρος των πόρων του αφρού είναι 325 ± 15 nm. Στην Εικόνα 2.19Β η διάμετρος των πόρων του αφρού είναι 353 ± 17 nm. Η Εικόνα 2.19Γ δείχνει τις οπές επικοινωνίας των πόρων με μέγεθος 60 ± 10 nm. Τέλος η Εικόνα 2.19Δ δείχνει σε μικρότερη μεγέθυνση τον αφρό από χαλκό, όπου διακρίνονται τα κομμάτια σε θραύση. [26-28]



Εικόνα 2.19: Α) Μεταλλικός αφρός από χαλκό (SEM), Β) Μεταλλικός αφρός από άργυρο, Β) Μεταλλικός αφρός από νικέλιο, Β) Μεταλλικός αφρός από χαλκό (μικρότερη μεγέθυνση) [26]

# 2.5 <u>Χημική εναπόθεση ατμών (CVD)</u>

Η μέθοδος της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD - chemical vapor deposition) είναι ευρέως διαδεδομένη και ιδιαιτέρως εύχρηστη, γι' αυτό και υιοθετήθηκε και στην παρασκευή μεταλλικών αφρών. Από τις πρώτες εφαρμογές ήταν ο αφρός νικελίου Incofoam, με πορώδες το οποίο κυμαινόταν από 70 έως 98% κ.ο., ενώ το μέγεθος το κελιών του ήταν από 450 έως 3200 μm. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων αφρών είναι η υψηλή καθαρότητα (προσμίξεις = 0,08% C και 0,02% S κ.β.), η εξαιρετική ομοιογένεια και η ανοιχτή του δομή. [26] Για την παρασκευή τους χρησιμοποιείται ένα αφρώδες πρότυπο από πολυμερές, συνήθως πολυουρεθάνη , πάνω στο οποίο επικάθεται το νικέλιο. Στη συνέχεια ακολουθεί θέρμανση για την απομάκρυνση του πολυμερούς και τη συσσωμάτωση του νικελίου. Η επικάλυψη του αφρού με το νικέλιο γίνεται είτε με μεθόδους επιμετάλλωσης , είτε με ηλεκτροεναπόθεση, είτε με χημική εναπόθεση ατμού. Μαζικά και σε συνεχή παραγωγή χρησιμοποιείται η μέθοδος της χημικής εναπόθεσης ατμών. Σαν βασικό συστατικό της χημικής διεργασίας χρησιμοποιείται το τετρακαρβονύλιο του νικελίου Ni(CO)<sub>4</sub>. Η σύνθεση της ένωσης αυτής έγινε για πρώτη φορά το 1888 από τους Carl Langer και Ludwig Mond. Από τότε και μέχρι το 1902 η βασική της χρήση αφορούσε τον εξευγενισμό του νικελίου και την παραγωγή του σε μορφή σκόνης. Με σημείο βρασμού τους 43°C μπορεί εύκολα να αποσυντεθεί σε καθαρό νικέλιο και μονοξείδιο του άνθρακα , με θέρμανση στους 150 - 200°C βάσει της αντίδρασης : Ni(CO)<sub>4</sub> - Η σύνθεση και +4CO

Το συγκριτικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών που επιβάλλει είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί σε υλικά με μικρή αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες. Για την περίπτωση μαζικής παραγωγής, κατασκευάζεται ένα υπόστρωμα πολυουρεθάνης μήκους 2000 m , πλάτους 1 m και πάχους 1.3-3mm. Το φύλλο αυτό κινείται ανάμεσα σε δύο μηχανισμούς περιέλιξης και διέρχεται από μια σειρά θαλάμων εναπόθεσης. Οι συνθήκες της διαδικασίας ελέγχονται τόσο όσον αφορά τη θερμοκρασία, όσο και την ατμοσφαιρική σύσταση. Η ποσότητα του μετάλλου που θα εναποτεθεί σε κάθε θάλαμο καθορίζεται από τη σύνθεση του αερίου – φορέα , τη θερμοκρασία του υποστρώματος , τη συνολική επιφάνεια αυτού και τον χρόνο παραμονής του υποστρώματος στο συγκεκριμένο θάλαμο. Ένας τυπικός ρυθμός εναπόθεσης που μπορεί να επιτευχθεί είναι το 1 μm / min. [26]

Μετά το στάδιο της εναπόθεσης ατμών ακολουθεί θέρμανση, ώστε να απομακρυνθεί η πολυουρεθάνη και να σταθεροποιηθεί η δομή του νικελίου. Η θερμοκρασία η οποία επιλέγεται είναι ~1000°C. Στην Εικόνα 2.20 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο της διαπίδυσης (βίαιη εξαγωγή) του αφρού πολυουρεθάνης από την κυψελίδα του μετάλλου. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται λόγω της αναπτυσσόμενης υπερπίεσης στο περίβλημα, ενώ στη συνέχεια λόγω της θερμότητας καίγεται, δημιουργώντας έτσι ένα κοίλο δικτυωτό πλέγμα νικελίου.



Εικόνα 2.20: (Αριστερά) Διαπίδυση της πολυουρεθάνης από την κυψελίδα νικελίου, (Δεξιά) Τομή αφρού νικελίου με το στάδιο της θέρμανσης [26]

Το βασικό πρόβλημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η δημιουργία επικίνδυνων χημικών παραπροϊόντων, μιας και κατά τη διαδικασία της εναπόθεση όσο και της καύσης, παράγονται χημικές ενώσεις που δεν πρέπει να διοχετεύονται στο περιβάλλον. [26]



Εικόνα 2.21: Εικόνες SEM από τομές αφρών νικελίου διαφορετικού πορώδους [29]

Οι σημαντικότερες εταιρίες που έχουν υιοθετήσει και εφαρμόσει την εν λόγω μέθοδο παραγωγής μεταλλικού αφρού είναι η Ultramet και η Recemat. Η διαφορά είναι ότι οι εταιρίες αυτές χρησιμοποιούν πρότυπο αφρού άνθρακα. Οι ρυθμοί εναπόθεσης που επιτυγχάνονται είναι 100 – 400 μm / h. Τα χρησιμοποιούμενα μέταλλα είναι ζιρκόνιο (Zr), νιόβιο (Nb), άφνιο (Hf), ταντάλιο (Ta), βολφράμιο (W),

ρήνιο (Re) και για κεραμικά όπως : οξείδια , νιτρίδια , καρβίδια , βορίδια και πυριτιούχες κεραμικές ενώσεις. [29]

# 2.6 Κατεργασίες αφρών

#### Γενικά στοιχεία

Οι συνήθεις μηχανουργικές κατεργασίες ενδέχεται να προκαλέσουν παραμόρφωση στην δομή ενός τεμαχίου από μεταλλικό αφρό. Προφανώς, για την αποφυγή περαιτέρω μηχανουργικών κατεργασιών θα πρέπει να έχει προηγηθεί επαρκής σχεδιασμός και σωστή παραγωγή του εκάστοτε τεμαχίου μεταλλικού αφρού. Σε αρκετές περιπτώσεις όμως μπορεί να χρειαστεί να μορφοποιηθούν ή να συγκολληθούν, ώστε να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν σε μια εφαρμογή. Τα χαρακτηριστικά των μεταλλικών αφρών που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πριν από την μηχανουργική τους κατεργασία είναι: [32]

α) Αντοχή σε κρούσεις (δύσκολη μορφοποίηση και κατεργασία)

β) Υψηλή ευαισθησία σε αξονικές καταπονήσεις (δύσκολη μορφοποίηση)

γ) Ατέλειες σε κυτταρικά τοιχώματα και στην επιφάνεια (δύσκολη επικάλυψη)

- δ) Παρουσία οξειδίων στην επιφάνεια (δύσκολη επικάλυψη και συγκόλληση)
- ε) Παρουσία των στερεοποιητικών κεραμικών (δύσκολη κατεργασία)

Τα συνήθη προβλήματα που μπορεί να προκύψουν είναι παραμόρφωση των λεπτότοιχων πόρων του αφρού, δηλαδή κάμψη ή θραύση των τοιχωμάτων στο λεπτότερο σημείο τους. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα τεμάχιο χαμηλής ποιότητας και μειωμένης ακρίβειας επιφάνειας. Για το λόγο αυτό οι παραδοσιακές τεχνικές κατεργασίας δεν ενδείκνυνται.

Μια αποδοτική τεχνική είναι η κατεργασία με ηλεκτρική εκκένωση, με την οποία αποφεύγονται μηχανικές ατέλειες στα τοιχώματα του εσωτερικού του αφρού. Επίσης, υπάρχουν και άλλες τεχνικές συγκόλλησης που εφαρμόζονται στα υπόλοιπα κυψελοειδή υλικά, όπως κόλληση, ηλεκτροσυγκόλληση και κασσιτεροκόλληση. Παρόλα αυτά, το κόστος των συγκεκριμένων τεχνικών είναι ιδιαιτέρως υψηλό. Ακολούθως περιγράφονται ορισμένες από τις κατεργασίες μεταλλικών αφρών. [32]

#### Συγκόλληση με laser

Η συγκόλληση με laser χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την τοποθέτηση ανθεκτικών κατασκευών στο πίσω ή στο κάτω μέρος του αμαξώματος ενός αυτοκινήτου, ώστε να αυξηθεί η στρεπτική του ακαμψία. Η διαδικασία συγκόλλησης περιλαμβάνει ένωση μόνο των εξωτερικών φύλλων του τεμαχίου, αφήνοντας ανέπαφη την

εσωτερική κυψελλοειδή δομή του. Το πληρωτικό υλικό τοποθετείται μπροστά από την κεφαλή του laser κατά μήκος της διεύθυνσης της συγκόλλησης. [31]

Οι ταχύτητες συγκόλλησης που μπορούν να επιτευχθούν είναι αρκετά υψηλές, μειώνονται όμως όταν πρέπει να συγκολληθούν και τα δύο φύλλα της δομής του τεμαχίου. Ειδικά για τις συγκολλήσεις αφρών έχουμε καλύτερα αποτελέσματα όταν δουλεύουμε με παλμικό laser και με laser συνεχόμενης ακτινοβολίας. Τα πειράματα δείχνουν ότι αυτή η συγκόλληση έχει καλά αποτελέσματα για την συνένωση αφρών αλουμινίου με φύλλα μετάλλου.

Η Εικόνα 2.22 παρουσιάζει δύο διαφορετικές διαδικασίες συγκόλλησης αφρών αλουμινίου με laser, αριστερά η ράβδος συγκολλείται κατά μήκος της κόλλησης, δεξιά το πληρωτικό μέσο τοποθετείται ενδιάμεσα από τα δυο τεμάχια αφρού αλουμινίου.



Εικόνα 2.22: Σχηματική απεικόνιση δύο διαφορετικών διαδικασιών συγκόλλησης με laser [31]

#### Συγκόλληση με τόξο TIG/MIG

Η χρήση των τεχνικών TIG/MIG επιτυγχάνουν εξαιρετικά αποτελέσματα τόσο σε συγκόλληση μεταξύ δομών σάντουιτς αλουμινίου όσο και για συγκόλληση με άλλο τεμάχιο από μεταλλικό αφρό. Οι συγκεκριμένες τεχνικές έχουν το πλεονέκτημα της ευελιξίας εφαρμογών καθώς και το χαμηλό κόστος επένδυσης για τον εξοπλισμό. Η διαδικασία συγκόλλησης περιλαμβάνει την κόλληση μόνο του κελύφους, ώστε να αποφευχθεί η παραμόρφωση της εσωτερικής δομής του τεμαχίου. [32]

#### Flow drilling

Με τη συγκεκριμένη τεχνική κατεργασίας, ασκείται πίεση αξονικά στο τεμάχιο από το ένα πολυγωνικό περικόχλιο, το οποίο περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα. Έτσι αναπτύσσεται θερμότητα λόγω της τριβής. Με αυτόν τον τρόπο το υλικό μαλακώνει και επομένως είναι δυνατό να μορφοποιηθεί ευκολότερα. [32]

#### Μέθοδοι κοπής αφρών αλουμινίου

Οι αφροί αλουμινίου αποτελούν δύσκολη περίπτωση κατεργασίας ειδικά όταν χρησιμοποιούνται οι κοινές τεχνικές κατεργασίας. Για την αποφυγή περιπτώσεων παραμόρφωσης ενός τεμαχίου από αφρό αλουμινίου, έχουν αναπτυχθεί νέες τεχνικές, όπως περιγράφονται ακολούθως: [31-33]

#### Κοπή με laser

Πρόκειται για μια τεχνική κοπής που απαιτείται μερική τροποποίηση των παραμέτρων της διαδικασίας σύμφωνα με την περίπτωση του κάθε τεμαχίου, ειδικά όταν πρέπει να γίνει ταυτόχρονη κοπή των δύο όψεων. Το σύνηθες πρόβλημα που προκύπτει είναι τήξη του εσωτερικού πυρήνα, προκαλώντας κατάρρευση της κατασκευής με τα εξωτερικά φύλλα και εκχείλιση μετάλλου, μειώνοντας έτσι την ποιότητα της τελικής επιφάνειας του τεμαχίου.

#### Κοπή με Jet νερού

Από την άλλη, η κοπή με jet νερού, μιας δομής σάντουιτς με αφρό αλουμινίου (Εικόνα 2.23), που δεν έχει περάσει στη διαδικασία της αφροποίησης, μπορεί να γίνει χωρίς κανένα πρόβλημα. Το πρόβλημα που υπάρχει με αυτού του είδους τα τεμάχια είναι η ύπαρξη μικροαντικειμένων στο πορώδες του αφρού, τα οποία δεν μπορούν να απομακρυνθούν ούτε με πλύση ούτε με γυαλιστικά. Τέτοια τεμάχια απορρίπτονται αφού δεν γίνονται αποδεκτά τέτοια υπολείμματα στο τελικό προϊόν.



Εικόνα 2.23: Κοπή δομής σάντουιτς από αφρό αλουμινίου με jet νερού [30]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: <u>Μέθοδοι χαρακτηρισμού μεταλλικών</u> <u>αφρών</u>

### 3.1 Δομικά χαρακτηριστικά μεταλλικών αφρών

Στην παρούσα ενότητα θα περιγραφούν τα βασικά δομικά χαρακτηριστικά των μεταλλικών αφρών. Αναφορικά με τη δομή τους, οι αφροί μπορούν να χαρακτηριστούν από την τοπολογία και την μορφολογία των πόρων τους, αν έχουν ανοικτές ή κλειστές κυψέλες, τη σχετική πυκνότητα, το μέγεθος κυψέλης, το σχήμα της κυψέλης και την ανισοτροπία που εμφανίζουν. Τα συνήθη υλικά κατασκευής των αφρών είναι το αλουμίνιο, το νικέλιο και το τιτάνιο. Προφανώς το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εκάστοτε εφαρμογή. Το εύρος της σχετικής πυκνότητας που συναντάται σε εμπορικούς μεταλλικούς αφρούς κυμαίνεται από 2% έως και 100%. Ακολούθως παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παραδείγματα μεταλλικών αφρών, που έχουν βασικές διαφορές στη δομή τους. Η Εικόνα 3.1 δείχνει ένα μεταλλικό αφρό κλειστών κυψελών που κατασκευάζεται από την Fraunhofer, στη Γερμανία, ενώ η Εικόνα 3.2 δείχνει μεταλλικούς αφρούς ανοιχτών κυψελών. [40]



Εικόνα 3.1: Μεταλλικός αφρός κλειστών κυψελών [40]



Εικόνα 3.2: Μεταλλικός αφρός ανοικτών κυψελών [40]

Οι παραπάνω εικόνες δείχνουν χαρακτηριστικά τη δομική διαφορά των μεταλλικών αφρών κλειστού και ανοικτού τύπου. Οι κυψέλες στον ανοικτού τύπου αφρό επιτρέπουν τη διέλευση ρευστού έχοντας διάφορες εφαρμογές που κυμαίνονται από φιλτράρισμα έως και μετάδοση θερμότητας, ενώ ο κλειστού τύπου μεταλλικός αφρός είναι ιδανικός για απορρόφηση ενέργειας αλλά και δομικές εφαρμογές, όπως σε προφυλακτήρες αυτοκινήτων, γέφυρες και κτίρια.

Η χρήση των ανοικτού τύπου μεταλλικών αφρών ως φίλτρα ενδείκνυται ειδικά για εφαρμογές σε υψηλής θερμοκρασίας ρευστά, όπου είναι απαραίτητο το ελεγχόμενο μέγεθος κυψελών. Οι αφροί ανοικτών κυψελίδων είναι επίσης καλοί απορροφητές ενέργειας, αλλά χρησιμοποιούνται συνήθως ως εναλλάκτες θερμότητας, δεδομένου ότι έχουν ένα υψηλό συντελεστή της θερμικής αγωγιμότητας, αυξημένο εμβαδόν επιφανείας εναλλαγής και επιτρέπουν την δίοδο του ρευστού μέσω των πόρων τους. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η πυκνότητα πόρων, όπου αναφέρονται ως πόροι ανά ίντσα (porous per inch - ppi). Συνεπώς, όσο μικρότερη είναι η πυκνότητα των πόρων, θα υπάρχουν λιγότεροι πόροι ανά γραμμική ίντσα, που σημαίνει ότι η διάμετρος των κυψελίδων για τους πόρους θα είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με ένα δείγμα με υψηλότερη πυκνότητα πόρων. Τα τρία μικρογραφήματα που παρουσιάζονται ακολούθως στην Εικόνα 3.3, αποτελούνται από δείγματα 10, 20 και 40 ppi αντίστοιχα. Είναι δυνατόν να φανεί από τα στοιχεία αυτά ότι το δείγμα 10 ppi έχει τους λιγότερους πόρους ανά γραμμική ίντσα και συνεπώς το ίδιο δείγμα έχει μεγαλύτερο μέγεθος πόρων. Η πραγματική πυκνότητα του αφρού διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στο μέγεθος των πόρων και στη διάμετρο των δοκίδων ds (strut diameter) στις κυψελίδες. [35,36]



Εικόνα 3.3: Δείγματα αφρών αλουμινίου διαφορετικής πυκνότητας πορώδους με διαβαθμισμένη κλίμακα χιλιοστού [35]

Από την άλλη, οι μεταλλικοί αφροί κλειστού τύπου εμφανίζουν εξαιρετική ακαμψία ως προς το ειδικό βάρος όταν τους ασκείται καμπτική φόρτιση και έτσι χρησιμοποιούνται σε ελαφρές κατασκευές. Μια συνήθης εφαρμογή τους είναι η χρήση τους ως αποσβεστήρες ήχου, όπου τοποθετούνται σε αυτοκίνητα καθώς και σε κτίρια. Εφαρμογές για καθυστέρηση της εξάπλωσης της φωτιάς έχουν επίσης ωφεληθεί από την κλειστή διαμόρφωση των κυψελίδων, δεδομένου ότι παρέχουν θερμική μόνωση. Το αέριο συνήθως παγιδεύεται στο εσωτερικό των κυψελίδων του αφρού και συνεπώς δρα σαν κακός αγωγός της θερμότητας και ως εκ τούτου ως μονωτής. Τα αέρια, που παγιδεύονται μέσα, επίσης βοηθάνε στην απορρόφηση των κρούσεων. Μετά την κρούση στον αφρό, τα αέρια συμπιέζονται στο εσωτερικό του και προσφέρουν επιπλέον απόσβεση. Μια άλλη εφαρμογή είναι στην πλευστότητα, καθώς η χαμηλή τους πυκνότητα και η καλή αντοχή στη διάβρωση προτείνει πιθανές συσκευές επίπλευσης. [36]

Ο τρόπος με τον οποίο οι κυψέλες σχηματίζονται στους μεταλλικούς αφρούς επιτρέπουν την απορρόφηση της ενέργειας σε όλες τις κατευθύνσεις. Το σχήμα του κελιού, τετράεδρο και δεκάεδρο, το καθιστά ανθεκτικό στην κατεύθυνση ή ισοτροπικό, ιδανικά μιλώντας. Αυτή η γεωμετρία επιτρέπει στον αφρό να απορροφά ενέργεια από οποιαδήποτε κατεύθυνση και επιτρέπει επίσης τη μετάδοση θερμότητας, τη θερμική αντοχή και τη ροή ρευστού από όλες τις κατευθύνσεις. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι αφροί της ομοιόμορφης περιοδικής κατανομής των κυψελών και του πορώδες μπορεί ιδανικά να επισημαίνονται ως ισότροπα. Ωστόσο, όταν οι αφροί υποβάλλονται σε επεξεργασία, πάντα προκύπτουν ατέλειες στις κυψέλες και στην κατανομή τους, καθώς συνήθως είναι ελαφρώς στρεβλωμένα στην κατεύθυνση όπου οι φυσαλίδες ανέβηκαν, με αποτέλεσμα οι πόροι των κυψελίδων να ποικίλουν σε μέγεθος. Η Εικόνα 3.4 παρουσιάζει το τετράεδρο και δεκάεδρο μιας κυψέλης. Η Εικόνα 3.5 δείχνει μία εξιδανικευμένη εκδοχή μιας μεμονωμένης κυψέλης τετράεδρου και δεκάεδρου. Η κυψέλη στην Εικόνα 3.4 είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο να είναι ισότροπη, αλλά με μια προσεκτική εξέταση βρίσκεται ότι οι κυψέλες είναι ελαφρώς

στρεβλωμένες και όχι ακριβώς όλες σε ίσο μέγεθος. Επομένως, η επισήμανση αυτού του δείγματος ως ισότροπο είναι ελαφρώς ανακριβής. Αυτή η ελαφρά στρέβλωση της κυψέλης δεν σημαίνει ότι αυτό το δείγμα, για την μακροκλίμακα και όταν υποβάλλεται σε μηχανική φόρτιση, δεν θα συμπεριφερθεί με έναν ομοιογενή τρόπο. Η ελαφρά στρέβλωση των κυττάρων με την υψηλή ομοιομορφία τους επιτρέπει στον αφρό να δρα ως ομοιογενής, ομοιόμορφος αφρός. [36]



Εικόνα 3.4: Τετράεδρο και δεκάεδρο μιας κυψέλης [35]



Εικόνα 3.5: Ιδανικό τετράεδρο και εξάεδρο μιας κυψέλης [35]

# 3.2 Χαρακτηρισμός των κυψελοειδών μεταλλικών υλικών

Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση των κύριων μεθόδων χαρακτηρισμού και μέτρησης των σημαντικότερων ιδιοτήτων των μεταλλικών αφρών. Σκοπός των εν λόγω μετρήσεων είναι η συγκέντρωση των κύριων μηχανικών και φυσικών δεδομένων, ώστε να γίνει ολοκληρωμένη έρευνα στα χαρακτηριστικά και στην ποιότητα κατασκευής των κυψελοειδών μεταλλικών υλικών. Εξάλλου, πρόκειται για διαδικασίες και μετρήσεις που ακολουθούνται κατά κόρον κατά την εξέταση όλων των μηχανολογικών εξαρτημάτων.

Γενικά, μπορούμε να διακρίνουμε δύο κατηγορίες μεθόδων χαρακτηρισμού: Καταστροφικές και μη καταστροφικές, ανάλογα με το αν ο αφρός παραμορφώνεται μη αναστρέψιμα ή μεταβάλλεται διαφορετικά ή παραμένει αμετάβλητος ή ελάχιστα μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του χαρακτηρισμού. Σε γενικές γραμμές υπάρχει μεγάλο εύρος μη καταστροφικών μεθόδων, το οποίο χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό υλικών και εξαρτημάτων. Παρακάτω θα αναπτύξουμε μόνο τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την έρευνα των κυψελοειδών μεταλλικών υλικών. [36]

# 3.3 <u>Μη καταστροφικές μέθοδοι</u>

#### Μέτρηση σχετικής πυκνότητας

Η σχετική πυκνότητα αποτελεί το σημαντικότερο μέγεθος για τον χαρακτηρισμό των μεταλλικών αφρών. Εκφράζεται με το πηλίκο της πυκνότητας του αφρώδους υλικού ρ\*, προς την πυκνότητα του μετάλλου από το οποίο είναι φτιαγμένος ο αφρός (υλικό βάσης) ρ<sub>s</sub>. . Η σχετική πυκνότητα επηρεάζει άμεσα το μέγεθος των κυψελών, το πάχος του τοιχώματος και τη διάμετρο του πόρου. Κατά συνέπεια επηρεάζει τις μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του αφρού. Μεγάλη σχετική πυκνότητα αντιπροσωπεύει μεγαλύτερο ποσοστό βασικού υλικού στον όγκο του αφρού και άρα παχύτερα δομικά στοιχεία (ακμές ή έδρες). Κατά συνέπεια, αυτά μπορούν να παραλάβουν μεγαλύτερο φορτίο μέχρι του σημείου της ελαστικής κατάρρευσης. Γενικά, η σχετική πυκνότητα συνήθως βρίσκεται μεταξύ 0,05 και 0,27, οπωσδήποτε όμως κάτω από 0,3 που είναι το όριο για το οποίο το υλικό μεταπίπτει από αφρώδες σε μέταλλο με απομονωμένους πόρους. Εάν το μήκος του κελιού είναι Ι και το πάχος του τοιχώματός του είναι τ και είναι t <<Ι, η σχετική πυκνότητα για αφρούς κλειστού κελιού είναι: [35]

$$\rho^*/\rho = C_s(t/l)$$

όπου Cs είναι μια αριθμητική σταθερά , κοντά στη μονάδα, η οποία εξαρτάται από το σχήμα του κελιού.

Μπορούμε να καθορίσουμε την πυκνότητα ενός πορώδους υλικού ζυγίζοντάς το και μετρώντας τον όγκο, χρησιμοποιώντας την αρχή του Αρχιμήδη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.6. Εάν το προς εξέταση δείγμα δεν έχει κλειστή εξωτερική επιφάνεια, για να εμποδίσουμε την εισχώρηση του υγρού στους πόρους, το επικαλύπτουμε με ένα υλικό, π.χ. με ένα λεπτό στρώμα πολυμερούς. [18,35]



Εικόνα 3.6: Σχηματική απεικόνιση της αρχής του Αρχιμήδη για τη μέτρηση της πυκνότητας [18]

#### Μετρήσεις εμποτισμού με χρώμα

Στην πράξη κατά τη διάρκεια της παραγωγής αφρών, η δομή τους φέρει αρκετές ατέλειες, όπως για παράδειγμα στο στάδιο της ψύξης μετά την αφροποίηση. Τέτοιες ατέλειες μπορούν να περιλαμβάνουν κάποιες τρύπες ή ρωγμές στα τειχία των κελιών ή στην εξωτερική επιφάνεια. Έτσι, με τη βοήθεια αυτής της διαδικασίας θα πρέπει να γίνει επάλειψη με ένα χημικό υγρό στην επιφάνεια του αφρού που εξετάζουμε. Το υγρό τελικά απορροφάται από τις οπές και τις ρωγμές. Μετά και αφού στεγνώσουμε την υπό εξέταση επιφάνεια, επαλείφουμε ένα κατάλληλο βάμμα, το οποίο χρωματίζει την παραμένουσα χημική επίστρωση, η οποία βεβαίως δεν απορροφήθηκε. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να δημιουργηθούν αποτυπώσεις των ατελειών, οι οποίες είναι άμεσα ορατές. [18]

#### Ραδιογραφία και ραδιοσκοπία με ακτίνες-Χ

Τα κυψελοειδή υλικά μπορούν να αποτυπωθούν και με τεχνικές απορρόφησης ακτινών-Χ. Μια δέσμη ακτινών-Χ προσπίπτει στο δείγμα και στη συνέχεια μετρούμε την εξασθένησή της. Επιλέγουμε μια συγκεκριμένη εγκάρσια επιφάνεια και μετρούμε στις δύο διαστάσεις, διαμορφώνοντας δισδιάσταση αποτύπωση του αφρού. [39]

#### Τομογραφία με ακτίνες-Χ

Εικόνες με ακτίνες-Χ λαμβάνονται από ένα μεγάλο αριθμό διευθύνσεων του δείγματος, συνήθως περιστρέφοντάς το. Από τις διάφορες εικόνες λαμβάνουμε την εξασθένηση των ακτινών σε κάθε σημείο του αντικειμένου και με τον τρόπο αυτό η τοπική πυκνότητα καταγράφεται με μαθηματικό τρόπο. Η επιλογή του μεγέθους των δοκιμίων εξαρτάται από τις πληροφορίες που επιθυμούμε να καταγράψουμε.

Η Εικόνα 3.7 παρουσιάζει μια 3D εικόνα υψηλής ανάλυση αφρού από ψευδάργυρο από τομογραφία, οι διαστάσεις του οποίου είναι 5x5x5 mm<sup>3</sup>. [39]



Εικόνα 3.7: 3D εικόνα υψηλής ανάλυσης αφρού ψευδαργύρου [39]

#### 'Ελεγχος με δινορεύματα

Οι αφροί μπορούν να χαρακτηρισθούν από τη σχετική τους πυκνότητα και από το μέγεθος των πόρων, με την πραγματοποίηση μετρήσεων ηλεκτρικής αντίστασης. Ο μη καταστρεπτικός έλεγχος μεταλλικών υλικών με δινορεύματα στηρίζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ εξωτερικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και ύλης. Το προς εξέταση ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό τοποθετείται μέσα σε πηνίο (ή κοντά σ'αυτό), στο οποίο εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, δημιουργώντας έτσι στο εσωτερικό του πηνίου χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Το τελευταίο επάγει στο εσωτερικό του εξεταζόμενου υλικού ρεύματα δημιουργώντας με αυτή της μεταβολής του πεδίου. Τα επαγωγικά αυτά ρεύματα δημιουργούν δευτερογενές μαγνητικό πεδίο, το οποίο αλληλεπιδρά με το αρχικό μαγνητικό πεδίο του πηνίου. Με τον τρόπο αυτό ανιχνεύονται αλλαγές στην ηλεκτρική αγωγιμότητα ή τη μαγνητική διαπερατότητα, λόγω της παρουσίας του εξεταζόμενου υλικού που έχει διαφορετική χημική σύσταση, μικροδομή και ιδιότητες. [35,36]

#### Μέτρηση της απορρόφησης ήχου

Οι ιδιότητες της απορρόφησης του ήχου από μέσης διαμέτρου πόρους συνήθως μετρώνται με το σωλήνα αντίστασης, με τον οποίο πετυχαίνουμε γρήγορες και ακριβείς μετρήσεις. Συνήθως η μέτρηση της εξασθένησης είναι συνάρτηση της συχνότητας (Εικόνα 3.8). Εάν το δείγμα έχει ανοικτό πορώδες, οι καμπύλες της απόσβεσης είναι μετατοπισμένες προς τις χαμηλότερες συχνότητες, όταν το κενό αυξάνει. Ωστόσο, συμπαγή δείγματα και πορώδη δείγματα με κλειστούς πόρους έχουν την ίδια καμπύλη απόσβεσης, εξαρτώμενη από το διάκενο, επειδή ο ήχος δεν μπορεί να διαπεράσει το δείγμα και η απορρόφηση γίνεται στην επιφάνεια. [37]





#### Μέτρηση της ελαστικότητας με ταλάντωση

Το μέτρο του Young και ο παράγοντας της απώλειας του υλικού μπορεί να καταγραφεί με τη βοήθεια της ανάλυσης με ταλάντωση. Στην πιο απλή τεχνική, ένα μακρύ ορθογωνικό δοκίμιο ή ένα λεπτό τετράγωνο φύλλο από το υπό εξέταση υλικό εξαναγκάζεται σε ταλάντωση. Μπορούν να δημιουργηθούν διαμήκεις, εγκάρσιες ή στρεπτικές διεγέρσεις. Οι απορρέουσες ταλαντώσεις συλλέγονται από ένα επαγωγικό πηνίο. Το εύρος των ταλαντώσεων ως συνάρτηση της συχνότητας διεγέρσεως μας δείχνει τις χαρακτηριστικές αιχμές συντονισμού. Οι θέσεις αυτές των αιχμών επιτρέπουν τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας Ε από τις διαστάσεις και τη μάζα του δείγματος. [36,38]

# 3.4 Καταστροφικές μέθοδοι

#### Οπτικές μέθοδοι - Μικροσκοπία

Η μορφολογία του κελιού και η μικροδομή των κυψελοειδών υλικών μπορεί να αναλυθεί με οπτικές παρατηρήσεις σε διάφορες μεγεθύνσεις. Αν και η διαδικασία της ανάλυσης είναι μη καταστροφική, η προετοιμασία του δείγματος συνήθως επιβάλλει την κοπή και το γυάλισμα του δείγματος και για το λόγο αυτό αποτελεί μια μέθοδο καταστροφικού ελέγχου. Μπορούμε να καθορίσουμε τα κελιά ή το μέγεθος της κατανομής των πόρων, χρησιμοποιώντας εμπορικά προγράμματα επεξεργασίας εικόνας. Αυτά τα προγράμματα αναγνωρίζουν τα χαρακτηριστικά κελιά στο επίπεδο της προετοιμασίας. Σημαντικά αποτελέσματα, ωστόσο, είναι αρκετά δύσκολο να αποκτηθούν. Τα τοιχώματα των κελιών και το εσωτερικό των κελιών πρέπει να εμφανίζονται με διαφορετική φωτεινότητα. Μια διαδικασία παραμόρφωσης των μεταλλικών αφρών έχει ερευνηθεί με μια μέθοδο που καλείται «ανάλυση επιφανειακής παραμόρφωσης. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ένα δείγμα αφρού παραμορφώνεται, ενώ συγχρόνως η εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου παρατηρείται συνεχώς με μια κάμερα. Συσχετίζοντας τις αναλύσεις μεταξύ δύο διαδοχικών φωτογραφιών, λαμβάνουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα. [39]

#### Μηχανικές μετρήσεις

Οι μηχανικοί έλεγχοι των κυψελοειδών υλικών είναι προαπαίτηση να έχουν διενεργηθεί πριν από την εφαρμογή τους σε κάθε κατασκευή. Τα αποτελέσματα των μηχανικών μετρήσεων είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη καθορισμένων εφαρμογών ή γενικότερα για τη δημιουργία βάσεων δεδομένων, που χρειάζονται για τη δημιουργία επίλυσης μοντέλων με τα υπολογιστικά συστήματα. [36]

#### Μέτρηση αντοχής σε διάβρωση

Μέχρι σήμερα, δεν υπάρχουν καθιερωμένοι έλεγχοι σε διάβρωση. Συνήθως εφαρμόζουμε μεθόδους ελέγχου από άλλες διαδικασίες, όπως είναι για παράδειγμα οι αντίστοιχοι έλεγχοι στην αυτοκινητοβιομηχανία. Επίπεδα δείγματα τύπου σάντουιτς με πυρήνα από αφρό αλουμινίου χαρακτηρίζονται από ελέγχους, κατά τους οποίους τα δείγματα δοκιμάζονται σε 10 κύκλους των 7 ημερών με 24ώρη έκθεση σε αλατώδες ψεκασμό, 4x24 ώρες σε διάφορα περιβάλλοντα υγρασίας και 48ώρη έκθεση σε θερμοκρασία δωματίου με κανονική υγρασία (23 °C, 50 %). [36]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ιδιότητες και εφαρμογές μεταλλικών <u>αφρών</u>

# 4.1 Γενικά στοιχεία

Οι ιδιότητες των μεταλλικών αφρών εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο παραγωγής τους. Αυτό σημαίνει ότι ένας αφρός που έχει παραχθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους έχει διαφορετικές ιδιότητες, ακόμη και αν έχει προκύψει από το ίδιο κράμα μετάλλων. Οι ιδιότητες που επιθυμούμε από τον τελικό αφρό είναι αυτές που καθορίζουν το αρχικό κράμα και τον τρόπο παραγωγής που θα ακολουθηθεί. Επίσης, οι ιδιότητες των αφρών επηρεάζονται σημαντικά από τις ατέλειες του υλικού. Ακόμη, πολλοί μελετητές θεωρούν τους αφρούς ως διφασικά μίγματα αέριων εγκλεισμάτων μέσα σε μεταλλική δομή, ώστε να εξάγουν συμπεράσματα για την αντοχή τους με βάση απλούστερα μοντέλα. Η πρακτική αυτή όμως οδηγεί σε σημαντικές αποκλίσεις σε σχέση με τις θεωρητικές τιμές. [13]

Κράμα	AI 99,5%	AI 99,5%
Αφριστικός παράγοντας	-	TiH <sub>2</sub>
Πυκνότητα (gr/cm³)	2,7	0,4
Αντοχή στη θλίψη (MPa)	-	3
Απορρόφηση ενέργειας για 30% συμπίεση (kJ/kg)	-	1,8
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	67	2,4
Ηλεκτρική αγωγιμότητα (m/Ω·mm²))	34	2,1
Θερμική αγωγιμότητα (W/m·K)	235	12

Πίνακας 4.1: Ιδιότητες μεταλλικού αφρού Al 99,5% που έχει παραχθεί με δύο διαφορετικές τεχνολογίες [13]

# 4.2 Μηχανικές ιδιότητες

Οι μηχανικές ιδιότητες των μεταλλικών αφρών και γενικά των πορωδών υλικών άρχισαν να μελετώνται από τους Gibson και Ashby [13]. Όταν η κατάρρευση των τοιχωμάτων των κελιών και η πλαστική παραμόρφωση γίνονται ταυτόχρονα, προκύπτει η ιδανική μηχανική συμπεριφορά του μεταλλικού αφρού. Έχει ιδιαίτερη σημασία αν πρόκειται για αφρό με ανοικτούς ή κλειστούς πόρους. Τα ανοικτά κελιά, όταν υφίστανται μονοαξονική συμπίεση, παραμορφώνονται μέσω λυγισμού των ακμών τους. Όταν η τιμή του φορτίου αυξάνεται σημαντικά, τα τοιχώματα των κελιών υφίστανται πλαστική παραμόρφωση. Από την άλλη πλευρά, στα κλειστά

κελιά, συμβαίνει ταυτόχρονη παραμόρφωση των οριζόντιων τμημάτων με λυγισμό και των κατακόρυφων με τάνυση.

Γενικά οι παράγοντες που καθορίζουν τις μηχανικές ιδιότητες των μεταλλικών αφρών είναι [13,14]:

- οι ιδιότητες του μητρικού υλικού και των σωματιδίων που προστίθενται στη μικροδομή
- η μορφολογία και οι διαστάσεις των κελιών του μεταλλικού αφρού
- τη σχετική πυκνότητα και τη βάθμωση του κλάσματος όγκου του μετάλλου των πλευρών του κελιού.

Οι ιδιότητες του μητρικού μετάλλου μπορούν να τροποποιηθούν σημαντικά, αν στη βασική αυτή δομή εισαχθούν τασιενεργά σωματίδια. Τα σωματίδια αυτά μπορούν είτε να αντιδράσουν με το υγρό μέταλλο είτε να παραμείνουν ανενεργά. Στην πρώτη περίπτωση παράγεται στερεό διάλυμα, ενώ στη δεύτερη τα χημικώς ανενεργά σωματίδια συσσωρεύονται μεταξύ των πόρων ή στα τοιχώματα των κελιών. Η μέση διάμετρος των πόρων αυξάνεται [42]. Έχουν μελετηθεί οι πόροι που παρουσιάζουν ανομοιομορφίες [43-45]. Ανομοιομορφίες όπως οι καμπυλώσεις οφείλονται στη διαφορά πίεσης του αερίου μέσα και έξω από τον πόρο, ενώ ανομοιομορφίες όπως οι πτυχώσεις σχετίζονται με τη στερεοποίηση του αφρού και εμφανίζονται κυρίως σε αφρούς χαμηλής πυκνότητας με μεγάλα κελιά [43]. Οι μηχανικές ιδιότητες του μεταλλικού αφρού εξαρτώνται επίσης από τη σχετική πυκνότητα και τη βάθμωσή της μέσα στη μεταλλική δομή. Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (σ-ε) με διαφορετικές πυκνότητας, που απορροφούν το ίδιο έργο παραμόρφωσης.



Εικόνα 4.1: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης μεταλλικών αφρών διαφορετικής πυκνότητας [43]

# 4.2.1 Συμπίεση και απορρόφηση ενέργειας

Η απορρόφηση ενέργειας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα πεδία εφαρμογών και έρευνας των μεταλλικών αφρών. Δύο είναι οι βασικές παράμετροι για τα υλικά απορρόφησης ενέργειας: η ενέργεια απορρόφησης ανά μονάδα μάζας και η τάση στην οποία μπορεί να απορροφηθεί η ενέργεια αυτή. Η ποσότητα της ενέργειας παρουσιάζεται γραφικά από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη τάσηςπαραμόρφωσης (Εικόνα 4.2). [46]



Εικόνα 4.2: Απεικόνιση απορροφούμενης ενέργειας στο διάγραμμα τάσηςπαραμόρφωσης [46]

Η ικανότητα ενός μεταλλικού αφρού να απορροφά ενέργεια εξαρτάται από τη μορφολογία των κελιών, τη σχετική πυκνότητα της δομής, από το όριο αντοχής και από τις διαστάσεις του μεταλλικού αφρού [46]. Σημασία έχει επίσης ο τρόπος επιβολής του φορτίου, αν δηλαδή πρόκειται για στατική ή για δυναμική φόρτιση. Το τυπικό διάγραμμα που προκύπτει από μια δοκιμή θλίψης μπορεί να χωριστεί σε τρία βασικά μέρη. Η μορφή αυτή του διαγράμματος ακολουθείται από τους μεταλλικούς αφρούς και με ανοικτούς και με κλειστούς πόρους. Αρχικά παρουσιάζεται γραμμική αύξηση της παραμόρφωσης με την αύξηση της τάσης, στη συνέχεια η τάση παραμένει αμετάβλητη ενώ η παραμόρφωση αυξάνεται, ενώ στο τελευταίο τμήμα της καμπύλης παρατηρείται πολύ απότομη αύξηση της τάσης. [46]



Παραμόρφωση ε

Εικόνα 4.3: Διάγραμμα δοκιμής συμπίεσης μεταλλικού αφρού [8]

Στο αρχικό στάδιο, η παραμόρφωση δεν είναι μόνο ελαστική, όπως στην περίπτωση των μετάλλων, αλλά παρατηρείται και πλαστική παραμόρφωση. Δηλαδή οι μεταλλικοί αφροί μπορούν να παραμορφωθούν μη αντιστρεπτά ακόμη και σε χαμηλές τιμές τάσης. Στη συνέχεια ακολουθεί το στάδιο της ομογενούς πλαστικής παραμόρφωσης (πλατώ), ενώ το τρίτο τμήμα αντιπροσωπεύει την κατάρρευση των κελιών του αφρού. Ένα κελί καταρρέει όταν τα απέναντι τοιχώματα κάθε κελιού πλησιάζουν και ακουμπούν μεταξύ τους. Όταν πρόκειται για αφρούς με ίδια πυκνότητα και ίδιο μητρικό υλικό, το πλατώ εμφανίζεται σε ίδια περίπου τάση τόσο για τους αφρούς με ανοικτούς όσο και με κλειστούς πόρους. Η τάση πλατώ είναι πολύ σημαντική τιμή για τον μεταλλικό αφρό. [8,9]

Η επιφάνεια του αφρού παίζει σημαντικό ρόλο στις ιδιότητές του. Αν αφαιρεθεί η εξωτερική επιφάνεια, η οποία είναι πιο πυκνή και λειτουργεί ως μέσο σκλήρυνσης, μειώνεται και η αντοχή του αφρού. Το ίδιο ισχύει και για τους σωλήνες που έχουν αφρό αλουμινίου στο εσωτερικό τους. Είναι δύσκολο να πραγματοποιηθούν θερμικές κατεργασίες στους αφρούς, γιατί η θερμική αγωγιμότητά τους είναι χαμηλή και δεν είναι εύκολο να ψυχθεί ομοιόμορφα όλο το υλικό. Επίσης, δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί νερό ως μέσο ψύξης, παρά μόνο πεπιεσμένος αέρας, με αποτέλεσμα να μειώνεται ακόμη ο ρυθμός ψύξης.

Στην Εικόνα 4.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής θλίψης σε σωλήνες διαφορετικής πυκνότητας και με διαφορετικά κραματικά στοιχεία. Τα αποτελέσματα της δοκιμής θλίψης εξαρτώνται από την πυκνότητα του αφρού και το κράμα της μήτρας. Το μήκος του πλατώ αυξάνεται με μείωση της πυκνότητας. Φαίνεται επίσης ότι η τάση πλατώ είναι μικρότερη όταν η πυκνότητα είναι μικρότερη και άρα η τάση πλατώ αυξάνεται με αύξηση της πυκνότητας. [8,9] Επίσης το ποσοστό των κραματικών στοιχείων επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 4.4 παρουσιάζονται χαμηλότερες τιμές στους αφρούς που είναι κατασκευασμένοι από καθαρό αλουμίνιο.



Εικόνα 4.4: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης σε αφρούς αλουμινίου διαφορετικής πυκνότητας και διαφορετικών κραματικών στοιχείων [9]

Στην Εικόνα 4.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής θλίψης για σωλήνες που περιέχουν στο εσωτερικό τους μεταλλικό αφρό και για σωλήνες που είναι κενοί εσωτερικά. Στην περίπτωση των γεμάτων σωλήνων η τάση πλατώ είναι μεγαλύτερη, αλλά και η περιοχή πλατώ του διαγράμματος είναι μεγαλύτερη, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας είναι μεγαλύτερη.



tube with aluminium foam filling, foam density 0.57 g/cm<sup>3</sup>
tube with aluminium foam filling, foam density 0.49 g/cm<sup>3</sup>
tube with former aluminium foam filling, but foamremoved

Εικόνα 4.5: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης για σωλήνες με και χωρίς μεταλλικό αφρό [9]

# 4.2.2 Μέτρο ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας των μεταλλικών αφρών είναι πολύ χαμηλότερο από εκείνο του συμπαγούς μετάλλου. Το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας του αφρού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.6. [18]



Εικόνα 4.6: Συσχέτιση του μέτρου ελαστικότητας με την πυκνότητα του μεταλλικού αφρού [18]

# 4.3 Φυσικές και χημικές ιδιότητες

Σε σχέση με τα συμπαγή μέταλλα, οι μεταλλικοί αφροί έχουν χαμηλότερη ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Αυτό οφείλεται στο ότι σε συγκεκριμένο όγκο είναι πολύ μικρότερη η ποσότητα του μετάλλου, αφού περιλαμβάνει μόνο τα τοιχώματα των κελιών, καθώς ο κενός όγκος καταλαμβάνεται από αέρια. Η αγωγιμότητα μειώνεται ακόμη περισσότερο, καθώς τα μεταλλικά τοιχώματα επικαλύπτονται με στρώμα οξειδίου, το οποίο δεν είναι αγώγιμο. Εκτιμάται ότι η θερμική αγωγιμότητα των αφρών είναι περίπου δέκα φορές χαμηλότερη σε σύγκριση με τα συμπαγή μέταλλα. Οι αφροί μεγαλύτερης πυκνότητας έχουν μεγαλύτερη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η διαστολή του μεταλλικού αφρού προκαλεί ελάχιστη διόγκωση, χωρίς να χάνεται το σχήμα του. Οι ιδιότητες αυτές κάνουν τους μεταλλικούς αφρούς κατάλληλους για μονωτικές εφαρμογές. [9]

Οι αφροί επίσης προσφέρουν εξαιρετικές ηχομονωτικές ιδιότητες. Αυτό οφείλεται στο ότι το ηχητικό κύμα υφίσταται ανακλάσεις στην ακανόνιστη δομή των πόρων του αφρού. Η ενέργεια του κύματος παραμορφώνει ελαφρώς τα τοιχώματα του μεταλλικού αφρού και μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Η ομοιογένεια των πόρων, σύμφωνα με μελέτες ερευνητών, επιδρά θετικά στην απορρόφηση του ήχου. Ακόμη, καλύτερη ηχομονωτική συμπεριφορά παρουσιάζουν οι αφροί με ανοικτούς πόρους. Συγκεκριμένα, ο αφρός Alporas που έχει παραχθεί μέσω έλασης έχει παρόμοιο συντελεστή απορρόφησης ήχου με το γυαλί ή το ξύλο. Επίσης οι μεταλλικοί αφροί είναι άφλεκτοι και δεν εκλύουν τοξικά αέρια κάτω από υψηλή θερμοκρασία. [9]

# 4.4 Εφαρμογές μεταλλικών αφρών

Τα πορώδη μεταλλικά υλικά βρίσκουν ολοένα και περισσότερες εφαρμογές στη βιομηχανία χάρη στο μεγάλο εύρος των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων τους. Είναι δύσκολο να απαριθμήσει κάποιος όλες τις υφιστάμενες και δυνητικές εφαρμογές των μεταλλικών αφρών. Ωστόσο, είναι δυνατός ο εντοπισμός κάποιων, έτσι ώστε να υποδειχθεί το ευρύ φάσμα των συνθηκών υπό τις οποίες οι μεταλλικοί αφροί μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Οι εφαρμογές μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, σε κατασκευαστικές και σε λειτουργικές. Οι κατασκευαστικές εφαρμογές αφορούν φέρουσες κατασκευές, δηλαδή εφαρμογές-κατασκευές που θα φέρουν φορτία, ενώ οι λειτουργικές εφαρμογές έχουν ως στόχο την εκμετάλλευση ιδιαίτερων ιδιοτήτων (θερμικών, ηλεκτρικών, διαπερατότητα κλπ.). [4,11]

# 4.4.1 Κριτήρια επιλογής

Ένα από τα πιο σημαντικά σημεία που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί σε μια πορώδη κατασκευή, δηλαδή το μέταλλο ή το κράμα του. Οι φέρουσες κατασκευές για διάφορα είδη φορτίου πρέπει να είναι χαμηλού βάρους, διαφορετικά θα χρησιμοποιηθούν τα παραδοσιακά μέταλλα ή κράματα. Για το λόγο αυτό αφροί από αλουμίνιο, μαγνήσιο, τιτάνιο ή από άλλο πορώδες μέταλλο προτιμώνται σε τέτοιου είδους εφαρμογές. Ως αποσβεστήρες ενέργειας, οι μεταλλικοί αφροί λόγω της ισότροπης δομής τους μπορούν να παραμορφώνονται ομοιόμορφα σε οποιαδήποτε διεύθυνση επιβολής φορτίου και να δέχονται σημαντική πλαστική παραμόρφωση ανά μονάδα του όγκου τους. Από την άλλη, το τιτάνιο ενδείκνυται για ιατρικές εφαρμογές, εξαιτίας της συμβατότητάς του με τους ιστούς. Επίσης, ο ανοξείδωτος χάλυβας ή το τιτάνιο προτιμάται για αγροτικές εφαρμογές θερμοκρασίες, λόγω της αυξημένης αντοχής τους. [4,11]

Ένα εξίσου κρίσιμο σημείο επιλογής του εκάστοτε υλικού για κάποια εφαρμογή είναι το πορώδες του, μιας και πολλές εφαρμογές απαιτούν τον φορέα να είναι ρευστό και να μπορεί να διέρχεται διαμέσου του πορώδους υλικού. Για το λόγο αυτό απαιτείται η ύπαρξη διαφόρων «ανοιγμάτων», τα οποία να κυμαίνονται από «πολύ ανοικτά» για μεγάλο ρυθμό ροής, μέχρι πλήρως κλειστά για εφαρμογές που δέχονται μεγάλο φορτίο. [11]



Εικόνα 4.7: Κατηγοριοποίηση εφαρμογών πορώδων υλικών σε σχέση με το είδος της εφαρμογής και το άνοιγμα του πορώδους υλικού [18]

# 4.4.2 Κατασκευαστικοί τομείς

#### Βιομηχανία αυτοκινήτων

Οι αυξανόμενες απαιτήσεις για ενεργητική και παθητική ασφάλεια στα οχήματα οδηγεί στην αύξηση του βάρους τους. Ταυτόχρονα η ανάγκη για μείωση του μεγέθους των οχημάτων σε Ευρώπη και Ιαπωνία, χωρίς να μειωθεί το μέγεθος της καμπίνας των επιβατών, επιβάλλει τη μείωση του χώρου για τα μηχανικά μέρη. Αυτό δημιουργεί πρόβλημα απαγωγής θερμότητας. Τέλος, απαιτείται όλο και καλύτερη ακουστική μόνωση χωρίς να υπάρχει περιθώριο για επιπλέον στρώματα μόνωσης. Οι μεταλλικοί αφροί, και κυρίως οι αφροί αλουμινίου, μπορούν να αντιμετωπίσουν αυτά τα ζητήματα [4,48].

Η μείωση του βάρους ξεκινά από τα υλικά κατασκευής, μιας και η χρήση μεταλλικών αφρών σε δομές τύπου σάντουιτς μπορεί να επιτύχει το ελάχιστο βάρος για δεδομένη τιμή δυσκαμψίας. Μέρη όπως τα καπό, οι πόρτες του επιβατικού αλλά και του αποθηκευτικού χώρου μπορούν να κατασκευαστούν από μεταλλικό αφρό μειώνοντας το συνολικό τους βάρος μέχρι και 50% και ταυτόχρονα αυξάνοντας τη δυσκαμψία τους ως και 10 φορές [47]. Η επέκταση της χρήσης μεταλλικού αφρού και σε λοιπά σημεία του οχήματος θα βοηθούσε στη μείωση των συνολικών απαιτούμενων κομματιών άρα και του κόστους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης των μεταλλικών αφρών σε διάφορα σημεία του αυτοκινήτου είναι η Εικόνα 4.8. Παρόμοια, οι μεταλλικοί αφροί μπορούν να βρουν εφαρμογή και

σε τρένα, είτε υπεραστικά είτε κυρίως στα αστικά (τραμ, μετρό) όπου το βάρος και το μέγεθος της κατασκευής παίζει μεγάλο ρόλο στην εμπορική της αξία [4].



Εικόνα 4.8: Εφαρμογή μεταλλικών αφρών στο αμάξωμα ενός Audi A8 [47]

Ένας διαδεδομένος μηχανισμός παθητικής ασφάλειας είναι τα συστήματα απορρόφησης ενέργειας κατά τις συγκρούσεις, όπου γίνεται εκμετάλλευση της πλαστικής, μη αναστρέψιμης ζώνης παραμόρφωσης σωμάτων. Εδώ, οι μεταλλικοί αφροί μπορούν να αποδώσουν καλύτερα από τους πολυμερικούς αφρούς χάρη στη μεγαλύτερη αντοχή τους σε θλίψη, άρα και στη μεγαλύτερη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας [4]. Όσο πιο μεγάλο είναι το πλατώ της δεύτερης ζώνης στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης, τόσο περισσότερη ενέργεια δύναται να απορροφήσει ο μεταλλικός αφρός [48].

Η μόνωση εξωτερικών θορύβων για την άνεση των επιβατών, όπως και η μείωση των θορύβων που παράγονται από τα ίδια τα οχήματα είναι ένα κομμάτι που θα μπορούσαν να συμβάλλουν οι μεταλλικοί αφροί. Δεδομένου ότι είναι ανθεκτικοί στις υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να τοποθετηθούν σε σημεία που π.χ. πολυμερικοί αφροί δε μπορούν, όπως ο χώρος του κινητήρα [4].

#### Δομικά στοιχεία μηχανημάτων

Υπάρχουν μερικές ενδιαφέρουσες εφαρμογές στην κατασκευή στοιχείων μηχανών. Άκαμπτα τμήματα αφρού ή άξονες από αφρό με μειωμένη αδράνεια και αναβαθμισμένη απόσβεση, μπορούν να αντικαταστήσουν τροχαλίες, κυλίνδρους ή δάπεδα από παραδοσιακά υλικά. Τέτοιου είδους υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σταθερά δράπανα ή σε μύλους με τέτοια πιστότητα όπως τα πρωτότυπα.

Περιβλήματα από τρυπάνια χειρός ή μηχανών λειάνσεως, προσφέρουν κάποια πλεονεκτήματα σε αντίθεση με τα παραδοσιακά περιβλήματα στην απόσβεση. Τα αφρώδη μεταλλικά περιβλήματα των ηλεκτρικών συσκευών προσφέρουν μια επιπλέον ηλεκτρομαγνητική ασπίδα στο λειτουργικό φάσμα των υλικών. Ο κατασκευαστικός κορμός των δίσκων λειάνσεως θα μπορούσε επίσης να είναι κατασκευασμένος από αφρό αλουμινίου, με το λειαντικό υλικό να συνευρίσκεται στην περιφέρειά του. Η εγγενής απόσβεση του δίσκου θα μπορούσε να αποτρέψει ανεπιθύμητες ταλαντώσεις και ειδικά το ανοικτό πορώδες θα μπορούσε να αποτελέσει μια «αποθήκη» υλικού απόξεσης. Οι αφροί αλουμινίου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν επίσης και ως υποστήριξη στα κάτοπτρα των τηλεσκοπίων.[11]

#### <u>Αεροδιαστημική βιομηχανία</u>

Ο προσανατολισμός για ελαφριές κατασκευές είναι κοινός για τον αεροδιαστημικό και αυτοκινητοβιομηχανικό τομέα. Στις αεροδιαστημικές εφαρμογές, η αντικατάσταση των ακριβών κατασκευών από κυψελοειδές κόμβους με φύλλα από αφρούς αλουμινίου ή από πλαίσια μεταλλικών αφρών τύπου σάντουιτς θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε καλύτερες εφαρμογές με μικρότερο κόστος. Από τη μια πλευρά επιδιώκεται η μεγάλη στρέβλωση και αντίσταση στην φθορά, ενώ από την άλλη πλευρά ένα σημαντικό πλεονέκτημα των αφρών είναι η ισοτροπία των μηχανικών ιδιοτήτων των πλαισίων και η πιθανότητα σύνθετων κατασκευών χωρίς συγκολλήσεις. Το τελευταίο μας δίνει καλύτερη συμπεριφορά στις περιπτώσεις των πυρκαγιών, όπου είναι ουσιώδης η κατασκευή να συγκρατείται ακέραια όσο το δυνατό περισσότερο. Η Boeing έχει αναπτύξει με τη χρήση της τεχνική της εναπόθεσης της παγίδευσης αερίου μεγάλα πλαίσια τύπου σάντουιτς αφρών από τιτάνιο και πλαίσια τύπου σάντουιτς από αφρούς αλουμινίου για τα ουραία τμήματα των ελικοπτέρων. [48-50]

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα τέτοιου είδους σάντουιτς είναι ότι μπορούν να κατασκευασθούν με καμπυλότητα ακόμη και σε τρισδιάστατες κατασκευές, σε αντίθεση με τις επίπεδες κυψελοειδής κατασκευές. Για το λόγο αυτό πολλοί κατασκευαστές ελικοπτέρων προσπαθούν να χρησιμοποιούν αφρούς αλουμινίου κατά την αντικατάσταση κυψελοειδών εξαρτημάτων. [50]

Επιπλέον εφαρμογές έχουμε σε κατασκευαστικά κομμάτια μέσα σε τουρμπίνες, όπου ο συνδυασμός της ακαμψίας με την αυξανόμενη απόσβεση είναι πολύτιμη. Ασπίδες μεταξύ των διαφόρων βαθμίδων της μηχανής είναι από πορώδες υλικό. Τα πτερύγια της τουρμπίνας κόβονται στο επιθυμητό μήκος μέσα στο κυψελοειδές υλικό κατά τη διάρκεια της πρώτης λειτουργίας και δημιουργούν μια σχεδόν στεγανή αέρια ασπίδα με τον τρόπο αυτό. Στην τεχνολογία του διαστήματος, ο αφρός αλουμινίου χρησιμοποιείται για την απορρόφηση ενέργειας στο σύστημα προσγείωσης του διαστημικού οχήματος και σαν ενίσχυση σε ορισμένα τμήματα δορυφόρων, σε αντικατάσταση υλικών που δημιουργούν προβλήματα στο περιβάλλον του εξωτερικού διαστήματος. Για τις εφαρμογές του διαστήματος χρησιμοποιούμε κράματα αφρού από Li-Mg. Τα κράματα αυτά συνήθως δεν είναι εφαρμόσιμα εξαιτίας της υψηλής αντιδραστικότητας με το περιβάλλον, αλλά είναι πολύ χρήσιμα σε συνθήκες κενού. [49]



Εικόνα 4.9: Πειραματική διάταξη στο NASA Glenn Research Center για την έλεγχο της δυνατότητας μείωσης του θορύβου από το περίβλημα μεταλλικού αφρού [49]

#### Ναυπηγική

Οι ελαφριές κατασκευές έχουν μεγάλη σημασία και στη ναυπηγική. Τα σύγχρονα επιβατικά πλοία μπορούν να κατασκευαστούν εξ'ολοκλήρου από έλαση του αλουμινίου, από φύλλα αλουμινίου και από κυψελοειδή μορφές του αλουμινίου. Για τα μεγάλα πλαίσια αφρών αλουμινίου με πυρήνα αλουμινίου υπάρχει η προσδοκία να πρωταγωνιστήσουν σε μερικές από τις προαναφερθείσες κατασκευές. Εάν τα επίπεδα φύλλα συνδέονται με το κύριο υλικό με ελαστικές συγκολλήσεις πολυουρεθάνης, τότε μπορούμε να περιμένουμε ελαφριές και άκαμπτες κατασκευές με εξαιρετική συμπεριφορά στις αποσβέσεις, ακόμα και στην περιορισμένη εμπειρία στα πλοία. Για τις εφαρμογές στην ναυπηγική, μπορούν να συμπεριληφθούν αφρώδη στοιχεία τύπου σάντουιτς με αποτελεσματικό τρόπο

#### Σιδηροδρομική βιομηχανία

Οι εφαρμογές των μεταλλικών αφρών στη Σιδηροδρομική βιομηχανία, ακολουθεί τις ίδιες αρχές με την αυτοκινητοβιομηχανία όσον αφορά τους τρεις βασικούς τομείς εφαρμογών. Η απορρόφηση ενέργειας είναι ένα βασικό ζήτημα για ελαφριές εφαρμογές των τρένων και των τραμ, που λειτουργούν στις αστικές περιοχές και όπου οι συγκρούσεις με τα οχήματα είναι πιθανές. Τα Ιαπωνικά τρένα έχουν εφοδιαστεί με αφρούς τύπου "Alporas" για να βελτιώσουν την απορρόφηση ενέργειας σε περίπτωση σύγκρουσης. Τα πλεονεκτήματα των αφρών στα κατασκευαστικά στοιχεία ελαφρού βάρους, είναι τα ίδια και στα οχήματα με τη βασική διαφορά ότι οι κατασκευές για τα βαγόνια είναι πολύ μεγαλύτερες. [46,47]

#### Οικοδομικές κατασκευές

Υπάρχει ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών στις οικοδομικές κατασκευές. Καθώς τα μοντέρνα κτίρια κατασκευάζονται από σκυρόδεμα , οι προσόψεις τους επενδύονται με πλαίσια, τα οποία καλύπτουν το σκυρόδεμα και βελτιώνουν την εμφάνιση του κτιρίου. Αυτά τα πλαίσια θα πρέπει να είναι ελαφριά, άκαμπτα και αντιπυρικά. Αρκετά συχνά χρησιμοποιούμε λεπτά φύλλα μαρμάρου ή άλλων διακοσμητικών πετρωμάτων και τα προσαρμόζουμε στους τοίχους των κτιρίων.

Τέτοια υλικά μπορούν να είναι μεταλλικοί αφροί, οι οποίοι αντικαθιστούν τα ακριβά κυψελοειδή υλικά. Τα κάγκελα των μπαλκονιών πρέπει να ικανοποιούν συγκεκριμένους κανονισμούς ασφαλείας. Μερικά από τα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι πολύ βαριά και προβληματικά σε περίπτωση πυρκαγιάς. Εάν θα αντικαθιστούνταν από αφρούς αλουμινίου, πολλά από τα προβλήματα θα λύνονταν. [46,47]

Οι αφροί αλουμινίου ή τα πλαίσια από αφρό θα ήταν χρήσιμα για την ελάττωση της ενέργειας στους ανελκυστήρες. Εξαιτίας της συχνής επιτάχυνσης και επιβράδυνσης και της υψηλής ταχύτητας στους σύγχρονους ανελκυστήρες, οι ελαφριές κατασκευές είναι πολύ σημαντικός παράγοντας. Οι αφροί αλουμινίου είναι πολύ υποσχόμενα υλικά στον τομέα αυτό, επειδή συνδυάζουν απορρόφηση ενέργειας με ακαμψία. Οι ελαφριές πόρτες κλιβάνου και οι θυρίδες εκμεταλλεύονται την σχετικά φτωχή θερμική αγωγιμότητα και την αντίσταση από τη φωτιά, με χαμηλής πυκνότητας αφρό αλουμινίου. Αν και το σημείο τήξεως του αλουμινίου είναι αρκετά χαμηλό (<660°C), οι αφροί αλουμινίου είναι εκπληκτικά σταθεροί όταν εκτίθενται σε φλόγες εξαιτίας της έντονης οξείδωσης κάτω από αυτές τις συνθήκες.

#### Κτιριακές κατασκευές

Ο συνδυασμός χαμηλού βάρους και καλών μηχανικών ιδιοτήτων των μεταλλικών αφρών μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμος στις κατασκευές. Οι δομές τύπου σάντουιτς και στύλοι γεμισμένοι με αφρό μπορούν να αντικαταστήσουν τις μέχρι τώρα πρακτικές [4]. Δοκοί, πλάκες και περιβλήματα μπορούν κάλλιστα να κατασκευάζονται από μεταλλικούς αφρούς. Οι οικοδομικές απαιτήσεις σε αντοχή, κόπωση και λειτουργικότητα μπορούν να καλυφθούν άνετα και να συνδυαστούν με χαμηλό βάρος, αυξημένη απορρόφηση ενέργειας αλλά και μερικές μη κατασκευαστικές ιδιότητες όπως η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και η απορρόφηση κραδασμών. Ιδανικό υλικό για αυτές τις εφαρμογές είναι ο αφρός χάλυβα [50].

# 4.4.3 Λειτουργικοί τομείς

#### Αποσβεστήρες

Εφαρμογές σε συστήματα απόσβεσης κρούσεων προσφέρουν την μεγαλύτερη δυναμική για τη χρήση των μεταλλικών αφρών. Οι δυνατότητες εφαρμογών ποικίλουν, από εφαρμογές σε προφυλακτήρες αυτοκινήτων, προστατευτικά περιβλήματα για εναέριες συσκευές (καταγραφείς συγκρούσεων) έως και κατασκευαστικά μέρη που χρησιμοποιούνται για προσγείωση σε διαστημικά οχήματα. Σε πολλές περιπτώσεις, ο αφρός αλουμινίου έχει αποδειχθεί ένα καλό υλικό απορρόφησης ενέργειας (Εικόνα 4.10). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μπλοκ ασφαλείας σε συστήματα για ανύψωση και μεταφορά. Σε υψηλής ταχύτητας μηχανές λείανσης, η χρήση αφρού αλουμινίου ως αποσβεστήρα ενέργειας για τα προστατευτικά καλύμματα έχει δείξει εξαιρετικά αποτελέσματα. Επίσης, είναι κατάλληλος για το σχηματισμό των ζωνών παραμόρφωσης του αυτοκινήτου μπροστά και πίσω από των χώρο των επιβατών έτσι ώστε να βελτιωθεί η ασφάλειά τους. Αφροί χαλκού πυκνότητας 5 έως 10% έχει παρατηρηθεί ότι έχουν καλύτερες επιδόσεις από το καουτσούκ ως βάσεις αποσβέσεων κρούσεων. [48]



Εικόνα 4.10: Διάχυση ενέργειας στους αποσβεστήρες μεταλλικού αφρού [48]

#### Διαχωρισμός υγρών – Φίλτρα

Υπάρχουν δύο ειδών φίλτρα: αυτά που κατακρατούν και διαχωρίζουν στερεά σωματίδια ή ίνες από ένα υγρό και εκείνα που παγιδεύουν στερεά ή υγρά σωματίδια από αέριο. Παραδείγματα για την πρώτη κατηγορία είναι φίλτρα για καθαρισμό ανακυκλωμένων (λιωμένων) πολυμερών, για απομάκρυνση μαγιάς από την μπύρα ή για μολυσμένο λάδι. Ο δεύτερος τύπος περιλαμβάνει εφαρμογές, όπως φιλτράρισμα diesel καυσαερίων και απομάκρυνση νερού στις αερογραμμές. Κάποια από τα γενικά χαρακτηριστικά τους είναι η πολύ καλή ικανότητα φιλτραρίσματος, ο καλός διαχωρισμός σωματιδίων, η ικανότητα να καθαρίζονται, οι καλές μηχανικές ιδιότητες και η αντίσταση στη διάβρωση [18, 47]. Η Εικόνα 4.11 παρουσιάζει διάφορα είδη φίλτρων για χρήση τους σε ευρύ φάσμα εφαρμογών.



Εικόνα 4.11: Φίλτρα από διάφορα είδη μεταλλικών αφρών [11]

#### Ηλεκτρόδια μπαταριών

Αφροί νικελίου (Ni) χρησιμοποιούνται ήδη ως υποστρώματα ηλεκτροδίων σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες νικελίου-καδμίου (NiCd), μειώνοντας το συνολικό βάρος και αυξάνοντας την πυκνότητα ενέργειας (Εικόνα 4.12) [4, 51]. Η συνήθης πρακτική ήταν η χρήση πλέγματος νικελίου, το οποίο είναι ακριβότερο στην κατασκευή του σε σχέση με τον αφρό νικελίου. Κατ' επέκταση, οι αφροί νικελίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί του πλέγματος νικελίου και στις αλκαλικές κυψέλες καυσίμων (AFC – Alcaline Fuel Cell), η οποία είναι η πιο διαδεδομένη και ανεπτυγμένη τεχνολογία κυψελών καυσίμου. [11]



Εικόνα 4.12: Χρήση αφρών κραμάτων νικελίου σε ηλεκτρόδια μπαταριών [51]

#### Φλογοπαγίδες

Τα κυψελοειδή μέταλλα με υψηλή θερμική αντιδραστικότητα του υλικού των τοιχωμάτων του κελιού μπορούν να σταματήσουν τη διάδοση της φλόγας σε συμπιεσμένα αέρια. Αφροί ανοιχτής κυψελίδας έχουν επιδείξει ικανότητα να αναστέλλουν φλόγα που κινείται με ταχύτητα 500m/s. Ήδη τέτοια εξαρτήματα χρησιμοποιούνται από τον Ελληνικό Στρατό σαν αντιεκρηκτικό υλικό και τοποθετούνται στις δεξαμενές καυσίμων τεθωρακισμένων οχημάτων. Επίσης, μεγάλοι σωλήνες που μεταφέρουν εύφλεκτα αέρια μπορούν να προστατευθούν με τοποθέτηση ενός τέτοιου αφρώδους εξαρτήματος κοντά σε πιθανές εστίες ανάφλεξης, ούτως ώστε αν εμφανιστεί φωτιά, να μην μπορεί να διαδοθεί γρήγορα. [4, 11].

#### Ηλεκτρομαγνητική θωράκιση

Οποιαδήποτε συσκευή λειτουργεί με ηλεκτρικό ρεύμα εκπέμπει ένα μικρό ή μεγαλύτερο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο γύρω της. Σε πολλές εφαρμογές έχουμε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία με υψηλότερες συχνότητες και στον βαθμό που αυτά εκπέμπονται σε κυματική μορφή μπορεί πρόκειται για ραδιοκύματα, όπως για παράδειγμα τα ραδιοφωνικά η τηλεοπτικά σήματα και άλλα [52]. Η ενέργεια αυτή μπορεί να απορροφηθεί από διάφορα υλικά (στην αρχή αυτή βασίζονται οι φούρνοι μικροκυμάτων) μπορεί όμως να απορροφηθεί και από το ανθρώπινο σώμα, και εδώ ακριβώς έγκειται η πιθανότητα να εμφανιστεί κάποιο πρόβλημα στην υγεία μας από την ακτινοβολία που μπορεί δεχθούν οι ιστοί μας και από την θέρμανση που προκαλείται σε τοπικό επίπεδο. Έτσι λοιπόν οι μεταλλικοί αφροί, εξαιτίας της πορώδους δομής τους, έχουν πολύ καλές ιδιότητες απορρόφησης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 4.13. [52]



Εικόνα 4.13: Πορώδες υλικό με δυνατότητα απορρόφησης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [52]

Βιοϊατρικά εμφυτεύματα

Αφροί τιτανίου ή κραμάτων κοβαλτίου-χρωμίου χρησιμοποιούνται σαν ιατρικά και οδοντιατρικά εμφυτεύματα, εξαιτίας της βιοσυμβατότητάς τους, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.14 που παρουσιάζει οδοντιατρικά εμφυτεύματα από αφρό τιτανίου. Παρόλα αυτά, απαιτείται ακόμη αρκετή έρευνα προς αυτή την κατεύθυνση ιδιαίτερα ως προς τον σχεδιασμό τους, ώστε να έχουν τη μέγιστη δυνατή αντοχή στη φθορά και τη βέλτιστη λειτουργικότητα. Επίσης, αφροί μαγνησίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν βιοδιασπώμενα πρόσθετα, δηλαδή αρχικά χρησιμοποιούνται για να στηρίξουν το οστό και μετά, καθώς αυτό μεγαλώνει, απορροφούνται από τον οργανισμό. [11, 53]


Εικόνα 4.14: Οδοντιατρικά εμφυτεύματα από αφρό τιτανίου [53]

#### Εναλλάκτες θερμότητας – Ψυκτικές μηχανές

Μεταλλικοί αφροί με υψηλή θερμική αγωγιμότητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναλλάκτες θερμότητας, με καλύτερη απόδοση και μάλιστα στο ίδιο κόστος σε σχέση με συμβατικούς εναλλάκτες που χρησιμοποιούν πτυχωτές επιφάνειες [26,27]. Θερμότητα μπορεί να απαχθεί από ή να προσδοθεί στον αφρό με τη ροή υγρού ή αερίου μέσα από τους πόρους του, ψύχοντας ή θερμαίνοντας αντίστοιχα τον αφρό. Επειδή η αγωγιμότητα ενός αφρού και η διαπερατότητά του είναι αντιστρόφως ανάλογες, χρειάζεται να βρίσκεται η κατάλληλη ισορροπία μεταξύ των δύο χαρακτηριστικών, αναλόγως με την εκάστοτε εφαρμογή. Η Εικόνα 4.15 παρουσιάζει ένα σωλήνα θερμότητας, στον οποίο έχει γίνει προσθήκη μεταλλικού αφρού για την ενίσχυση της απόδοσής του. [54]

Οι ψύκτρες για μικροηλεκτρονικές συσκευές είναι μία διαδεδομένη χρήση των μεταλλικών αφρών ανοικτού τύπου [56]. Αξιοποιώντας την ηλεκτρική αγωγιμότητα των μεταλλικών αφρών και τη διαπερατότητά τους, έχει προταθεί και η χρήση αφρών για θερμαντικά σώματα. Η ιδέα περιλαμβάνει μεταλλικό αφρό που διαρρέεται από ρεύμα, οπότε όσο πιο μικρή πυκνότητα τόσο μεγαλύτερη αντίσταση, συνεπώς και μεγαλύτερη θερμοκρασία θα αναπτύσσει κατά τη ροή του ρεύματος. Με κατάλληλη ροή αέρα μέσα από τον αφρό μπορεί να απαχθεί αυτή η θερμότητα για θέρμανση χώρων. [55, 56]



Εικόνα 4.15: Σωλήνας θερμότητας με μεταλλικό αφρό για την ενίσχυση της απόδοσής του [57]

#### ► Καταλύτες

Η αποτελεσματικότητα της χρήσης των μεταλλικών αφρών σε αυτόν τον τομέα εξαρτάται από τη μεγάλη επιφάνεια αλληλεπίδρασης μεταξύ καταλύτη και του αερίου ή του υγρού που πρέπει να αντιδράσει. Οι μεταλλικοί αφροί μπορούν να αντικαταστήσουν τους κεραμικούς καταλύτες, γιατί έχουν υψηλή ολκιμότητα και θερμική αγωγιμότητα. Μία τέτοια εφαρμογή είναι για απομάκρυνση οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) από καυσαέρια. Ο αφρός διαποτίζεται με ένα διάλυμα, που περιέχει καταλυτικές ουσίες και μετά από διάφορες κατεργασίες όπως διέλαση, θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες κλπ., δημιουργείται μέσα στην δομή ένα αντιδιαβρωτικό λεπτό φιλμ που παραμένει σταθερό ακόμα και μετά από πολλούς θερμικούς κύκλους. Στην Εικόνα 4.16 παρουσιάζεται μια εξάτμιση, η οποία φέρει καταλύτη από αφρό χαλκού με πολύ καλά χαρακτηριστικά μετάδοσης θερμότητας.[58]



Εικόνα 4.16: Καταλύτης από αφρό χαλκού με υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα [59]

# ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

## 5.1 <u>Εισαγωγή</u>

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε στο πλαίσιο της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, η οποία έχει ως αντικείμενο την παρασκευή μεταλλικών αφρών με την μέθοδο της κονιομεταλλουργίας με τη βοήθεια αφριστικού παράγοντα. Τα πειράματα και οι μετρήσεις έγιναν στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Για λόγους πληρότητας και κατανόησης του πειράματος γίνεται εν συντομία μια υπενθύμιση από την θεωρία των βασικών σταδίων της μεθόδου παραγωγής μεταλλικού αφρού με χρήση κονιομεταλλουργίας και αφριστικού παράγοντα. Αρχικά η μεταλλική σκόνη αναμιγνύεται με τον αφριστικό παράγοντα και το μίγμα που θα προκύψει συμπιέζεται ώστε να δημιουργηθεί ένα πυκνό, ημιτελικό προϊόν που ονομάζεται πρόδρομο δοκίμιο. Μετά τη συμπίεση ακολουθεί θερμική κατεργασία κοντά στο σημείο τήξης της μεταλλικής μήτρας και σε θερμοκρασία απαραιτήτως μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία αποσύνθεσης του αφριστικού παράγοντα, ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία της αφροποίησης. Το στάδιο αυτό στοχεύει στην αποσύνθεση του αφριστικού παράγοντα με σκοπό να εκλυθεί αέριο υδρογόνο, το οποίο θα οδηγήσει στη διόγκωση του υλικού και στην δημιουργία πορώδους δομής με κλειστούς πόρους, δηλαδή στη δημιουργία μεταλλικού αφρού κλειστού τύπου. Η διάρκεια της αφροποίησης ποικίλλει ανάλογα με τη θερμοκρασία και τον όγκο του συμπιεσμένου υλικού και μπορεί να κυμαίνεται από λίγα δευτερόλεπτα ως μερικά λεπτά. Αν το διάστημα αυτό ξεπεραστεί, οι πόροι αναπτύσσονται υπερβολικά και συγχωνεύονται με αποτέλεσμα να καταρρεύσει η δομή. Για την αφροποίηση του αλουμινίου και των κραμάτων του απαιτείται συνήθως ο αφριστικός παράγοντας υδρίδιο του τιτανίου (TiH<sub>2</sub>) σε περιεκτικότητα 0,4%-0,6% κ.β. στο μίγμα. Αντίστοιχα για την αφροποίηση κραμάτων αλουμινίου και ψευδαργύρου χρησιμοποιείται υδρίδιο του ζιρκονίου (ZrH<sub>2</sub>), ενώ για τους χάλυβες χρησιμοποιείται ανθρακικό στρόντιο (SrCO3). Το πορώδες αυτών των μεταλλικών αφρών κυμαίνεται συνήθως από 60% ως 85%. [34]

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι οι <u>σημαντικότεροι παράγοντες</u>, από τους οποίους εξαρτάται η παραπάνω μέθοδος είναι:

- 1) η μορφή και η κοκκομετρία των κόνεων μετάλλου που επιλέγονται
- 2) η περιεκτικότητα κ.β. του αφριστικού παράγοντα στο μίγμα
- 3) η δύναμη συμπίεσης του πρόδρομου δοκιμίου στην πρέσα
- 4) η επιλογή της θερμοκρασίας αφροποίησης στο φούρνο
- 5) ο χρόνος θέρμανσης/παραμονής του δοκιμίου στο φούρνο

Για τις ανάγκες του πείραματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναφέρεται ότι έγιναν με χρονολογική σειρά <u>περιληπτικά</u> τα κάτωθι:

Χρησιμοποιθήκαν 3 σκόνες αλουμινίου διαφορετικής κοκκομετρίας, οι οποίες αναμίχθηκαν με υδρίδιο του τιτανίου (TiH<sub>2</sub>) ως αφριστικό παράγοντα, του οποίου η περιεκτικότητα ήταν <u>σταθερή και ίση με 0,6% κ.β. για όλα τα μίγματα</u> που δημιουργήθηκαν. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η συμπίεση των μιγμάτων σε μονοαξονική πρέσα του εργαστηρίου για την παραγωγή των πρόδρομων δοκιμίων. Σχετικά με την επιλογή της δύναμης συμπίεσης είχε προκύψει, από προηγούμενες μελέτες και πειράματα του εργαστηρίου πάνω σε μεταλλικούς αφρούς, ότι η βέλτιστη δύναμη συμπίεσης είναι τα 500kN. Γι' αυτό το λόγο αποφασίστηκε όλες οι συμπιέσεις του πειράματος να πραγματοποιηθούν με <u>σταθερή δύναμη συμπίεσης τα 500kN</u> στην πρέσα. Έπειτα, τα πρόδρομα δοκίμια οδηγήθηκαν σε επαγωγικό φούρνο για την θέρμανσή τους με σκοπό την αφροποίηση και την ανάπτυξη του πορώδες τους και τέλος, αφού κόπηκαν εγκάρσια σε δισκοτόμο, μελετήθηκαν σε στερεοσκόπιο για την ανάλυση της εσωτερικής μορφολογίας τους.

Οπότε γίνεται κατανοητό ότι η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία προσπάθησε να μελετήσει την επίδραση που έχει στην αφροποίηση ο παράγοντας της επιλογής της μορφής της σκόνης αλουμινίου (παράγοντας 1), της θερμοκρασίας αφροποίησης που επιλέχθηκε να θερμανθεί το δοκίμιο στον φούρνο (παράγοντας 4) αλλά και του χρόνου θέρμανσης/παραμονής στον φούρνο του δοκιμίου (παράγοντας 5), κρατώντας σταθερούς τους παράγοντες 2 και 3, δηλαδή τηρώντας σταθερή την περιεκτικότητα 0,6% κ.β. του αφριστικού παράγοντα TiH<sub>2</sub> και σταθερή την δύναμη συμπίεσης 500kN για όλα τα δοκίμια του πειράματος.

Πιο αναλυτικά οι χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες είναι:

1. Σκόνη λεπτόκοκκου αλουμινίου (fine Al) τύπου APS 7-15 micron από την εταιρία Alfa Aesar καθαρότητας 99,5% με μέγεθος κόκκων 7-15 μm (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1: Η σκόνη λεπτόκοκκου αλουμινίου (fine Al) που χρησιμοποιήθηκε

2. Σκόνη χονδρόκοκκου αλουμινίου (coarse Al) από την εταιρία Alfa Aesar καθαρότητας 99,8% (Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.2: Η σκόνη χονδρόκοκκου αλουμινίου (coarse Al) που χρησιμοποιήθηκε

3. Αλουμίνιο σε μορφή νιφάδων (Al flakes) τύπου APS-11 micron από την εταιρία Alfa Aesar καθαρότητας 99,7% με μέγεθος κόκκων 11 μm (Εικόνα 5.3).



Εικόνα 5.3: Οι νιφάδες αλουμινίου (Al flakes) που χρησιμοποιήθηκαν

4. Σκόνη υδριδίου του τιτανίου (TiH<sub>2</sub>) που χρησιμοποιήθηκε ως αφριστικός παράγοντας από την εταιρία Alpha Aesar καθαρότητας 99% (Εικόνα 5.4).



Εικόνα 5.4: Ο αφριστικός παράγοντας ΤiH2 που χρησιμοποιήθηκε

## 5.2 Ποσότητες υλικών

Πρωταρχικός στόχος ήταν η παρασκευή 3 μιγμάτων επαρκούς ποσότητας από κάθε μία από τις 3 σκόνες αλουμινίου (λεπτόκοκκο Al, χοντρόκοκκο Al και Al flakes) που διέθετε το εργαστήριο με σκοπό την κατασκευή πρόδρομων δοκιμίων, τα οποία όπως προαναφέρθηκε θα θερμανθούν εν συνεχεία σε κατάλληλο επαγωγικό φούρνο του εργαστηρίου για την ανάπτυξη και τη μελέτη του πορώδους τους. Το μίγμα του μεταλλικού αφρού κάθε υλικού προέκυψε από την ανάμιξη της εκάστοτε σκόνης αλουμινίου με το υδρίδιο του τιτανίου (TiH<sub>2</sub>), που χρησιμοποιήθηκε ως παράγοντας αφροποίησης σε <u>σταθερή περιεκτικότητα 0,6% κ.β. για όλα τα μίγματα.</u>

Σύμφωνα με την παραπάνω απαίτηση κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο 3 ξεχωριστά δοχεία, που περιείχαν μίγματα από τις 3 διαφορετικές σκόνες αλουμινίου, με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά γνωρίσματα:

το 1ο δοχείο περιείχε συνολικά 100gr μίγματος <u>λεπτόκοκκου αλουμινίου</u> αναμιγμένο με υδρίδιο του τιτανίου (αναλογικά 99,4gr λεπτόκοκκο Al και 0,6gr TiH<sub>2</sub>) με σκοπό την κατασκευή 9 πρόδρομων δοκιμίων βάρους 10gr έκαστο, διατηρώντας έτσι και 10gr περίσσειας σε περίπτωση φύρας, κυρίως κατά τη μεταφορά του μίγματος της σκόνης στην πρέσα, ή πιθανής αστοχίας κάποιας συμπίεσης.

- το 2ο δοχείο περιείχε συνολικά 25gr μίγματος χονδρόκοκκου αλουμινίου αναμιγμένο με υδρίδιο του τιτανίου (αναλογικά 24,85gr χοντρόκοκκο Al και 0,15gr TiH<sub>2</sub>) με σκοπό την κατασκευή 2 δοκιμίων βάρους 10gr έκαστο, διατηρώντας έτσι και 5gr περίσσειας σε περίπτωση φύρας, κυρίως κατά τη μεταφορά του μίγματος της σκόνης στην πρέσα, ή πιθανής αστοχίας κάποιας συμπίεσης.
- το 3ο δοχείο περιείχε συνολικά 25gr μίγματος <u>νιφάδων αλουμινίου</u> αναμιγμένων με υδρίδιο του τιτανίου (αναλογικά 24,85gr Al flakes και 0,15gr TiH<sub>2</sub>) με σκοπό την κατασκευή 2 δοκιμίων βάρους 10gr έκαστο, διατηρώντας έτσι και 5gr περίσσειας σε περίπτωση φύρας, κυρίως κατά τη μεταφορά του μίγματος της σκόνης στην πρέσα, ή πιθανής αστοχίας κάποιας συμπίεσης.

Για την ακρίβεια της μέτρησης του βάρους στην παρασκευή των 3 μιγμάτων των δοχείων των 3 σκόνων αλουμινίου, την ακριβή ζύγιση της ποσότητας των 10gr κάθε υποψήφιου δοκιμίου σε μορφή σκόνης λίγο πριν εισέλθει στην πρέσα, αλλά και του πρόδρομου δοκιμίου αμέσως μετά την συμπίεση, χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο μια ψηφιακή ζυγαριά μέγιστου μετρήσιμου φορτίου τα 30gr και ακρίβεια ενός χιλιοστού του γραμμαρίου, δηλαδή το 0,001gr (Εικόνα 5.5).



Εικόνα 5.5: Η ψηφιακή ζυγαριά του εργαστηρίου

Στη συνέχεια, κάθε ένα από τα 3 δοχεία τοποθετήθηκε σε κατάλληλο τόρνο του εργαστηρίου (Εικόνα 5.6) για περίπου 30min σε χαμηλές στροφές για να επιτευχθεί η <u>ανάδευση του μίγματος</u> με στόχο την ομογενοποίησή του και κυρίως την ομοιόμορφη κατανομή του αφριστικού παράγοντα TiH<sub>2</sub> στην σκόνη του αλουμινίου.



Εικόνα 5.6: Ο τόρνος του εργαστηρίου στον οποίο πραγματοποιήθηκε η ανάδευση

Αμέσως μετά την ανάδευση των δοχείων, με τη βοήθεια της ψηφιακής ζυγαριάς, όπως προαναφέρθηκε χωρίστηκαν τα μίγματα σε ποσότητες των 10gr λίγο πριν την διαδικασία της συμπίεσης, και κατασκευάστηκαν στην πρέσα 100 τόνων του εργαστηρίου (Εικόνα 5.7), με οδηγό την <u>σταθερή δύναμη συμπίεσης στα 500kN</u> για όλα τα πρόδρομα δοκίμια του πειράματος, συνολικά τα εξής:

- 9 πρόδρομα δοκίμια από λεπτόκοκκο αλουμίνιο (fine Al), τα 1,2...9.
- 2 πρόδρομα δοκίμια από χονδρόκοκκο αλουμίνιο (coarse Al), τα X1 και X2.
- όσον αφορά τις νιφάδες αλουμινίου (Al flakes) δεν ήταν εφικτή η συμπίεση του 1ου κατά σειρά δοκιμίου στα 500kN και μάλιστα παρατηρήθηκε ότι το δοκίμιο κατά την εξόλκυσή του δεν ήταν συμπαγές αλλά είχε καταρρεύσει. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στην ιδιομορφία και την σύσταση της συγκεκριμένης σκόνης, που φαίνεται να βρίσκεται σε μια ημίρρευστη κατάσταση. Ίσως σε μεγαλύτερη δύναμη συμπίεσης (≥600kN) να ήταν εφικτή η κατασκευή κατάλληλου συμπαγούς πρόδρομου δοκιμίου από Al flakes, ώστε να μπορεί να μελετηθεί μελλοντικά αυτό το καινοτόμο υλικό.



Εικόνα 5.7: Πρέσα κονιομεταλλουργίας 100 τόνων του εργαστηρίου

## 5.3 Πρόδρομα Δοκίμια

Με τη βοήθεια ενός μικρόμετρου ακριβείας εκατοστού του χιλιοστού, δηλαδή 0,01mm, του εργαστηρίου, το οποίο παρατίθεται παρακάτω (Εικόνα 5.8) αλλά και της ψηφιακής ζυγαριάς, μετρήθηκαν στα πρόδρομα δοκίμια που κατασκευάστηκαν το πάχος τους (mm), η διάμετρός τους (mm), το βάρος τους (gr) αλλά και η σχετική τους πυκνότητα (%) και τα αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν, όπως τα παρουσιάζει ο Πίνακας 5.1:



Εικόνα 5.8: Το μικρόμετρο του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκε

Δοκίμιο	Πάχος (mm)	Διάμετρος (mm)	Βάρος (gr)	Σχετική Πυκνότητα (%)
1	7,50	25,00	9,848	99,12
2	7,54	25,02	9,933	99,29
3	7,49	25,01	9,888	99,58
4	7,56	25,02	9,968	99,37
5	7,55	25,02	9,973	99,56
6	7,48	25,00	9,831	99,22
7	7,58	25,00	9,942	99,01
8	7,31	25,00	8,947	92,39
9	7,51	25,01	9,940	99,84
X1	7,60	25,01	10,028	99,53
X2	7,55	25,03	10,015	99,89

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά μεγέθη των πρόδρομων δοκιμίων που κατασκευάστηκαν

Η σχετική πυκνότητα (%) υπολογίστηκε με βάση το πηλίκο ρ\*/ ρ<sub>s</sub> (%), όπου:

- ρ\* είναι η πυκνότητα του αφρώδους μεταλλικού υλικού, δηλαδή του πρόδρομου δοκιμίου κυλινδρικής μορφής που προέκυψε μετά την συμπίεση και υπολογίστηκε με βάση τη σχέση ρ\*=m\*/V\*, όπου m\* η μάζα του πρόδρομου δοκιμίου και V\*= (πR²/4)·h, ο κυλινδρικός του όγκος σύμφωνα και με τις μεταβλητές που φαίνονται στην Εικόνα 5.9.
- ρ<sub>s</sub> η πυκνότητα του μετάλλου, από το οποίο είναι φτιαγμένος ο μεταλλικός αφρός (υλικό βάσης), δηλαδή το αλουμίνιο που ως χημικό στοιχείο έχει πυκνότητα ρ<sub>s</sub>=2700kg/m<sup>3</sup>.
- Το πρόδρομο δοκίμιο 8 κατασκευάστηκε τελευταίο εκ των 9 δοκιμίων από σκόνη λεπτόκοκκου αλουμινίου και λόγω φύρας της εναπομείνουσας σκόνης στο δοχείο ζυγίστηκε κατά πολύ χαμηλότερο σε βάρος (8,947gr) σε σχέση με το επιθυμητό (10gr) των προδιαγραφών του πειράματος και γι' αυτό το λόγο απορρίφθηκε από το υπόλοιπο της πειραματικής διαδικασίας.
- Τα πρόδρομα δοκίμια X1 και X2 κατασκευάστηκαν από σκόνη χονδρόκοκκου αλουμινίου, γι' αυτό έχουν χρωματιστεί με πράσινο χρώμα στον Πίνακα 5.1, ώστε να διαφέρουν από τα 1,2...9 που ήταν από λεπτόκοκκο αλουμίνιο.

Παρακάτω φαίνεται η κυλινδρική μορφή των δοκιμίων μετά την συμπίεσή τους στην πρέσα του εργαστηρίου:



Εικόνα 5.9: Σχηματική απεικόνιση των διαστάσεων του κυλινδρικού δοκιμίου

Στη συνέχεια του πειράματος, μεταφέρθηκαν τα υπόλοιπα 10 πρόδρομα δοκίμια (πλην του 8 που απορρίφθηκε) στον επαγωγικό φούρνο Osmund του Εργαστηρίου Χύτευσης του τομέα, όπου με τη βοήθεια του παρακάτω ρυθμιστή θερμοκρασίας που φαίνεται στην Εικόνα 5.10, έγινε εφικτή η επιλογή της εκάστοτε επιθυμητής θερμοκρασίας αφροποίησης με σκοπό την δημιουργία του πορώδους των δοκιμίων.

Οι θερμοκρασίες αφροποίησης που επιλέχθηκαν με βάση προηγούμενες μελέτες και πειράματα του εργαστηρίου σε μεταλλικούς αφρούς ήταν:

- 650°C
- 700 °C
- 750 °C
- 800 °C.



Εικόνα 5.10: Ρυθμιστής θερμοκρασίας επαγωγικού φούρνου Osmund



Εικόνα 5.11: Ο επαγωγικός φούρνος Osmund του εργαστηρίου (αριστερά), Η ταμπέλα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φούρνου (δεξιά)

Όπως φαίνεται και παραπάνω στην Εικόνα 5.11, έχει τοποθετηθεί μια τετράποδη κάμερα σε απόσταση περίπου μισού μέτρου από την κεντρική οπή του φούρνου για την καταγραφή σε βίντεο της διαδικασίας της αφροποίησης των δοκιμίων. Η οπή αυτή έχει καλυφθεί με πυρίμαχο γυαλί για την αποφυγή καταστροφής του φακού της κάμερας λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, στην οποία αυτός εκτίθεται όντας πολύ κοντά στον φούρνο, αλλά επίσης και για την ελαχιστοποίηση των θερμοκρασιακών απωλειών από τον φούρνο προς τα έξω μέσω της οπής.



Εικόνα 5.12: Το πυρίμαχο γυαλί που τοποθετήθηκε στη κεντρική οπή του φούρνου

## 5.4 Πειραματικές συνθήκες

Αρχικά εκτελέστηκε η <u>πρώτη σειρά πειραμάτων αφροποίησης</u> με την βοήθεια των 6 εκ των 10 διαθέσιμων πρόδρομων δοκιμίων, τα οποία θερμάνθηκαν σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και για συγκεκριμένο χρόνο μέσα στον επαγωγικό φούρνο Osmund. Ο κύριος στόχος της μελέτης των δοκιμίων αυτών ήταν η ανάλυση και η παρακολούθηση των <u>σταδίων της αφροποίησης</u> του κάθε δοκιμίου ξεχωριστά με τη βοήθεια της κάμερας και η εύρεση του <u>βέλτιστου χρόνου εξόδου (t<sub>opt</sub>)</u> για το κάθε δοκίμιο, ώστε να αναχθούν στην πορεία συμπεράσματα για τις 2 σκόνες αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκαν (λεπτόκκοκο και χονδρόκοκκο Al).

Ως t<sub>opt</sub> ορίστηκε ο χρόνος στον οποίο θα εμφανιζόταν η <u>καλύτερη δυνατή διόγκωση</u> του εκάστοτε δοκιμίου κατά την παραμονή του στο φούρνο σε συγκεκριμένη θερμοκρασία αφροποίησης και θα σημειωνόταν ως εκ τούτου και η <u>μέγιστη δυνατή</u> <u>τιμή του πορώδους του</u>. Στη συνέχεια, με την βοήθεια του t<sub>opt</sub>, που υπολογίστηκε πιο αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο μέσω των προγραμμάτων ImageJ και BSplayer, πραγματοποιήθηκαν 4 νέα πειράματα στον φούρνο με τα 4 εναπομείναντα δοκίμια, των οποίων όμως ο χρόνος παραμονής τους στον φούρνο <u>ταυτιζόταν με τον βέλτιστο χρόνο t<sub>opt</sub> από την ανάλυση της πρώτης σειράς</u> πειραμάτων. Με αυτό τον τρόπο επιτεύχθηκε η μέγιστη δυνατή διόγκωση και το μέγιστο δυνατό πορώδες των 4 δοκιμίων με στόχο την μελέτη της μικροδομής τους.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται με χρονολογική σειρά τα πειράματα των 6 δοκιμίων που θερμάνθηκαν στον επαγωγικό φούρνο του εργαστηρίου:

Δοκίμιο	Θερμοκρασία Αφροποίησης (°C)	Χρόνος παραμονής στον φούρνο (min)
1	750	10
X1	750	10
2	800	10
X2	800	10
3	700	20
4	650	45

Πίνακας 5.2: Πειραματικές συνθήκες των 6 πρώτων δοκιμίων στο φούρνο

#### <u>Κοπή δοκιμίων</u>

Μετά την έξοδό τους από τον φούρνο, τα δοκίμια αφέθηκαν να ψυχθούν φυσικά στον ατμοσφαιρικό αέρα για ένα επαρκές χρονικό διάστημα, που διήρκησε περίπου 30min, ώστε να μπορέσει στη συνέχεια να πραγματοποιηθεί η εγκάρσια κοπή τους με τη βοήθεια της δισκοτόμου του εργαστηρίου (Εικόνα 5.13). Με αυτό τον τρόπο, έχοντας δηλαδή ουσιαστικά κόψει κάθε δοκίμιο στα δύο με τη δισκοτόμο, υλοποιήθηκε σε επόμενο στάδιο η φωτογράφηση της εσωτερικής τους δομής, αφού πρώτα προηγήθηκε ο καθαρισμός και το στέγνωμά των εσωτερικών επιφανειών των δοκιμίων από τα λιπαντικά υγρά της δισκοτόμου. Έτσι, για κάθε δοκίμιο πλέον ήταν εφικτή η αναλυτική παρατήρηση της μικροδομής και της εσωτερικής του.



Εικόνα 5.13: Η δισκοτόμος του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκε

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: <u>Παρουσίαση και σχολιασμός</u> <u>αποτελεσμάτων</u>

### 6.1 Τελικά δοκίμια

Στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζονται τα <u>6 δοκίμια της πρώτης σειράς</u> <u>πειραμάτων</u>, που προέκυψαν έπειτα από αφροποίηση στον επαγωγικό φούρνο Osmund και ύστερα από την κοπή τους στη δισκοτόμο του εργαστηρίου. Μέσω των εικόνων χαρακτηριστικά παρέχεται η δυνατότητα παρακολούθησης της εσωτερικής τους δομής καθώς και του μεγέθους των σχηματισμένων κυψελίδων τους. Υπενθυμίζεται ξανά από την προηγούμενη ενότητα ότι τα δοκίμια 1 ως 4 παρακάτω είναι από λεπτόκοκκο Al, ενώ τα X1 και X2 αποτελούνται από χονδρόκοκκο Al.



Εικόνα 6.1: Εσωτερική μορφολογία δοκιμίου 1



Εικόνα 6.2: Εσωτερική μορφολογία δοκιμίου 2



Εικόνα 6.3: Εσωτερική μορφολογία δοκιμίου 3



Εικόνα 6.4: Εσωτερική μορφολογία δοκιμίου 4



Εικόνα 6.5: Εσωτερική μορφολογία δοκιμίου Χ1



Εικόνα 6.6: Εσωτερική μορφολογία δοκιμίου Χ2

## 6.2 Ανάλυση βίντεο και εύρεση βέλτιστου χρόνου

Το επόμενο βήμα ήταν η επεξεργασία των βίντεο, τα οποία τραβήχτηκαν μέσω της κάμερας που υπήρχε στο Εργαστήριο της Χύτευσης του τομέα για την καταγραφή των δοκιμίων κατά τη διάρκεια της θέρμανσής τους στο φούρνο. Όπως προαναφέρθηκε, σκοπός της ανάλυσης της διαδικασίας αφροποίησης των δοκιμίων ήταν η εύρεση της βέλτιστης χρονικής στιγμής t<sub>opt</sub>, στην οποία πρέπει να εξέλθουν τα δοκίμια από τον φούρνο, ώστε να έχει εμφανιστεί η μέγιστη δυνατή διόγκωσή τους και άρα το μέγιστο δυνατό πορώδες. Η ανάλυση των βίντεο είναι 720x576 pixels και η επεξεργασία τους έγινε με το <u>πρόγραμμα προβολής βίντεο BSplayer</u>, το οποίο παρείχε τη δυνατότητα παραγωγής <u>4x4 καρέ μικρογραφιών</u>, τα οποία παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικότερα στιγμιότυπα των δοκιμίων κατά τη διάρκεια της αφροποίησής τους μέσα στον επαγωγικό φούρνο Osmund.

Αμέσως μετά έγινε επεξεργασία των εικόνων των μικρογραφιών που λήφθηκαν από το πρόγραμμα BSplayer. Για την ανάγκη της ανάλυσης των καρέ επιλέχθηκε το <u>πρόγραμμα επεξεργασίας εικόνων Imagel</u>, με το οποίο υπολογίστηκε το εμβαδόν του εκάστοτε δοκιμίου σε κάθε χρονική στιγμή.

Πιο αναλυτικά, αφού έγινε εισαγωγή της εκάστοτε μικρογραφίας στιγμιότυπου στο ImageJ, σχεδιάστηκε το περίγραμμα του δοκιμίου, του οποίου η λήψη από την κάμερα ήταν σε πρόοψη και υπολογίστηκε στη συνέχεια το εμβαδό του (mm<sup>2</sup>) σε κάθε χρονική στιγμή, δηλαδή το εμβαδόν του σε <u>16 συνολικά στιγμιότυπα</u>.

Όπως παρατίθεται χαρακτηριστικά στους παρακάτω πίνακες εμβαδού-χρόνου, υπολογίστηκε το <u>αρχικό εμβαδόν (A<sub>o</sub>)</u> κάθε δοκιμίου στο ξεκίνημα της θερμικής του κατεργασίας στον επαγωγικό φούρνο με τη βοήθεια του 1ου καρέ και ομοίως υπολογίστηκαν και οι υπόλοιπες τιμές του εμβαδού του (A) σε κάθε επόμενη χρονική στιγμή. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο χρόνος που μεσολαβεί από την έναρξη του βίντεο μέχρι το 1ο καρέ, ο χρόνος από το 1ο μέχρι το 2ο καρέ κ.ο.κ. επιλέχθηκε αυτόματα από το BSplayer να είναι σταθερός και ίσος με το 1/16 του συνολικού χρόνου διάρκειας του βίντεο. Επίσης, με βάση το αρχικό εμβαδόν υπολογίστηκε σε επόμενο στάδιο το <u>ανηγμένο εμβαδόν</u> για κάθε ένα από τα δοκίμια σε κάθε χρονική στιγμή, δηλαδή υπολογίστηκε το <u>A/A<sub>o</sub></u> έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερη αντίληψη και εικόνα της <u>σχετικής διόγκωσης του δοκιμίου</u> καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας.

Με βάση αυτά τα δεδομένα κατασκευάστηκαν στη συνέχεια τα ακόλουθα διαγράμματα που δείχνουν τη συσχέτιση του ανηγμένου εμβαδού του εκάστοτε δοκιμίου σε συνάρτηση με το χρόνο, με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου χρόνου t<sub>opt</sub>, στον οποίο παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη διόγκωση του κάθε δοκιμίου.

## 6.2.1 Μικρογραφίες και διαγράμματα δοκιμίων



#### <u>Δοκίμιο 1</u>

Εικόνα 6.7: Μικρογραφίες στιγμιότυπων του δοκιμίου 1 μέσα στο φούρνο

	[mm <sup>2</sup> ]		[sec]
A <sub>0</sub>	182,536	t <sub>o</sub>	35
A <sub>1</sub>	188,875	t1	70
A <sub>2</sub>	212,419	t <sub>2</sub>	105
A <sub>3</sub>	224,062	t3	140
A <sub>4</sub>	269,987	t <sub>4</sub>	176
A <sub>5</sub>	294,308	t <sub>5</sub>	211
A <sub>6</sub>	346,313	t <sub>6</sub>	246
A <sub>7</sub>	407,115	t <sub>7</sub>	281
A <sub>8</sub>	518,111	t <sub>8</sub>	316
A <sub>9</sub>	507,762	t9	352
A <sub>10</sub>	504,916	t <sub>10</sub>	387
A <sub>11</sub>	498,448	t <sub>11</sub>	422
A <sub>12</sub>	487,063	t <sub>12</sub>	457
A <sub>13</sub>	474,644	t <sub>13</sub>	492
A <sub>14</sub>	472,445	t <sub>14</sub>	528
A <sub>15</sub>	467,658	t <sub>15</sub>	563

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, με κίτρινο χρώμα έχει χρωματιστεί η μέγιστη διόγκωση που επιτεύχθηκε κατά την θέρμανση, οπότε ο <u>βέλτιστος χρόνος</u> παραμονής στον επαγωγικό φούρνο του <u>δοκιμίου 1 είναι 316sec ή 5:16min</u>.



Διάγραμμα 6.1: Συσχέτιση του ανηγμένου εμβαδού με το χρόνο παραμονής στο φούρνο του δοκιμίου 1

#### Δοκίμιο Χ1



Μέγεθος: 653 MiB (685211648 bytes) Μέγεθος ταινίας: 720x576 @ 50 Διάρκεια: 00:09:53

Εικόνα 6.8: Μικρογραφίες στιγμιότυπων του δοκιμίου Χ1 μέσα στο φούρνο

	[mm <sup>2</sup> ]		[sec]
A <sub>0</sub>	185,012	t <sub>o</sub>	34
A <sub>1</sub>	187,905	t <sub>1</sub>	69
A <sub>2</sub>	190,203	t <sub>2</sub>	104
A <sub>3</sub>	221,478	t3	139
A <sub>4</sub>	242,966	t4	174
A <sub>5</sub>	274,605	t₅	209
A <sub>6</sub>	305,162	t <sub>6</sub>	244
A <sub>7</sub>	355,188	t <sub>7</sub>	279
A <sub>8</sub>	423,376	t <sub>8</sub>	314
A <sub>9</sub>	437,935	t <sub>9</sub>	349
A <sub>10</sub>	422,115	t <sub>10</sub>	384
A <sub>11</sub>	417,192	t <sub>11</sub>	419
A <sub>12</sub>	411,299	t <sub>12</sub>	454
A <sub>13</sub>	401,746	t <sub>13</sub>	488
A <sub>14</sub>	394,263	t <sub>14</sub>	523
A <sub>15</sub>	387,773	t <sub>15</sub>	558

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, με κίτρινο χρώμα έχει χρωματιστεί η μέγιστη διόγκωση που επιτεύχθηκε κατά την θέρμανση, οπότε ο βέλτιστος χρόνος παραμονής στον επαγωγικό φούρνο του δοκιμίου X1 είναι 349sec ή 5:49min.



Διάγραμμα 6.2: Συσχέτιση του ανηγμένου εμβαδού με το χρόνο παραμονής στο φούρνο του δοκιμίου Χ1

#### <u>Δοκίμιο 2</u>



Εικόνα 6.9: Μικρογραφίες στιγμιότυπων του δοκιμίου 2 μέσα στο φούρνο

	[mm <sup>2</sup> ]		[sec]
A <sub>0</sub>	185,618	t <sub>o</sub>	34
A <sub>1</sub>	220,061	t <sub>1</sub>	69
A <sub>2</sub>	351,912	t <sub>2</sub>	104
A <sub>3</sub>	470,881	t3	139
A <sub>4</sub>	537,661	t <sub>4</sub>	173
A <sub>5</sub>	484,026	t5	208
A <sub>6</sub>	472,327	t <sub>6</sub>	243
A <sub>7</sub>	452,477	t <sub>7</sub>	278
A <sub>8</sub>	428,025	t <sub>8</sub>	312
A <sub>9</sub>	411,199	t9	347
A <sub>10</sub>	407,912	t <sub>10</sub>	382
A <sub>11</sub>	401,603	t <sub>11</sub>	417
A <sub>12</sub>	387,011	t <sub>12</sub>	451
A <sub>13</sub>	384,513	t <sub>13</sub>	486
A <sub>14</sub>	382,936	t <sub>14</sub>	521
A <sub>15</sub>	372,682	t <sub>15</sub>	556

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, με κίτρινο χρώμα έχει χρωματιστεί η μέγιστη διόγκωση που επιτεύχθηκε κατά την θέρμανση, οπότε ο <u>βέλτιστος χρόνος</u> παραμονής στον επαγωγικό φούρνο του <u>δοκιμίου 2 είναι 173sec ή 2:53min</u>.



Διάγραμμα 6.3: Συσχέτιση του ανηγμένου εμβαδού με το χρόνο παραμονής στο φούρνο του δοκιμίου 2

#### <u>Δοκίμιο Χ2</u>



Εικόνα 6.10: Μικρογραφίες στιγμιότυπων του δοκιμίου Χ2 μέσα στο φούρνο

	[mm <sup>2</sup> ]		[sec]
A <sub>0</sub>	185,231	t <sub>o</sub>	35
A <sub>1</sub>	187,757	t <sub>1</sub>	71
A <sub>2</sub>	190,058	t <sub>2</sub>	106
A <sub>3</sub>	193,532	t <sub>3</sub>	142
A <sub>4</sub>	197,285	t <sub>4</sub>	178
A <sub>5</sub>	208,711	t5	213
A <sub>6</sub>	332,277	t <sub>6</sub>	249
A <sub>7</sub>	397,263	t <sub>7</sub>	285
A <sub>8</sub>	394,891	t <sub>8</sub>	320
A <sub>9</sub>	392,045	t <sub>9</sub>	356
A <sub>10</sub>	384,936	t <sub>10</sub>	392
A <sub>11</sub>	376,391	t <sub>11</sub>	427
A <sub>12</sub>	360,027	t <sub>12</sub>	463
A <sub>13</sub>	353,873	t <sub>13</sub>	499
A <sub>14</sub>	344,405	t <sub>14</sub>	534
A <sub>15</sub>	341,053	t <sub>15</sub>	570

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, με κίτρινο χρώμα έχει χρωματιστεί η μέγιστη διόγκωση που επιτεύχθηκε κατά την θέρμανση, οπότε ο βέλτιστος χρόνος παραμονής στον επαγωγικό φούρνο του δοκιμίου X2 είναι 285sec ή 4:45min.



Διάγραμμα 6.4: Συσχέτιση του ανηγμένου εμβαδού με το χρόνο παραμονής στο φούρνο του δοκιμίου Χ2



#### <u>Δοκίμιο 3</u>

Εικόνα 6.11: Μικρογραφίες στιγμιότυπων του δοκιμίου 3 μέσα στο φούρνο

	[mm <sup>2</sup> ]		[sec]
A <sub>0</sub>	185,055	t <sub>o</sub>	70
A <sub>1</sub>	185,055	t <sub>1</sub>	140
A <sub>2</sub>	197,65	t <sub>2</sub>	210
A <sub>3</sub>	209,277	t3	280
A <sub>4</sub>	230,834	t4	350
A <sub>5</sub>	248,516	t₅	420
A <sub>6</sub>	269,589	t <sub>6</sub>	490
A <sub>7</sub>	271,527	t <sub>7</sub>	560
A <sub>8</sub>	275,16	t <sub>8</sub>	630
A <sub>9</sub>	277,433	t9	700
A <sub>10</sub>	279,52	t <sub>10</sub>	770
A <sub>11</sub>	283,88	t <sub>11</sub>	840
A <sub>12</sub>	297,444	t <sub>12</sub>	910
A <sub>13</sub>	321,424	t <sub>13</sub>	980
A <sub>14</sub>	333,05	t <sub>14</sub>	1050
A <sub>15</sub>	343,466	t <sub>15</sub>	1120

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, με κίτρινο χρώμα έχει χρωματιστεί η μέγιστη διόγκωση που επιτεύχθηκε κατά την θέρμανση, οπότε ο <u>βέλτιστος χρόνος</u> παραμονής στον επαγωγικό φούρνο του <u>δοκιμίου 3 είναι 1120sec ή 18:40min</u>. Το συγκεκριμένο δοκίμιο συνέχισε να διογκώνεται σε όλο το διάστημα των 20min και πιθανώς να απαιτούσε περισσότερο χρόνο παραμονής στο φούρνο για να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή αφροποίηση και το μέγιστο δυνατό πορώδες του.



Διάγραμμα 6.5: Συσχέτιση του ανηγμένου εμβαδού με το χρόνο παραμονής στο φούρνο του δοκιμίου 3

#### Δοκίμιο 4

00:01:48	00:03:37	00:05:26	00:07:15
00:09:04	00:10:53	00:12:42	00:14:31
00:16:20	00:18:09	00:19:58	00:21:47
00:23:36	00:25:25	00:27:14	00:29:03
7ο-4-a.MPG Μέγεθος: 2036 MiB (2135160832 byt Μέγεθος ταινίας: 720x576 @ 50 Διάρκεια: 00:30:52	es)		▶ <b>35</b> .player
Εικόνα 6.12: Μικρογρ	οαφίες στιγμιότυπων το	ου δοκιμίου 4 μέσα στο φ	οούρνο - α' μέρος
00:00;51	00:01:43	00:02:35	00:03:27

00:00:51	00:01:43	00:02:35	00:03:27
00:04:18	00:05:10	00:06:02	00:06:54
00:07:45	00:08:37	00:09:29	00:10:21
00:11:12	00:12:04	00:12:56	00:13:48
7ο-4-b.MPG Μέγεθος: 973 MiB (102 Μέγεθος ταινίας: 720x8 Διάρκεια: 00-14:39	0397568 bytes) 576 @ 25		▶ <b>25</b> .player

Εικόνα 6.13: Μικρογραφίες στιγμιότυπων του δοκιμίου 4 μέσα στο φούρνο - β' μέρος

Το δοκίμιο 4 θερμάνθηκε στους 650°C στον φούρνο, όμως δεν είχαν κάποια πρακτική σημασία τα αποτελέσματά του, μιας και σε 45min κατάφερε να διογκωθεί ελάχιστα με αποτέλεσμα την εμφάνιση <u>ενός μόνο ενιαίου πόρου</u> στο κέντρο του.

## 6.3 Σύγκριση διαγραμμάτων δοκιμίων

Στην παρούσα ενότητα σχεδιάστηκαν και παρουσιάστηκαν τα διαγράμματα συσχέτισης δοκιμίων, στα οποία έγινε ουσιαστικά σύγκριση και αναλυτικός σχολιασμός των καμπυλών των ανηγμένων εμβαδών, δηλαδή των διογκώσεων των 6 δοκιμίων που εξετάστηκαν στην πρώτη σειρά πειραμάτων προηγουμένως.

Πιο συγκεκριμένα παρατίθενται διαγράμματα, τα οποία συσχετίζουν τα εξής:

- τα 4 δοκίμια κατασκευασμένα από fine Al σε διαφορετικές θερμοκρασίες.
- τα 2 δοκίμια που θερμάνθηκαν στην θερμοκρασία των 750°C αλλά είναι κατασκευασμένα από διαφορετικό υλικό (fine Al και χονδρόκοκκο Al).
- τα 2 δοκίμια που θερμάνθηκαν στην θερμοκρασία των 800°C αλλά είναι κατασκευασμένα από διαφορετικό υλικό (fine Al και χονδρόκοκκο Al).



Διάγραμμα 6.6: Συσχέτιση των καμπυλών των 4 δοκιμίων από fine Al, που θερμάνθηκαν σε διαφορετική θερμοκρασία αφροποίησης στο φούρνο

Στο παραπάνω διάγραμμα συσχέτισης των 4 δοκιμίων από fine Al, τα οποία θερμάνθηκαν σε διαφορετικές θερμοκρασίες αφροποίησης, ως χρονικός ορίζοντας για τη σύγκριση των δοκιμίων επιλέχθηκε το χρονικό διάστημα των 10min, δηλαδή ο συντομότερος από όλους τους χρόνους παραμονής των δοκιμίων στο φούρνο, ο οποίος ταυτίζεται με εκείνους των δοκιμίων 1 και 2. Από το διάγραμμα αυτό προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- στο δοκίμιο 2 εμφανίστηκε η μέγιστη τιμή διόγκωσης συγκριτικά με τα υπόλοιπα δοκίμια, η οποία πλησίασε το τριπλάσιο του αρχικού του όγκου.
- η αύξηση της θερμοκρασίας αύξησε την ταχύτητα αφροποίησης, δηλαδή μείωσε το χρόνο εμφάνισης της μέγιστης διόγκωσης, όπως αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά από την κλίση των καμπυλών των δοκιμίων 1 και 2. Πιο συγκεκριμένα, η καμπύλη του δοκιμίου 2 στους 800°C έχει πιο απότομη κλίση από την καμπύλη του δοκιμίου 1 στους 750°C.
- στο δοκίμιο 2 παρουσιάστηκε, μετά τη χρονική στιγμή της μέγιστης διόγκωσης, ταχύτερη και μεγαλύτερη μείωση του όγκου σε σχέση με το δοκίμιο 1. Ειδικότερα, ο όγκος του δοκιμίου 2 ήταν διπλάσιος του αρχικού, ενώ ο όγκος του δοκιμίου 1 ήταν δυόμιση φορές μεγαλύτερος του αρχικού κατά την έξοδό τους από τον επαγωγικό φούρνο.
- το δοκίμιο 4 παρουσίασε ουσιαστικά μηδενική διόγκωση στα 10min.
- στα δοκίμια 1 και 2 η διαφορά της μέγιστης διόγκωσης ήταν σχεδόν αμελητέα για τις 2 διαφορετικές θερμοκρασίες αφροποίησής τους.



Διάγραμμα 6.7: Συσχέτιση των καμπυλών των δοκιμίων 1 και Χ1 διαφορετικού υλικού, που θερμάνθηκαν σε ίδια θερμοκρασία αφροποίησης στο φούρνο

Από το παραπάνω διάγραμμα συσχέτισης των δοκιμίων 1 και X1 , τα οποία θερμάνθηκαν στην ίδια θερμοκρασία αφροποίησης (750°C), προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- τα 2 δοκίμια παρουσίασαν ουσιαστικά παραπλήσια συμπεριφορά καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας αφροποίησής τους στον φούρνο.
- στο δοκίμιο 1 παρατηρήθηκε μεγαλύτερη μέγιστη διόγκωση συγκριτικά με το δοκίμιο X1, η οποία πλησίασε το τριπλάσιο του αρχικού του όγκου. Στο δοκίμιο X1 από την άλλη μεριά, ο μέγιστος όγκος ήταν περίπου δυόμιση φορές μεγαλύτερος του αρχικού του, δηλαδή το δοκίμιο X2 από χονδρόκκοκο Al διογκώθηκε λιγότερο σε σχέση με το δοκίμιο 1 από λεπτόκοκκο Al.
- κατά την έξοδό τους από το φούρνο στα 10min, ο όγκος του δοκιμίου 1 ήταν δυόμιση φορές μεγαλύτερος του αρχικού, ενώ ο όγκος του δοκιμίου X1 ήταν περίπου δύο φορές μεγαλύτερος του αρχικού, επομένως ο ρυθμός μείωσης του όγκου ήταν περίπου σταθερός και για τα 2 δοκίμια.



Διάγραμμα 6.8: Συσχέτιση των καμπυλών των δοκιμίων 2 και Χ2 διαφορετικού υλικού, που θερμάνθηκαν σε ίδια θερμοκρασία αφροποίησης στο φούρνο

Από το παραπάνω διάγραμμα συσχέτισης των δοκιμίων 2 και X2 , τα οποία θερμάνθηκαν στην ίδια θερμοκρασία αφροποίησης (800°C), προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- το δοκίμιο 2 παρουσίασε σχετικά σταθερή αύξηση του όγκου από την αρχή της θέρμανσής του μέχρι τη στιγμή που εμφάνισε τη μέγιστη διόγκωσή του.
- στο δοκίμιο X2 ο όγκος του αυξήθηκε ελάχιστα τα πρώτα 3min και στη συνέχεια άρχισε να αυξάνεται με σταθερό ρυθμό μέχρι τη στιγμή που εμφάνισε, αντίστοιχα με το δοκίμιο 2, τη μέγιστη διόγκωσή του.
- στο δοκίμιο 2 παρατηρήθηκε πολύ μεγαλύτερη μέγιστη διόγκωση συγκριτικά με το δοκίμιο Χ2. Ο όγκος του δοκιμίου 2 έφτασε περίπου το τριπλάσιο του αρχικού ενώ ο όγκος του Χ2 κατάφερε οριακά να ξεπεράσει το διπλάσιο του αρχικού του.
- Η πτώση του όγκου των 2 δοκιμίων εμφάνισε παραπλήσιο ρυθμό και ο όγκος τους κατά την έξοδό τους από τον φούρνο στα 10min ήταν περίπου διπλάσιος του αρχικού τους και για τα 2 δοκίμια.

## 6.4 Πειράματα βέλτιστου χρόνου

Από την προηγούμενη ενότητα, έχοντας πλέον υπολογίσει τους βέλτιστους χρόνους παραμονής στον φούρνο t<sub>opt</sub> και τη μέγιστη δυνατή διόγκωση με τη βοήθεια των 6 δοκιμίων της πρώτης σειράς πειραμάτων, διαπιστώθηκε ότι τα <u>δοκίμια X1 και X2</u>, που είχαν κατασκευαστεί από χονδρόκοκκο αλουμίνιο, δεν είχαν ομοιογένεια στους πόρους και εμφάνισαν χαμηλό πορώδες, δηλαδή <u>παρουσίασαν μικρή αφροποίηση</u>. Γι' αυτό το λόγο αποφασίστηκε να μην διεξαχθεί στη συνέχεια περαιτέρω μελέτη και ανάλυση της εσωτερικής τους μορφολογίας.

Επομένως, από το πειραματικό κομμάτι της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέκυψαν <u>συμπεράσματα για το πορώδες μόνο των δοκιμίων που</u> κατασκευάστηκαν από λεπτόκκοκη σκόνη αλουμινίου. Στο αμέσως επόμενο στάδιο πραγματοποιήθηκε η <u>δεύτερη σειρά πειραμάτων των 4 εναπομείναντων δοκιμίων</u>, στα οποία όμως εφαρμόστηκε ο βέλτιστος χρόνος t<sub>opt</sub> ως χρόνος παραμονής τους στον επαγωγικό φούρνο Osmund, ο οποίος χρόνος είχε προκύψει από τα πορίσματα της πρώτης σειράς πειραμάτων.

Σημειώνεται ότι τα εναπομείναντα 4 δοκίμια (5,6,7 και 9) από λεπτόκοκκο Al θερμάνθηκαν στον φούρνο μόνο στις θερμοκρασίες των 750°C και των 800°C, διότι αυτές θεωρήθηκαν, από την εμπειρία της πρώτης σειράς πειραμάτων, οι καταλληλότερες για την παραγωγή του μέγιστου πορώδους. Επίσης τα δοκίμια 6 και 7 απορρίφθηκαν, γιατί παρατηρήθηκε αστοχία ή πτώση κατά την αφροποίησή τους μέσα στο φούρνο. Συνεπώς αναλύθηκαν και μελετήθηκαν στην πορεία οι πόροι μόνο των δοκιμίων 5 και 9 από λεπτόκοκκο αλουμίνιο. Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει τις θερμοκρασίες αφροποίησης και τους βέλτιστους χρόνους εξόδου των δοκιμίων 5 και 9 από τον φούρνο Osmund:

Δοκίμιο	Θερμοκρασία Αφροποίησης (°C)	Χρόνος παραμονής στον φούρνο = t <sub>opt</sub> (min)
5	800	2:53
9	750	5:16

Οι ακόλουθες εικόνες παρουσιάζουν τα <u>δοκίμια βέλτιστου χρόνου 5 και 9</u>, τα οποία προέκυψαν ύστερα από εγκάρσια κοπή με τη βοήθεια της δισκοτόμου του εργαστηρίου, αφού όμως πρώτα ψύχθηκαν φυσικά στον ατμοσφαιρικό αέρα για περίπου 30min. Μετά την κοπή τους ακολούθησε, με σκοπό την φωτογράφησή τους, καθαρισμός και στέγνωμα των εσωτερικών τους επιφανειών.



Εικόνα 6.14: Εσωτερική μορφολογία δοκιμίου 5



Εικόνα 6.15: Εσωτερική μορφολογία δοκιμίου 9

Προκειμένου να μελετηθεί περαιτέρω η εσωτερική μορφολογία των κυψελίδων των δοκιμίων βέλτιστου χρόνου 5 και 9, υλοποιήθηκαν στο εργαστήριο τα παρακάτω στάδια επεξεργασίας των δοκιμίων με την ακόλουθη <u>χρονολογική σειρά</u>:

- βαφή των εσωτερικών επιφανειών τους με σπρέι χρώματος μαύρο ματ.
- φυσικό στέγνωμα σε χώρο του Εργαστηρίου Χύτευσης για περίπου 30min.
- λείανση της επιφάνειάς τους σε λειαντήρα για περίπου 5min στα 100rpm.
- λήψη στιγμιότυπων των δοκιμίων στο στερεοσκόπιο Leica MZ6.

Για την επεξεργασία των στιγμιότυπων επιλέχθηκε και πάλι το πρόγραμμα ImageJ, το οποίο για την μελέτη του πορώδους είχε την απαίτηση της <u>οπτικής αντίθεσης</u> μεταξύ των πόρων και του υπόλοιπου συμπαγούς υλικού. Αυτή η απαίτηση επιτεύχθηκε μέσω της βαφής της εσωτερικής επιφάνειας των δοκιμίων, που σκοπό είχε να χρωματιστεί με μαύρο χρώμα η εσωτερική κοιλότητα των πόρων, και μέσω της λείανσης σε επόμενο στάδιο, η οποία κατάφερε να επιτύχει ικανοποιητικά την οπτική αντίθεση μεταξύ των πόρων, που ήταν μαύρου χρώματος, και του υπόλοιπου υλικού, το οποίο είχε λειανθεί επιφανειακά και ήταν απόχρωσης γκρι. Παρακάτω ακολουθούν οι φωτογραφίες του λειαντήρα και του στερεοσκοπίου του εργαστηρίου, που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας, καθώς και κάποια στιγμιότυπα των δοκιμίων που μελετήθηκαν στο στερεοσκόπιο:



Εικόνα 6.16: Ο λειαντήρας του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκε (Αριστερά), Το στερεοσκόπιο Leica ΜΖ6 του εργαστηρίου (Δεξιά)



Εικόνα 6.17: Το δοκίμιο 9 στους 750°C (Αριστερά), Το δοκίμιο 5 στους 800 °C (Δεξιά)



Εικόνα 6.18: Εσωτερική μορφολογία κυψελίδων δοκιμίου 5



Εικόνα 6.19: Εσωτερική μορφολογία κυψελίδων δοκιμίου 9



Εικόνα 6.20: Στιγμιότυπα επεξεργασίας των δοκιμίων με το πρόγραμμα ImageJ
Για την εύρεση της σχετικής πυκνότητας του αφρού (πορώδες) στα δοκίμια βέλτιστου χρόνου 5 και 9 χρησιμοποιήθηκε πάλι το πρόγραμμα ImageJ, με τη βοήθεια του οποίου δημιουργήθηκε ένα <u>ασπρόμαυρο στιγμιότυπο υπό κλίμακα</u> και χαράχθηκε για κάθε δοκίμιο ένα <u>πολύγωνο</u> περιμετρικά της εσωτερικής του επιφάνειας του. Στη συνέχεια υπολογίστηκε, μέσω του προγράμματος, η αναλογία του μαύρου και του άσπρου χρώματος (μαύρα και άσπρα pixels αντίστοιχα), που περιείχε η κλειστή ορισμένη επιφάνεια του πολυγώνου.



Εικόνα 6.21: Σχηματισμός πολυγώνου στο δοκίμιο 5 με το πρόγραμμα ImageJ



Εικόνα 6.22: Σχηματισμός πολυγώνου στο δοκίμιο 9 με το πρόγραμμα ImageJ

Έπειτα, μέσω μιας συνάρτησης του Microsoft Excel, η οποία μετέτρεπε την αναλογία άσπρου και μαύρου χρώματος του ImageJ σε πορώδες (%), προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για το <u>πορώδες των 2 δοκιμίων βέλτιστου χρόνου</u>:

- το δοκίμιο 5 είχε περίπου 68,01% σχετική πυκνότητα αφρού
- το δοκίμιο 9 είχε περίπου 62,65% σχετική πυκνότητα αφρού

Σε επόμενο στάδιο υπολογίστηκε, μέσω του προγράμματος ImageJ πάνω σε κάποιο ασπρόμαυρο στιγμιότυπο, η επιφάνεια των πιο διακριτών πόρων των 2 δοκιμίων. Πιο συγκεκριμένα, μετρήθηκε το εμβαδόν (σε mm<sup>2</sup>) από <u>συνολικά 50 πόρους για το</u> <u>δοκίμιο 5 και 56 πόρους για το δοκίμιο 9</u>. Αυτό έγινε με σκοπό την ταξινόμηση των πόρων με βάση το μέγεθός τους, την καλύτερη εποπτεία του ποσοστού των μικρών, μεσαίων και μεγάλων πόρων, που εμφανίζονταν στο εσωτερικό των δοκιμίων, και την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την ομοιογένεια της δομής τους.

Παρακάτω ακολουθούν τα αντίστοιχα ραβδογράμματα των 2 δοκιμίων, που εκφράζουν την κατανομή του εμβαδού των πόρων σε κάθε δοκίμιο, καθώς επίσης και διαγράμματα σύγκρισης των δοκιμίων βέλτιστου χρόνου με τα δοκίμια της πρώτης σειράς πειραμάτων, που θερμάνθηκαν σε ίδιες θερμοκρασίες άλλα διαφορετικούς χρόνους μέσα στον επαγωγικό φούρνο:



Διάγραμμα 6.9: Ραβδόγραμμα κατανομής εμβαδού πόρων του δοκιμίου 5



Διάγραμμα 6.10: Σύγκριση δοκιμίου 2 (800°C - 10min) και δοκιμίου 5 (800°C - 2:53min). Εμφάνιση μεγάλης επιφάνειας κατάρρευσης (drainage) στη βάση του δοκιμίου 2



Διάγραμμα 6.11: Ραβδόγραμμα κατανομής εμβαδού πόρων του δοκιμίου 9



Διάγραμμα 6.12: Σύγκριση δοκιμίου 1 (750°C - 10min) και δοκιμίου 9 (750°C - 5:16min). Εμφάνιση μεγάλης επιφάνειας κατάρρευσης (drainage) στη βάση του δοκιμίου 1

## 6.5 <u>Συμπεράσματα</u>

Από την διεξαγωγή των πειραμάτων και από την μελέτη και ανάλυση των κυψελίδων της εσωτερικής δομής των δοκιμίων 5 στους 800°C και 9 στους 750°C προέκυψαν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- μεγάλη ομοιογένεια σε μέγεθος και σχήμα των πόρων του δοκιμίου 5, οι οποίοι παρατηρήθηκαν αρκετά σφαιρικοί και παραπλήσιοι σε διάσταση.
- μεγάλη ανομοιογένεια σε μέγεθος και σχήμα των πόρων του δοκιμίου 9, από τους οποίους κάποιοι ήταν μικροί και άλλοι πολύ μεγάλοι σε διάσταση.
- εμφάνιση μεγαλύτερου πορώδους του δοκιμίου 5, που θερμάνθηκε σε υψηλότερη θερμοκρασία (800°C) και για λιγότερο βέλτιστο χρόνο παραμονής (2:53min), συγκριτικά με το δοκίμιο 9, το οποίο θερμάνθηκε στους 750°C για 5:16min στον επαγωγικό φούρνο Osmund.
- ένα μέρος των δοκιμίων δεν είχε καθόλου πόρους ή είχει πολύ μικρούς, οι οποίοι μάλλον αναπτύχθηκαν τα πρώτα λεπτά παραμονής τους στο φούρνο και στη συνέχεια διέφυγε το αέριο υδρογόνο με αποτέλεσμα τη συσσώρευση και κατάρρευση του υλικού προς τη βάση του.

- εμφάνιση μικρής επιφάνειας κατάρρευσης (drainage) στη βάση των δοκιμίων 5 και 9 συγκριτικά με τα δοκίμια της πρώτης σειράς πειραμάτων, λόγω της καλύτερης αφροποίησής τους, καθώς τα δοκίμια 5 και 9 θερμάνθηκαν στον βέλτιστο χρόνο παραμονής t<sub>opt</sub> μέσα στον φούρνο. Αυτό οπτικά φαίνεται καλύτερα και στα Διαγράμματα σύγκρισης 6.10 και 6.12.
- ύπαρξη μικρορωγμών στα τοιχώματα των πόρων των 2 δοκιμίων, που πιθανότατα να προκλήθηκαν στην προσπάθεια του αερίου υδρογόνου να διαφύγει μέσω των ευάλωτων, σε υψηλές θερμοκρασίες, τοιχωμάτων λεπτού πάχους.
- ύπαρξη πόρων με αρκετά μικρό όγκο και πόρων με σχετικά μεγάλο όγκο, κυρίως στο δοκίμιο 9. Το φαινόμενο αυτό ίσως να οφείλεται στη συνένωση δύο η παραπάνω πόρων μεταξύ τους, καθώς σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες μέσα στον φούρνο είναι δυνατή η μετακίνηση πόρων, εφόσον τα τοιχώματά τους είναι σε υγρή φάση.
- τα χονδρόκοκκα δοκίμια X1 και X2 παρουσίασαν μεγάλη ανομοιογένεια όσον αφορά τους σχηματισμένους πόρους τους και γενικά χαμηλή αφροποίηση, η οποία ίσως να οφείλεται στην κακή ανάμιξη των κόκκων της συγκεκριμένης σκόνης αλουμινίου με τον αφριστιστικό παράγοντα υδρίδιο του τιτανίου TiH<sub>2</sub>.
- η αφροποίηση ξεκίνησε από την κάτω επιφάνεια για όλα τα δοκίμια της πειραματικής διαδικασίας. Αυτό το φαινόμενο πιθανώς να οφείλεται στην αγωγή θερμότητας από την καυτή χαλύβδινη πλάκα, η οποία χρησιμοποιήθηκε ως μέσο εισαγωγής και στήριξης των δοκιμίων στο φούρνο, προς τα δοκίμια μέσω της επιφάνειας στήριξής τους στην πλάκα. Κάτι τέτοιο ίσως απέτρεψε την ομοιογενή αφροποίηση κάποιων δοκιμίων. Στην Εικόνα 6.23 παρακάτω γίνεται καλύτερα αντιληπτό το φαινόμενο της έναρξης της διαδικασίας της αφροποίησης από το κάτω μέρος του δοκιμίου.



Εικόνα 6.23: Αφροποίηση της κάτω επιφάνειας του δοκιμίου λόγω αγωγής θερμότητας από τη χαλύβδινη πλάκα του φούρνου

## 6.6 <u>Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα</u>

Στη παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η παραγωγή μεταλλικών αφρών με τη χρήση κονιομεταλλουργίας και αφριστικού παράγοντα, δηλαδή με ανάμιξη μεταλλικών κόνεων αλουμινίου με τον αφριστικό παράγοντα υδρίδιο του τιτανίου. Επίσης, έγινε ανάλυση και μελέτη του πορώδους των μεταλλικών αφρών που παράχθηκαν, με στόχο την απώτερη κατανόηση της εσωτερικής τους δομής.

Μερικές προτάσεις για περαιτέρω έρευνα είναι οι εξής:

- αλλαγή του μέσου εισαγωγής και στήριξης των δοκιμίων στον επαγωγικό φούρνο. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η καυτή χαλύνδινη πλάκα μετέδιδε μέσω αγωγής θερμότητα στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου με αποτέλεσμα να ξεκινάει η διαδικασία της αφροποίησης από το κάτω μέρος του. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την ανομοιογενή αφροποίηση του δοκιμίου. Πιθανώς, χρησιμοποιώντας μελλοντικά μια πολύ λεπτού πάχους πλάκα με οπές να μειωνόταν κατά πολύ η ανεπιθύμητη μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής και να γινόταν έτσι πιο ομοιογενής η αφροποίηση των δοκιμίων.
- μελέτη προσθήκης κεραμικών κόνεων (συνήθως Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) στο μίγμα μεταλλικής σκόνης και αφριστικού παράγοντα με σκοπό τα κάτωθι:
  - 1. βελτίωση του ιξώδους του μίγματος κατά την αφροποίηση.
  - μελέτη ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας (MMC -Metal Matrix Composite) των μεταλλικών αφρών που παράχθηκαν.
- μελέτη ιδιοτήτων του μεταλλικού αφρού:
  - 1. μηχανικές ιδιότητες (αντοχή, δυσκαμψία, τεστ κοπώσεως κλπ)
  - 2. ηλεκτρική αγωγιμότητα
  - 3. θερμική αγωγιμότητα
  - 4. ηχομονωτική ικανότητα
- κατεργασία μεταλλικού αφρού με τη μέθοδο της ηλεκτροδιάβρωσης EDM (Electrical Discharge Machining) για αποφυγή smearing.
- μελέτη συμπίεσης του μίγματος των νιφάδων αλουμινίου σε κατάλληλη πρέσα, έτσι ώστε να μπορέσει να γίνει επιτυχημένη συμπίεση δοκιμίων από Al flakes, με σκοπό την περαιτέρω ανάλυση του πορώδους και της εσωτερικής τους ιδιομορφίας.

## <u>Βιβλιογραφία</u>

- 1. Vafai K., 2015, Handbook Of Porous Media, Third Edition, Taylor & Francis Group, CRC Press.
- 2. Goodall R. and Mortensen A., 2013, Porous Metals, Chapter 26 of Physical Metallurgy- Fifth Edition, Elsevier, Amsterdam.
- 3. Ashby M. F., 1983, The Mechanical Properties of Cellular Solids, Metallurgical Transactions 14A., pp. 1755-1769.
- 4. Banhart, J., 2001, Manufacture Characterization and Application of cellular metals and metal foams, Progress in Materials Science 46., pp. 559-632.
- Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W. and Wadley, 2000, H.N.G, Metal Foams: A Design Guide. Woburn, MA: Butterworth-Heinemann.
- 6. Cellular metallic material: www.metalfoam.net
- Yang B., Wang Y.Q., Zhou B.L., 1998, Metallurgical and Materials Transactions B, Vol.27B, pp.635.
- 8. Αφροί αλουμινίου: users.uoi.gr/mgeorgat/down/8\_aluminum\_foams.pdf
- 9. Catrin Kammer, 1999, Aluminium foam, EAA European Aluminium Association, Goslar, Germany.
- 10. Laughlin D., Hono K., 2013, Porous Metal, Physical Metallurgy, 5<sup>th</sup> ed., Elsevier, Amsterdam,.
- 11. ASM International Handbook Committee, 1988, ASM Handbook, Powder Metal Technologies and Applications, Volume 7, ASM International, Metals Park.
- 12. Degischer, B. Kriszt, 2002, Handbook of Cellular Metals: Production, Processing Application, Wiley-VCH, Germany.
- 13. Gibson L.J., Ashby M.F., 1997 Cellular solids, structure and properties, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge University press.
- 14. Stergioudi F., 2011, Production of porous materials and evaluation of their properties, Doctoral dissertation, Thessaloniki: A.U.TH.
- 15. Papadopoulos D.P., Omar H., Stergioudi F., Tsipas S.A., Michailidis N., 2011, The use of dolomite as foaming agent and its effect on the microstructure of aluminum metal foams - Comparison to titanium hydride, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 382, pp. 118-123.
- Conde Y., Despois J.F., Goodall R., Marmottant A., Salvo L., San Marchi C., Mortensen A., 2006, Replication processing of highly porous materials, Adv Eng Mater 8, pp. 795-803.

- 17. Michailidis N., Stergioudi F., Omar H., Tsipas D.N., 2010, An image-based reconstruction of the 3D geometry of an Al open-cell foam and FEM modeling of the material response, Mech Mater 42, pp. 142-147.
- Παπαδόπουλος Δ., 2004, Μεταλλικοί Αφροί, Στρατιωτική Επιθεώρηση, Ιαν Φεβ, σ. 140-154.
- 19. Davies, G.J. and Zhen, S., 1983. Metallic foams: their production, properties and applications. *Journal of Materials Science 18*. pp. 1899-1911.
- 20. Queheillalt, D.T., Choi, B.W., Schwartz, D.S. and Wadley, H.N.G., 2000. Creep Expansion of Porous Ti-6Al-4V Sandwich Structures. *Metallurgical Transactions 31A*. pp. 261-273.
- 21. Duarte, I. and Banhart, J., 2000. A Study of Aluminum Foam Formation Kinetics and Microstructure. *Acta Materialia* 48. pp. 2349-2362.
- 22. Surace Rossella and De Filippis Luigi, 2010, Investigation and Comparison of Aluminium Foams Manufactured by Different Techniques, Advanced Knowledge Application in Practice, Institute of Industrial Technology and Automation, National Research Council, pp. 96-117.
- 23. Knüwer M. and Weber M. In: Proc. 1998 Powder Metallurgy World Congress, Granada, Spain, 18<sup>-</sup>22 October, vol. 2, pp. 233.
- Tuchinskiy L. and Loutfy R., 1997, Metal foams. In: J. Banhart, M.F. Ashby and N.A. Fleck, Editors, Proc. Fraunhofer USA Symposium on Metal Foams, Stanton, USA, 7<sup>-</sup>8 October, MIT Press<sup>-</sup>Verlag, Bremen, p. 23.
- 25. Tuchinskiy L. and Loutfy R., 1999, Metal foams and porous metal structures. In: J Banhart, M.F. Ashby and N.A. Fleck, Editors, Int. Conf., Bremen, Germany, 14<sup>-</sup>16 June, MIT Press<sup>-</sup>Verlag, Bremen, p. 189.
- 26. Inco Ltd., Canada, Product data sheet of "Incofoam" and <u>http://www.inco.com</u>, 1998.
- 27. Badiche X., Forest S., Guibert T., Bienvenu Y., Bartout J.D., Ienny P., Croset M. and Bernet H., 2000, Materials Science and Engineering A289, p. 176.
- 28. Pickering S., 1998, Metal Powder Report 53, pp. 24.
- 29. http://www.ultramet.com/chemical vapor deposition.html
- 30. http://subsea-wellhead.com/assets/img/hero/water-jet.jpg
- 31. Bunte J., von Busse A., Cordini P., 2003, Future prospects for the industrial applications of laser, Laser Zentrum, Hannover.
- 32. Kretz, R, Hombergsmeier, E., Eippner, K., 1999, Manufacturing and testing of aluminium foam structural parts for passenger cars Funcionários by example of a rear intermediate panel, Metal Foams and Porous Metals Structures, Verlag MIT Bremen, Bremen, Germany, pp. 23-26

- 33. Haferkamp, H., Ostendorf, A., Goede, M., Bunte, J., 2001, Potential of Laser Welding of Metal Foam, Proceedings of MetFoam, Bremen.
- 34. Fraunhofer IFAM: http://www.ifam.fraunhofer.de/en.html
- 35. Mancin Simone, Zilio Claudio, Diani Andrea, Rossetto Luisa, 2013, Air forced convection through metal foams: Experimental results and modeling, <u>International Journal of Heat and Mass Transfer</u>, <u>Volume 62</u>, pp. 112–123.
- 36. Azzi Wassim Elias, 2004, A Systematic Study on the Mechanical and Thermal Properties of Open Cell Metal Foams for Aerospace Applications, Mechanical Engineering, North Carolina State University.
- 37. Fourie J.G, Du Plessis J.P., 2002, Pressure drop modeling in cellular metallic foams, Chemical Engineering Science, Volume 57, Issue 14, p. 2781–2789.
- Boomsma K., Poulikakos D., Ventikos Y., 2003, Simulations of flow through open cell metal foams using an idealized periodic cell structure, International Journal of Heat and Fluid Flow, Volume 24, Issue 6, pp. 825–834.
- Bart-Smith H., Bastawros A.F., Mumm D.R., Evans A.G., Sypeck D.J, H.N.G. Wadley, 1998, Compressive Deformation and Yielding in Cellular Al Alloys Determined Using X-Ray Tomography and Surface Strain Mapping, Acta Materialia, Volume 46, Issue 10, pp. 3583–3592.
- 40. http://www.ifam.fraunhofer.de/en/Dresden/Cellular metallic\_materials.html
- 41. http://www.chinabeihai.net/ProductView.Asp?ID=56
- Gegerly V., Curran D. and Clyne T., 2001, Drainage of metallic foamsmodelling and experimental observations, Int. Conf., Bremen, Germany, 18-20 June, MIT Press– Verlag, Bremen, pp. 105.
- 43. Simone A. and Gibson L., 1998, The effects of cell face curvature and corrugations on the stiffness and strength of metallic foams, Acta Mater. 11, pp. 3929-3935.
- 44. Ramamurty U., Paul A., 2004, Variability in mechanical properties of a metal foam, Acta Materialia, 52, pp. 869-876.
- 45. Donghui Y. and Deping H., 2003, Porosity constitution of porous Al alloys, Int. Conf., Berlin, Germany, 23-25 June, MIT Press–Verlag, Bremen, pp. 335.
- 46. Jancek R., Kottar A. and Degischer H., 2003, Cellular aluminium for passive crash protection, Int. Conf., Berlin, Germany, 23-25 June, MIT Press–Verlag, Bremen, pp. 19.
- 47. Gibson L.J., 2000. Properties and Applications of Metallic Foams. Comprehensive Composite Materials, vol. 3.
- 48. Baumeister J., Banhart J. and Weber M., 1997. Aluminum foams for transport industry. Materials and Design 18. pp. 217-220.

- 49. http://www.nasa.gov/centers/glenn/technology/metallic foam.html
- 50. Smith B.H., Szyniszewski S., Hajjar J.F., Schafer B.W. and Arwade S.R., 2012. Steel foam for structures: A review of applications, manufacturing and material properties. Journal of Constructional Steel Research 71. pp. 1-10.
- 51. <u>http://arstechnica.com/science/2013/04/this-new-microbattery-is-</u> <u>interesting-but-not-as-good-as-the-hype/</u>
- 52. <u>http://www.kurzweilai.net/metal-foams-found-to-excel-in-shielding-x-rays-gamma-rays-neutron-radiation</u>
- 53. <u>http://www.dentistryiq.com/articles/2014/01/zimmer-s-new-3-7-mmd-trabecular-metal-dental-implant.html</u>
- 54. Lu T.J., Stone H.A. and Ashby M.F., 1998. Heat transfer in open-cell metal foams. Acta Materialia 10, vol. 46. pp. 3619-3635.
- 55. Cookson E.J., Floyd, D.E. and Shih, A.J., 2006. Design, manufacture and analysis of metal foam electrical resistance heater. International Journal of Mechanical Sciences 48. pp. 1314-1322.
- 56. Ejlali Az., Ejlali, Ar., Hooman, K. and Gurgenci, H., 2009. Application of high porosity metal foams as air-cooled heat exchangers to high heat removal systems. International Communications in Heat and Mass Transfer 36. pp. 674-679.
- 57. http://www.frostytech.com/articleview.cfm?articleid=2424&page=8
- Bianchi E., Heidig T., Visconti C.G., Groppi G., Freund, H. and Tronconi, E., 2013, Heat transfer properties of metal foam supports for structured catalysts: Wall heat transfer. Catalysis Today. Article In Press.
- 59. http://www.ergaerospace.com/Material-Applications-guide.html