



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

Διπλωματική εργασία:

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ

[PRODUCTION AND APPLICATIONS OF METAL FOAMS]



Προπτυχιακός φοιτητής: Πασόπουλος Σπυρίδων

ΑΜ: 02108062

Επιβλέπων:

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

Αθήνα Σεπτέμβριος 2016

Copyright ©

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του πανεπιστημίου.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ

[PRODUCTION AND APPLICATIONS OF METAL FOAMS]

Επιβλέπων Καθηγητής

.....

Εξεταστής

(Θέση / Τίτλος)

.....

Εξεταστής

(Θέση / Τίτλος)

.....

Εξεταστής

(Θέση / Τίτλος)

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθώς και για την βοήθεια του ώστε να υλοποιηθεί η παρούσα πτυχιακή εργασία. Η καθοδήγηση του ήταν πολύτιμη για την επίλυση διαφόρων θεμάτων της εργασίας.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Παπαντωνίου Ιωάννη για την ανιδιοτελή προσφορά του καθώς και τις πολύτιμες πληροφορίες που μου μετέδωσε σε όλη την διάρκεια της συγγραφής. Χωρίς την συμβολή του δεν θα ήταν δυνατή η υλοποίηση της εργασίας αυτής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, οι οποίοι με έχουν στηρίξει τόσο πολύ κατά την διάρκεια των σπουδών μου και ειδικότερα κατά την περίοδο της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία μελετά την τεχνολογία των μεταλλικών αφρών. Στόχος της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η μελέτη των μεταλλικών αφρών, η παραγωγή τους καθώς και η χρήση τους σε διάφορους τομείς της τεχνολογίας.

Το πρώτο κεφάλαιο περιγράφει τους μεταλλικούς αφρούς γενικά, καθώς και παρουσιάζει μια μικρή ιστορική αναδρομή των μεταλλικών αφρών. Το δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζει τους τρόπους παραγωγής των μεταλλικών αφρών ώστε να κατανοηθούν όσο το δυνατόν περισσότερο, οι παλιές καθώς και οι καινούργιες μέθοδοι παρασκευής. Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται ακόμη τα προτερήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε περίπτωσης.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στις ιδιότητες των μεταλλικών αφρών. Οι μεταλλικοί αφοοί έχουν σαν κοινό γνώρισμα την χαμηλή πυκνότητα σε συνδυασμό με ακουστικές, θερμικές, ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες. Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει τους τρόπους κατεργασίας των μεταλλικών αφρών. Η επεξεργασία των μεταλλικών αφρών παρουσιάζει στις μέρες μας ένα δυναμικό προφίλ και εξελίσσεται ραγδαία, σε σύγκριση με τις προηγούμενες δεκαετίες που λόγω υψηλού κόστους δεν είχαν εξαπλωθεί εκτεταμένα .

Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στις εφαρμογές των μεταλλικών αφρών. Οι ιδιότητες τους καθιστούν ενδιαφέροντα τα υλικά αυτά ώστε να χρησιμοποιηθούν στον τομέα της αεροναυπηγικής, της οικοδόμησης, της μηχανολογίας, της αυτοκινητοβιομηχανίας κ.α.

Τέλος καταγράφονται τα συμπεράσματα της έρευνας.

Λέξεις –κλειδιά: Μεταλλικοί αφοοί, Παραγωγή μεταλλικών αφρών , κατεργασίες, πορώδες

Abstract

The present thesis studies the technology of metal foams. The aim of this thesis is the study of metal foams, their production, and their use in various fields of technology.

The first chapter focuses on the presentation of metal foams in general, as well as on their history. The second chapter is about the production methods of metallic foams, giving us the possibility to understand both the old and the new methods in depth. In this chapter the advantages and disadvantages of each case are also analyzed.

The third chapter refers to the properties of metal foams. Metal foams have as a common feature the characteristic of low density in combination with acoustic, thermal, electrical and mechanical properties. The fourth chapter presents the different ways of metal foams processing. The processing of metal foams presents nowadays a dynamic profile and progresses rapidly, contrary to the last decades, when due to the high costs of processing, these methods were not widely spread.

The fifth chapter refers to metal foams applications. The properties of metal foams make them suitable materials for the aerospace, building, and engineering field, among others.

Finally, the conclusions of the study are presented.

Keywords: Metal foams, Metal foams production, processing, Porosity,

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	4
Περίληψη.....	5
Abstract	6
Κεφάλαιο 1.....	10
Εισαγωγή	10
1.1. Ιστορική Αναδρομή	11
Κεφάλαιο 2: Τρόποι Παραγωγής Μεταλλικών Αφρών	14
2.1 Παραγωγή από υγρό Μέταλλο (απευθείας Αφροποίηση).....	15
2.1.1. Αφροποίηση με δημιουργία φυσαλίδων.....	15
2.1.2. Αφροποίηση με αέριο.....	17
2.1.3. Διαδικασία Gasars.....	19
2.2 Αφροποίηση μεταλλικών αφρών μέσω τήξης σκόνης μετάλλου	20
2.2.1 Μέθοδος FORMGRIP	20
2.2.2. Τεχνολογία Merpura.....	22
2.3. Αφροποίηση με ψεκασμό	23
2.4. Αφροποίηση με χύτευση.....	24
2.4.1 Χύτευση με πολυμερικό πρότυπο.....	24
2.4.2. Χύτευση (Lattice Block Materials).....	25
2.4.3. Χύτευση για την κατασκευή μεταλλικών σπόγγων μεταβλητού πορώδους.....	26
2.5. Αφροί αλουμινίου με αρκετά πολύπλοκο σχήμα	27
Κεφάλαιο 3: Ιδιότητες Μεταλλικών Αφρών	28
3.1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά Μεταλλικών Αφρών	29
3.2. Φυσικές ιδιότητες Μεταλλικών Αφρών	30
3.3. Χημικές ιδιότητες Μεταλλικών Αφρών	32
3.4. Μέτρο ελαστικότητας.....	33

3.5. Μηχανικές ιδιότητες	34
3.6.Αυξητικοί μεταλλικοί αφροί- ιδιότητες	35
3.7. Μηχανικές ιδιότητες μη-αυξητικών μεταλλικών αφρών.....	38
3.8. Δομές σάντουιτς	39
Κεφάλαιο 4: Κατεργασίες Μεταλλικών Αφρών	41
4.1. Γενικά.....	41
4.2. Επικαλύψεις	42
4.2.1. Επικάλυψη με την μέθοδο εναπόθεσης ψεκασμού.	42
4.3. Συνδέσεις.....	43
4.3.1 Σύνδεση μεταξύ μεταλλικού αφρού και πάνελ	44
4.4. Συγκολλήσεις.....	44
4.4.1. Συγκόλληση μεταλλικών αφρών με την χρήση laser.	45
4.5. Κόλληση.....	46
4.6. Κοπή	46
4.7 Ένωση πάνελ που περιέχουν μεταλλικούς αφρούς.....	48
4.8 Flow drilling	48
4.9. Χαρακτηρισμός μεταλλικών αφρών	50
4.10. Μη καταστροφικός έλεγχος.....	51
Κεφάλαιο 5: Εφαρμογές Μεταλλικών Αφρών	53
5.1. Παράγοντες που επηρεάζουν την χρήση των μεταλλικών αφρών.....	53
5.2. Εφαρμογή στην κατασκευή αυτοκινήτων.....	53
5.3. Εφαρμογή στον τομέα της ναυπηγίας	56
5.4. Εφαρμογές στον κατασκευαστικό τομέα.....	57
5.5. Κατασκευή φίλτρων και σιγαστήρων.....	58
5.6. Ηλεκτρόδια Μπαταριών.....	59
5.7. Μεταλλικοί αφροί και Ιατρική	60
5.8. Μεταλλικοί αφροί και αεροδιαστημική	61

5.9. Ανακύκλωση	62
5.10. Καταλύτες.....	62
5.11. Ψυγεία από μεταλλικούς αφρούς και intercooler.....	62
5.12. Βλήματα από μεταλλικούς αφρούς	63
Συμπεράσματα	65
Βιβλιογραφία	67

Κεφάλαιο 1

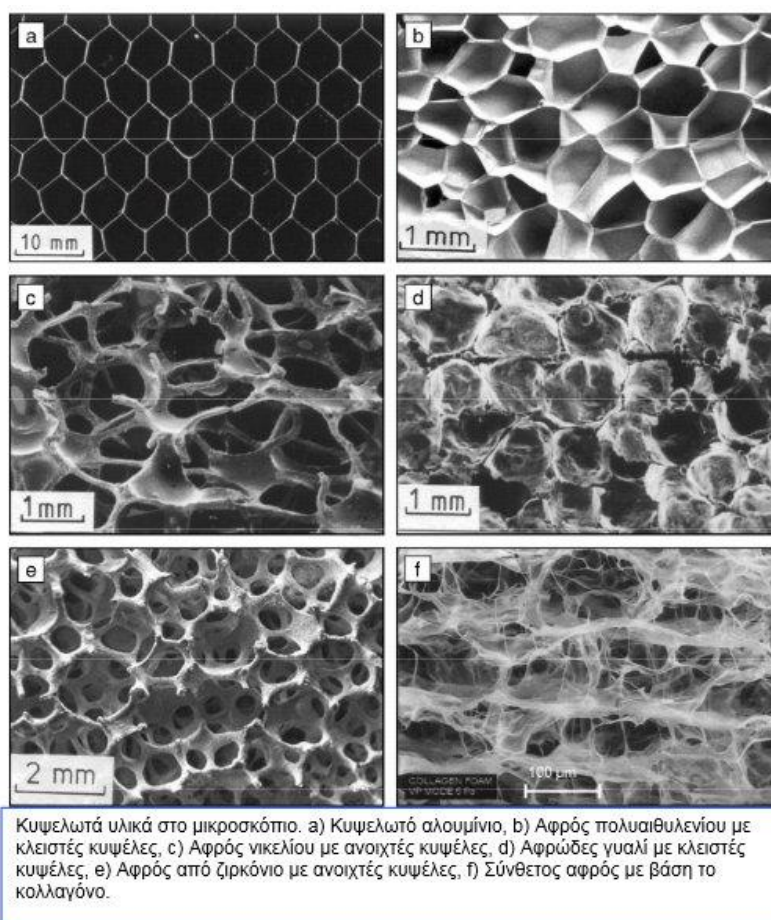
Εισαγωγή

Με τον όρο Μεταλλικοί Αφροί καλείται η κατηγορία εκείνη των πορωδών υλικών που εμφανίζει αρκετά χαμηλή πυκνότητα και έναν ισχυρό συνδυασμό θερμικών, ηλεκτρικών και ακουστικών ιδιοτήτων. Ο όρος αφρός δεν χρησιμοποιείται πάντα εύστοχα. Οι αφροί δημιουργούνται κατά την διαδικασία της ομοιόμορφης διασποράς της αέριας φάσης, σε υγρή ή στερεή κατάσταση [1]. Αναλυτικότερα η διεπιφάνεια αερίου εγκλείσματος και υγρής ή στερεάς κατάστασης δημιουργεί τα όρια του κελιού, το οποίο τείνει να το απομονώνει από τα γειτονικά του. Όταν γίνεται αναφορά στους μεταλλικούς αφρούς εννοούμε τους στερεούς αφρούς. Ο στερεός αφρός είναι μια ειδική περίπτωση υλικών που είναι γνωστά με τον όρο κυψελοειδή στερεά [1].

Οι μεταλλικοί αφροί παρουσιάζουν μια εξαιρετικά χαμηλή πυκνότητα που σε συνδυασμό με μηχανικές, ηλεκτρικές, θερμικές, ακουστικές και αντiekρηκτικές ιδιότητες προσφέρουν μια μεγάλη ποικιλία κατασκευών με χαρακτηριστικό χαμηλό βάρος σε συνδυασμό με υψηλή μηχανική αντοχή και ελεγχόμενη διαχείριση της θερμότητας [2]. Στην σημερινή εποχή το ενδιαφέρον για την χρήση των μεταλλικών αφρών έχει αυξηθεί. Οι μέθοδοι παρασκευής δεν είναι μια καινούργια διαδικασία αλλά είναι γνωστή από την δεκαετία του πενήντα. Ο κύριος λόγος που η κατασκευή τους δεν είχε αναπτυχθεί τόσο πολύ, είναι η δυσκολία του έλεγχου παρασκευής καθώς και το υψηλό κόστος της όλης διαδικασίας. Ακόμη ένα σημαντικό πρόβλημα είναι ότι δεν μπορούσαν να παραχθούν δομές με αναπαραγόμενες ιδιότητες [2].

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, οι μέθοδοι παραγωγής έχουν βελτιωθεί και τείνουν να μειώσουν σε μεγάλο βαθμό τα προβλήματα που ήδη έχουν αναφερθεί. Η νέα γενιά των μεταλλικών αφρών παρουσιάζει όλο και περισσότερες θετικές ιδιότητες καθώς και ο τρόπος παραγωγής γίνεται ολοένα και πιο ελεγχόμενος. Τα μέταλλα και τα κράματα αποτελούν το μέλλον της παραγωγής των πορώδη υλικών

όποτε προβλέπεται άμεση ανάπτυξη της διαδικασίας αυτής στα χρόνια που ακολουθούν.



Εικόνα 1. Μεταλλικοί αφροί

Πηγή: A design guide: Cambridge University Press. Ashby M.F.

1.1. Ιστορική Αναδρομή

Ο Benjamin Sosnick θεωρείται ο πατέρας της παραγωγής των μεταλλικών αφρών. Η παραγωγή τους εμφανίστηκε για πρώτη φορά κατά την δεκαετία του 1940. Η μέθοδος παραγωγής βασίζεται σε μια μεγάλη κατηγορία κραμάτων που σε διαφορετικές φάσεις παρουσιάζει μεγάλη διαφορά κατά το σημείο τήξης και στο σημείο βρασμού. Οι φάσεις λοιπόν αυτές έχουν την ιδιότητα να τακούν και να βράσουν ανεξάρτητα η μία από την άλλη [3].

Αναλυτικότερα ο Benjamin Sosnick (1951) θέρμανε ένα πολυφασικό κράμα. Η φύση της σύστασης του κράματος ήταν τέτοια ώστε το ένα συστατικό να βρίσκεται σε συνθήκη βρασμού, ενώ το άλλο μόλις να έχει αρχίσει να λιώνει. Καθ' όλη την διάρκεια της θέρμανσης το μέταλλο δέχεται υψηλή πίεση με αποτέλεσμα στην αέρια φάση να μην μπορεί να φύγει από το υγρό μέταλλο. Στην συνέχεια μειώνεται η πίεση και έτσι το κράμα οδηγείται σε ξαφνικό βρασμό. Το κράμα μπορεί να ψυχθεί και σαν αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένα στερεό, το οποίο περιέχει κλειστούς πόρους.

Είναι εύλογο να αντληθεί κανείς ότι μόνο μια μικρή ομάδα κραμάτων ήταν κατάλληλα για να υποβληθούν σε αυτή την διαδικασία. Ο λόγος είναι ότι μία από τις φάσεις θα πρέπει να έχει πολύ χαμηλά επίπεδα βρασμού. Έτσι το κράμα πρέπει να αποτελείται από στοιχεία όπως ψευδάργυρο, κάδμιο και υδράργυρο. Το αποτέλεσμα της όλης διαδικασίας ήταν μια μικρή ποσότητα αφρού. Η μικρή ποσότητα του υλικού που παράγωγής, τα επικίνδυνα υλικά που περιείχε καθώς και το υψηλό κόστος της όλης διαδικασίας αποτελούσαν τους κύριους ανασταλτικούς παράγοντες για την χρήση της διαδικασίας αυτής.

Κατά το 1956 μια ομάδα ερευνητών της United Aircraft Corporation ασχολήθηκε με την παραγωγή μεταλλικών αφρών. Στην μέθοδο αυτή της παραγωγής το υλικό που θα παραχθεί από το αέριο αποσυντίθεται όταν βρίσκεται σε μία θερμοκρασία που τείνει να αγγίξει τα όρια της τήξης [4]. Με αυτό τον τρόπο η ποσότητα του αερίου που θα παραχθεί είναι αρκετά πιο μεγάλη. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι παρουσιαζόταν αρκετά προβλήματα κατά την διαδικασία της ψύξης του αφρού.

Στην συνέχεια οι Hardy και Peisker το 1967 παρουσίασαν μια μέθοδο παρασκευής στην οποία στο τήγμα του μετάλλου γινόταν η πρόσθεση του αφριστικού παράγοντα. Μια λύση η οποία ήταν αρκετά πιο φθηνή. Γενικά μπορούμε ευλόγα να συμπεράνουμε ότι η παραγωγή μεταλλικών αφρών ήταν μια διαδικασία με μεγάλο κόστος και χωρίς αξιόπιστη παραγωγή. Η εμπορική τους εκμετάλλευση ήταν περιορισμένη.

Σήμερα έπειτα από πολλές προσπάθειες παρασκευάζονται αφροί από σίδηρο, νικέλιο, μόλυβδο και κυρίως από αλουμίνιο το οποίο παρουσιάζει χαμηλή πυκνότητα, χαμηλό σημείο τήξης και υψηλά επίπεδα κατεργασιμότητας.

Κεφάλαιο 2: Τρόποι Παραγωγής Μεταλλικών Αφρών

Στις προηγούμενες δύο δεκαετίες έχουν παρουσιαστεί αρκετοί μέθοδοι παραγωγής πορώδων μεταλλικών αφρών. Ανάλογα με τον τρόπο παρασκευής έχει δημιουργηθεί ένας αντίστοιχος αριθμός υλικών με διαφορετική εσωτερική δομή.

Οι διάφοροι τρόποι παραγωγής μπορούν να διακριθούν ως εξής [41]:

-Μέθοδοι παρασκευής υγρής κατάστασης.

-Μέθοδοι παρασκευής στερεάς κατάστασης.

-Μέθοδοι παρασκευής με την διαδικασία της ατμοποίησης.

Τα προϊόντα τα οποία προκύπτουν, δεν διαφέρουν κατά πολύ ως προς την σχετική πυκνότητα, το μέγεθος του κελιού και την χημική τους σύσταση.

Οι βασικότεροι τρόποι παραγωγής μεταλλικών αφρών είναι οι εξής [5]:

-Παραγωγή με την διοχέτευση αερίου σε λιωμένο Al –SiC ή κράματα Al_2O_3 .

-Παραγωγή με την ανάδευση παράγοντα αφρισμού σε ένα κράμα που βρίσκεται σε κατάσταση τήξης με ελεγχόμενη πίεση ενώ συγχρόνως ψύχεται.

-Παραγωγή με την ένωση μετάλλων σε σκόνη με έναν παράγοντα αφρισμού σωματιδίων με την συνοδεία θέρμανσης.

-Παραγωγή με την βοήθεια απόθεσης ατμών ή ηλεκτροαπόθεση μετάλλου σε ένα πολυμερές πρόδρομο. Έπειτα το τελευταίο καίγεται και αφήνει κυτταρικές ακμές με κοίλους πυρήνες.

-Παραγωγή με την κατασκευή κεραμικού καλουπιού από πρόδρομο κερί ή πολυμερές αφρού. Το καλούπι αυτό καίγεται και μέσω της πίεσης επιτυγχάνεται η διήθηση του λιωμένου μετάλλου (ή σκόνης μεταλλικής) τα οποία στην συνέχεια συντήκονται.

-Παραγωγή με την διάλυση αερίου (συχνά χρησιμοποιείται το υδρογόνο) σε ένα μέταλλο υγρής κατάστασης το οποίο βρίσκεται υπό πίεση. Το μέταλλο αυτό επιτρέπει την κυκλοφορία του αερίου με ελεγχόμενο τρόπο κατά την διάρκεια της στερεοποίησης.

-Παραγωγή με την βοήθεια συμπίεσης μεταλλικής σκόνης με άλλα υλικά, τα οποία όμως είναι ευδιάλυτα στο νερό. Κατά αυτή την διαδικασία ακολουθείται απόπλυση και στο τέλος απομένει ο μεταλλικός αφρός.

-Παραγωγή με την βοήθεια πυροσωμάτωσης κοίλων σφαιρών που έχουν δημιουργηθεί από οξείδιο του μετάλλου ή υδρίδιο, από ατομική τροποποιημένη διαδικασία ή από εναπόθεση ατμού του μετάλλου σε σφαίρες πολυμερούς.

-Παραγωγή με την βοήθεια παγίδευσης λόγω υψηλής πίεσης αδρανούς αερίου σε πόρους από σκόνη θερμοισοστατικής συμπίεσης η οποία ακολουθείται από την διαστολή του αερίου σε υψηλή θερμοκρασία. Οι σημαντικότερες μέθοδοι παραγωγής θα αναλυθούν εκτενέστερα στο κεφάλαιο αυτό.

2.1 Παραγωγή από υγρό Μέταλλο (απευθείας Αφροποίηση).

Την τελευταία δεκαετία έχουν επικρατήσει δυο τεχνικές για την απευθείας αφροποίηση [6]:

-Εισαγωγή αερίου σε υγρό μέταλλο.

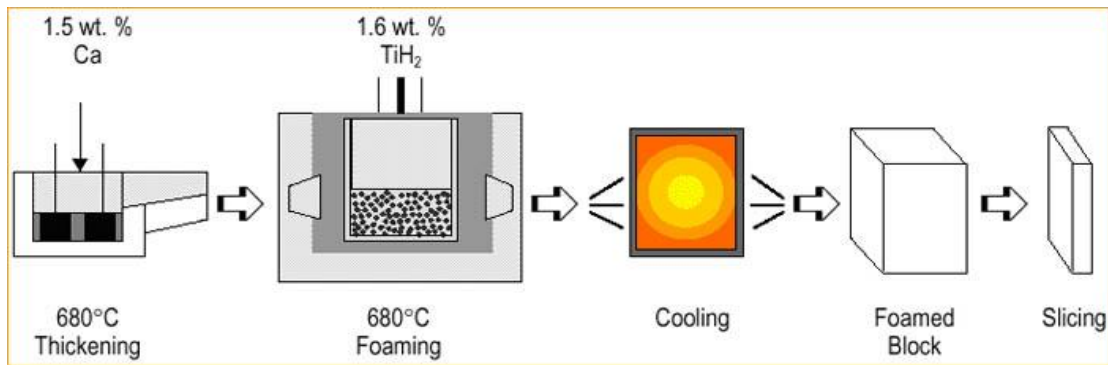
-Πρόσθεση ενός μέσου στο υγρό μέταλλο με σκοπό το μέσο αυτό όταν διασπάται να απελευθερώνει αέριο.

2.1.1. Αφροποίηση με δημιουργία φυσαλίδων

Η διαδικασία είναι ευρέως γνωστή με τον όρο **Alporas**. Στόχος της όλης διαδικασίας είναι η παραγωγή μεγάλων μπλοκ αφρού. Η διαδικασία παραγωγής έχει ως εξής [7,8]:

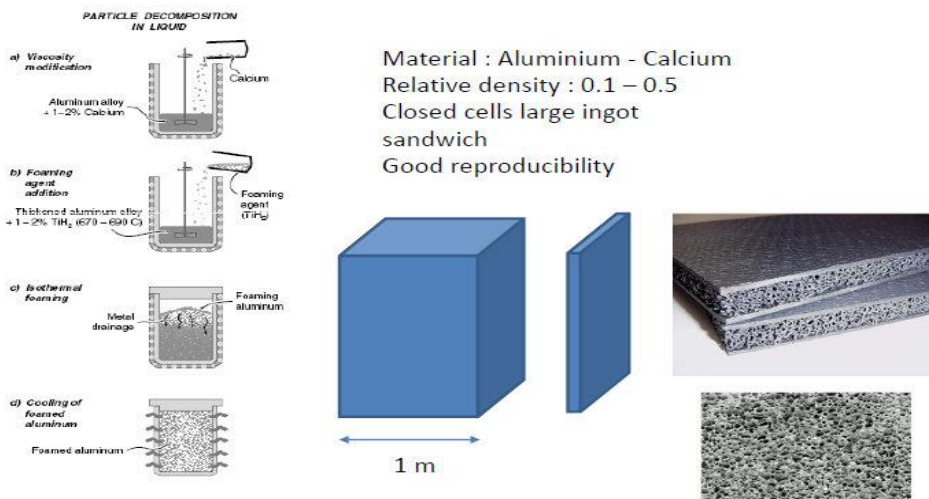
Προστίθεται 1,5% κ.β. Ca σε 680° βαθμούς κελσίου σε μια ήδη λιωμένη ποσότητα Al και ανακατεύεται για περισσότερο από πέντε λεπτά ώστε να ρυθμιστεί το ιξώδες. Έπειτα προστίθεται ένα στοιχείο το οποίο πρέπει απαραίτητα να περιέχει O₂ με στόχο να διευκολυνθεί η οξείδωση και να αυξηθεί το ιξώδες με παραγωγή οξειδίων: CaO, Al₂O₃ και CaAlO₄. Η ποσότητα Al που έχει διογκωθεί μεταφέρεται σε

ένα καλούπι και αναδεύεται έντονα με μια ποσότητα 1,6% κ.β. TiH_2 . Η ποσότητα του TiH_2 διασπάται και παράγει φυσαλίδες H_2 που διαστέλλουν το χυτό και το καλούπι γεμίζει. Στο τελικό μέρος της διαδικασίας το τεμάχιο έχει μήκος 2050 mm, πλάτος 450 mm και ύψος 650mm και κόβεται σε πλάκες. Η πυκνότητα ενός τέτοιου τεμαχίου κυμαίνεται από 0.18-0.24 g/cm^3 ενώ το μέσο μέγεθος κυμαίνεται στα 4,5 mm.



Εικόνα 2 . Διαδικασία παρασκευής αφρού με την μέθοδο **Alporas**.
 Πηγή: Manufacturing Routes for Metallic Foams. John Banhart

Με την πάροδο του χρόνου έχει αποδειχθεί ότι οι αφροί που παράγονται με την διαδικασία αυτή είναι οι πιο ομογενής αφροί που έχουν παρασκευαστεί και στο εμπόριο μπορούν να αναζητηθούν με το όνομα “**Alporas**” [8]. Στην εικόνα που ακολουθεί εμφανίζεται ένα δείγμα παρασκευής αφρού αλουμινίου με την μέθοδο Alporas.



Εικόνα 3. Δείγμα Αφρών αλουμινίου από υγρό μέταλλο
 Πηγή: metal foam a design guide : Ashby M.

Οι τιμές πυκνότητας που προκύπτουν κατά μέσο όρο κυμαίνονται από 0.18-0,24 g/m³ ενώ η διάμετρος των πόρων από 2-10 mm. Σε αυτήν την διαδικασία μπορεί, για την ενίσχυση του ιξώδους του τήγματος του αλουμινίου αντί για ασβέστιο να χρησιμοποιηθούν τα εξής [8]:

- Καρβίδιο του πυριτίου
- Οξείδια του αλουμινίου
- Αλουμίνιο σε σκόνη

Η διαδικασία αυτή παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα μα και αρκετά μειονεκτήματα. Η απλότητα της μεθόδου, η δημιουργία αρκετά πολύπλοκων σχημάτων καθώς και η αξιόλογη ομογενής δομή αποτελούν τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου. Από την άλλη πλευρά το υψηλό κόστος, η δυσκολία του ελέγχου της πυκνότητας καθώς και του μεγέθους των πόρων, η εισαγωγή ξένων στοιχείων (Ασβέστιο, Τιτάνιο) αποτελούν τα κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου [8].

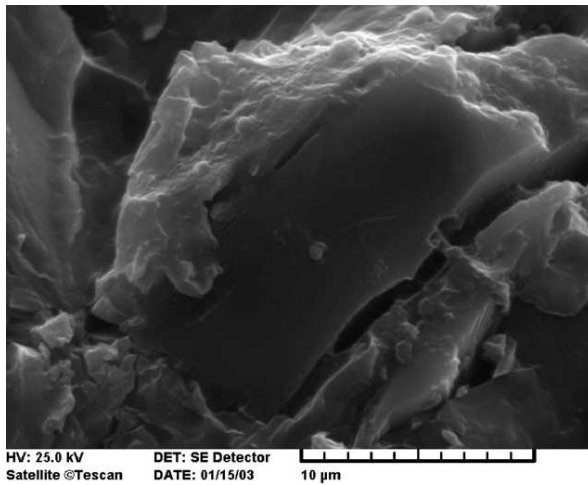
2.1.2. Αφροποίηση με αέριο.

Η διαδικασία σε αυτήν την μέθοδο έχει ως εξής:

Τα σωματίδια από καρβίδιο του πυριτίου ή οξείδιο (αλουμινίου/μαγνησίου) χρησιμοποιούνται με σκοπό να μεγιστοποιήσουν το ιξώδες του τήγματος. Το πρόβλημα που εμφανίζεται στην μέθοδο αυτή είναι ο τρόπος που θα εισαχθούν τα σωματίδια αυτά στο τήγμα, καθώς και το πώς θα επιτευχθεί η ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων αυτών. Στην συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία αφροποίησης του τήγματος με εισαγωγή αερίου (συνήθως χρησιμοποιείται αέρας, άζωτο και αργό) με την βοήθεια περιστρεφόμενων αναδευτήρων ή με ακροφύσια τα οποία ταλαντώνονται. Οι αναδευτήρες καθώς και τα ακροφύσια τείνουν να παράγουν ομοιόμορφες φυσαλίδες στο τήγμα και να τις κατανέμουν ομοιόμορφα [9].

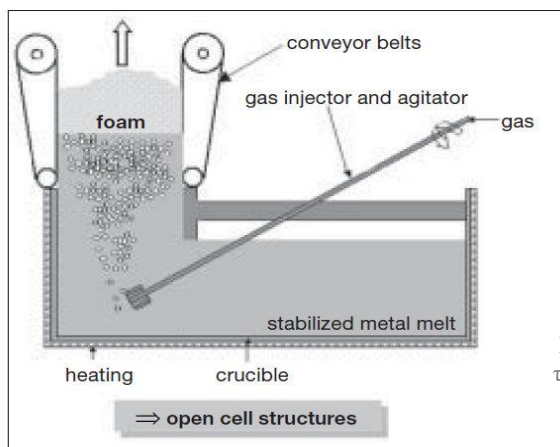
Ο όγκος των φυσαλίδων αυτών μπορεί να ελεγχθεί αν ρυθμιστεί η ροή του αέρα, ο αριθμός και το σχήμα των ακροφυσίων και η ταχύτητα περιστροφής. Αν χρησιμοποιηθούν κεραμικά σωματίδια τότε η πυκνότητα του χυτού αυξάνεται, οι φυσαλίδες παγιδούνται και τα τοιχώματα των κυψελίδων σταθεροποιούνται και έτσι αποτρέπεται η συνένωση των κελιών. Ο μεταλλικός αφρός που δημιουργείται

μεταφέρεται και στην συνέχεια υποβάλλεται σε διαδικασία σταθεροποίησης. Με αυτό τον τρόπο παραγωγής δημιουργούνται panels με 1,5 m πλάτος και 25-155 mm πάχος.



Εικόνα 4. Εικόνα SEM από δείγμα μεταλλικού αφρού που έχει παραχθεί με αεροποίηση αερίου με μεγάλη συγκέντρωση SiC
Πηγή: Metal foam a design guide.Ashby M.

Το βασικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι τα αρχικά υλικά της διεργασίας είναι αρκετά φθηνά, ότι μπορούν να παραχθούν κομμάτια μεγάλου αριθμού και μπορεί να ελεγχθεί η σχετική πυκνότητα του υλικού. Το βασικότερο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι λόγω της ύπαρξης SiC είναι δύσκολο να κατεργαστεί. Επίσης παρουσιάζονται προβλήματα καθίζησης μετάλλου και πολύ συχνά εμφανίζεται μικρός αριθμός φυσαλίδων που έχει ως αποτέλεσμα μια ανομοιόμορφη κατανομή πόρων [10].

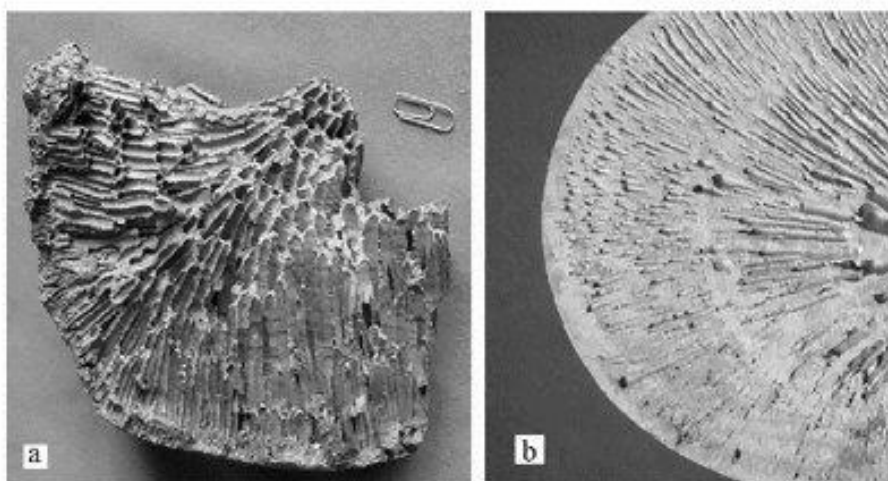


Εικόνα 5: Διάγραμμα της τεχνικής έγχυσης αερίου για την παραγωγή μεταλλικού αφρού
Πηγή: Production and Application of Aluminium foam

2.1.3. Διαδικασία Gasars

Αυτή η μέθοδος έχει σαν βάση την σχέση που έχει η πίεση με την διαλυτότητα του υδρογόνου. Με γνώμονα την παρατήρηση ότι μερικά υγρά μέταλλα σχηματίζουν ευτηκτικά συστήματα με υδρογονωμένο αέριο, τήκοντας ένα από τα μέταλλα αυτά σε υδρογονωμένη ατμόσφαιρα σε συνθήκες υψηλής πίεσης (>50 atm) δημιουργείται ένα ομοιογενές τήγμα γεμάτο με υδρογόνο [11].

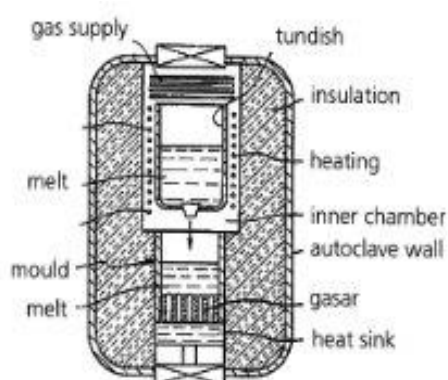
Στην συνέχεια η θερμοκρασία μειώνεται με αποτέλεσμα το τήγμα να υφίσταται μία μετάβαση σε ετερογενές διφασικό σύστημα (αέριο και στερεό). Όταν το τήγμα αυτό ψύχεται τότε προκαλείται σταθεροποίηση. Κατά την διαδικασία της στερεοποίησης το υδρογόνο αυξάνεται και σχηματίζονται οι φυσαλίδες [11]. Η διαδικασία θα πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε οι φυσαλίδες να μην μετακινηθούν στην υγρή ζώνη αλλά να είναι κοντά στην ζώνη στερεοποίησης και να παραμείνουν στο στερεό. Η μορφολογία των πόρων που θα δημιουργηθούν έχουν άμεση σχέση με το υδρογόνο, την πίεση, την κατεύθυνση της χημικής σύστασης του τήγματος καθώς και τον ρυθμό απομάκρυνσης της θερμότητας.



Εικόνα 6: Παραδείγματα μεταλλικών αφρών Gasars με βοήθεια υδρογόνου (a) με την βοήθεια μαγνησίου (b)

Πηγή: Hydrogen technology for porous metals (Gasars) production. Shapovalov et all (2008)

Η διάμετρος των πόρων που δημιουργούνται κυμαίνονται κατά μέσο όρο από 10 μm μέχρι 10 mm, το μήκος των πόρων από 100 μm έως 300 μm. Ανάλογα με την διαδικασία στερεοποίησης που εφαρμόζεται ο προσανατολισμός των πόρων μπορεί να εμφανίζεται με ακτινική μορφή, με αξονική μορφή ή ακόμη και ο συνδυασμός και των δυο. Ο τρόπος παραγωγής μεταλλικών αφρών με την μέθοδο Gasars εφαρμόζεται στο Νικέλιο, στο Αλουμίνιο, στο Χαλκό και στο Μαγνήσιο. Ακόμη έχει εφαρμογή και σε μέταλλα κοβαλτίου, χρωμίου, μολυβδαίνιου και σε κάποια κεραμικά [12].



Εικόνα 7 : Μηχανή παραγωγής Gasars

Πηγή: Processing of metal foam – Challenges and Opportunities. University of Erlangen-Nurberg germany.

2.2 Αφροποίηση μεταλλικών αφρών μέσω τήξης σκόνης μετάλλου .

Με την βοήθεια της τήξης των μετάλλων μπορεί να δημιουργηθεί ποσότητα μεταλλικών αφρών. Η βασική διαδικασία είναι η τήξη από σκόνες στο οποίο θα περιέχεται ένα μέσο που όταν διασπαστεί θα απελευθερώσει το αέριο.

2.2.1 Μέθοδος FORMGRIP

Η διαδικασία αφροποίησης FORMGRIP (Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors) καλείται η ανάμιξη της σκόνης υδριδίου του μετάλλου με τηγμένο αλουμίνιο και τη θέρμανση της σκόνης αυτής σε συγκεκριμένο χρονικό

διάστημα [13]. Κατά την θερμική αυτή διαδικασία προκύπτει ο σχηματισμός του οξειδίου γύρω από τους κόκκους του υδριδίου. Η παρουσία του οξειδίου αυτού καθυστερεί την άμεση έκλυση του υδρογόνου κατά την φάση εισαγωγής της σκόνης στο τηγμένο μέταλλο. Έτσι μας δίνεται η δυνατότητα να αναμιχθεί η σκόνη με ομοιόμορφο τρόπο στην μάζα του μετάλλου.

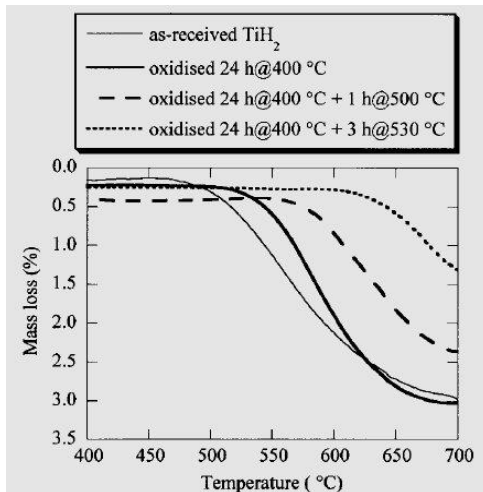
Στην συνέχεια, έπειτα από την διαδικασία της χύτευσης σε ειδικά διαμορφωμένα καλούπια από γραφίτη ακολουθεί η αναθέρμανση, η έκλυση υδρογόνου, η αφροποίηση και σταθεροποίηση της δομής με την διαδικασία της ελεγχόμενης ψύξης [13].

Έχει παρατηρηθεί το γεγονός ότι η βέλτιστη θερμική επεξεργασία της σκόνης πρέπει να περιλαμβάνει δύο στάδια [14]:

Στο πρώτο στάδιο, η θερμοκρασία παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα (400°C) ώστε να μην διασπαστεί το υδρίδιο. Το στάδιο αυτό διαρκεί 24 ώρες και σχηματίζεται το πρώτο στρώμα οξειδίου. Το πάχος αυτού του στρώματος είναι σχετικά μικρό.

Στο δεύτερο στάδιο της θέρμανσης η θερμοκρασία δεν παραμένει στους 400°C αλλά αυξάνεται στους $500-530^{\circ}\text{C}$. Το στάδιο αυτό διαρκεί λιγότερο από 1-3 ώρες αλλά ευνοεί την δημιουργία ενός μεγαλύτερου στρώματος οξειδίου, έτσι ώστε να αντέχει την υψηλή θερμοκρασία του λιωμένου μετάλλου. Μέσω της πυρηνοποίησης των πόρων, της ανάπτυξης τους, της απελευθέρωσης του υδρογόνου και της αναδιάταξης τους με το μέταλλο, διαμορφώνεται η τελική μορφή της δομής του μεταλλικού αφρού.

Οι μηχανισμοί που μόλις αναφέρθηκαν επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την περιεκτικότητα του μετάλλου και την διαδικασία - πορεία της θέρμανσης. Η αύξηση της τιμής του ιξώδους πραγματοποιείται με την προσθήκη των κατάλληλων χημικών ενώσεων (π.χ. πυρίτιο SiC). Καθώς αυξάνεται το ιξώδες επιτυγχάνεται η μείωση του διαχωρισμού των σωματιδίων TiH_2 από το σώμα του μετάλλου και έτσι κατά την διαδικασία της αφροποίησης εμφανίζεται μια πιο ομαλή και ομοιογενής δομή. Ακόμη το ιξώδες είναι αρμόδιο για την ρύθμιση της ανάπτυξης των πόρων μέσα στο καλούπι.



Εικόνα 8: Θερμοσταθμικές καμπύλες (μέτρηση θερμικής επεξεργασίας οξείδωσης TiH₂. Ο ρυθμός θέρμανσης ήταν 20 C min ± 1.

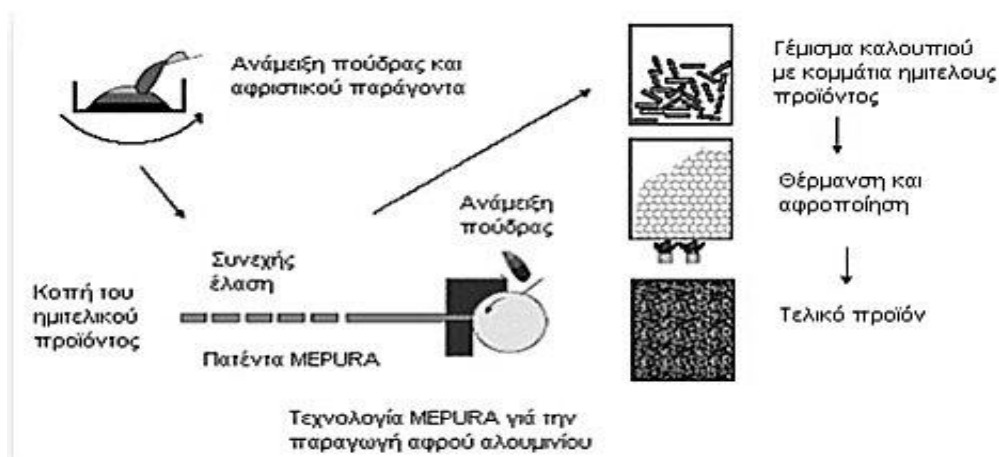
Πηγή: The FORMGRIP Process: Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors. Gergely et al.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα εξής: η διαδικασία της αφοροποίησης είναι ελεγχόμενη, υπάρχει η δυνατότητα της δημιουργίας τρισδιάστατων σχημάτων και καλής ποιότητας πορώδεις. Από την άλλη πλευρά το κύριο μειονέκτημα είναι η προσθήκη ξένων ουσιών στο τελικό προϊόν καθώς και η μεγάλη χρονική διάρκεια του σταδίου προπαρασκευής [14].

2.2.2. Τεχνολογία Meruga

Η διαδικασία Meruga βασίζεται στην συνεχή διέλαση ώστε να συμπιεστεί το μίγμα. Το ημιτελικό υλικό τοποθετείται μέσα σε ένα καλούπι ώστε να έχει ένα καθορισμένο σχήμα [15]

Στην συνέχεια το υλικό δέχεται μια θερμική κατεργασία, η οποία δεν υπερβαίνει το σημείο τήξης της μεταλλικής μήτρας και είναι πάνω από το όριο θερμοκρασίας αποσύνθεσης του αφριστικού παράγοντα. Σε αυτό το στάδιο ο παράγοντας αφοροποίησης βγαίνει σε αποσύνθεση και απελευθερώνει υδρογόνο σε μορφή αερίου. Το αέριο έχει σαν αποτέλεσμα την διόγκωση του υλικού και συντελεί στην δημιουργία μιας νέας δομής με υψηλό πορώδες και κλειστούς πόρους. Η διαδικασία της αφοροποίησης τερματίζεται με ψύξη σε αρκετά χαμηλότερα επίπεδα από το σημείο τήξης [15].



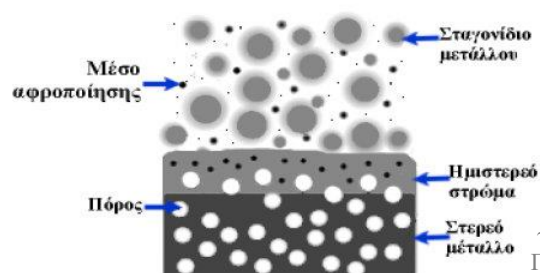
Εικόνα 9: Τεχνολογία Merpura κατά την διαδικασία παραγωγής αφρού αλουμινίου.
 Πηγή: Aluminium Foam Catrin Kammer Goslar Germany Fraunhofer,

Η ποιότητα του αφρού καθορίζεται από ποικίλους παράγοντες: θερμοκρασία, πίεση, χρονικό διάστημα, συνθήκες μίξης, παράμετροι αεροποίησης και παράμετροι θέρμανσης [16].

2.3. Αεροποίηση με ψεκασμό

Η αεροποίηση με ψεκασμό εφαρμόζεται σε μια μεγάλη ομάδα μετάλλων και κραμάτων. Η διαδικασία της αεροποίησης βασίζεται στην δημιουργία νέφους μεταλλικών σταγονιδίων και ενός αεροποιητικού μέσου καθώς και στην τοποθέτηση τους μέσα σε μία βάση που έχει διαμορφωθεί καταλλήλως.

Το αεροποιητικό μέσο έρχεται σε επαφή με το υγρό μέταλλο και διασπάται. Με αυτό τον τρόπο αποδίδει την κατάλληλη ποσότητα αερίου ώστε να σχηματιστούν πόροι. Με την βοήθεια της βάσης μπορεί να σχηματιστεί οποιοδήποτε σχήμα: ράβδοι, σωλήνες, φύλλα [17].



Εικόνα 10: Διαδικασία παραγωγής μεταλλικού αφρού με την βοήθεια του ψεκασμού.
 Πηγή: Kelley P. US Patent 5, 266

Το βασικότερο πλεονέκτημα της δημιουργίας μεταλλικών αφρών με την βοήθεια του ψεκασμού είναι η μεγάλη ποικιλία σχημάτων που μπορούν να δημιουργηθούν, ενώ το βασικότερο μειονέκτημα είναι η ανομοιογένεια του πορώδους που παρουσιάζεται [17].

2.4. Αφροποίηση με χύτευση

2.4.1 Χύτευση με πολυμερικό πρότυπο

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει πέντε στάδια [18]:

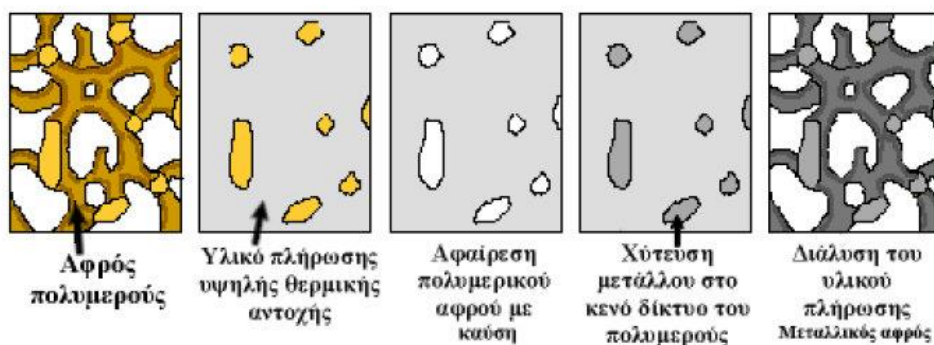
Στο πρώτο στάδιο δημιουργείται αφρός από πολυμερές καθώς και η μορφή που θα έχει το τελικό αποτέλεσμα.

-Στο δεύτερο στάδιο χυτεύεται το υλικό πλήρωσης δηλαδή ένα μίγμα από κεραμικά υλικά (ασβέστιο, μουλίτης γύψο, ασβέστιο, ρητίνη) στο κενό όγκο του αφρού.

-Κατά το τρίτο στάδιο στερεοποιείται το κεραμικό μίγμα και πραγματοποιείται η αφαίρεση του πολυμερικού αφρού με την βοήθεια της θέρμανσης σε υψηλή θερμοκρασία.

-Έπειτα κατά το τέταρτο στάδιο στον κενό χώρο που δημιουργείται κατά την καύση του πολυμερικού αφρού τοποθετείται το μέταλλο με την βοήθεια της χύτευσης.

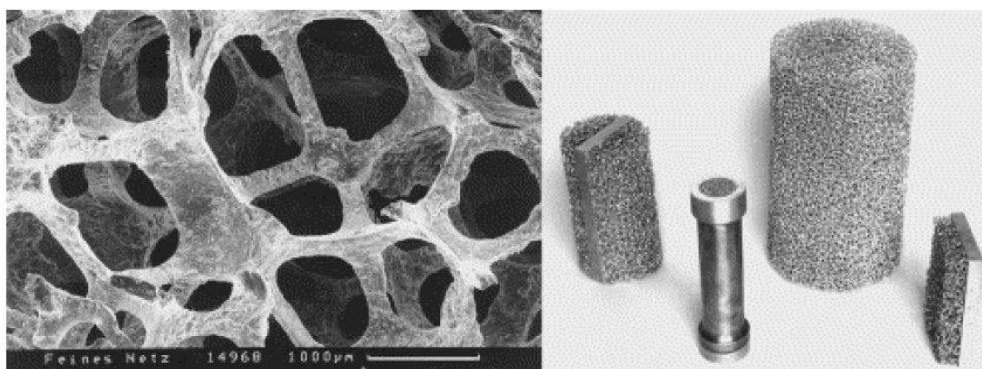
-Το τελικό στάδιο εσωκλείει την διεργασία κατά την οποία το υλικό πλήρωσης απομακρύνεται είτε με την βοήθεια νερού υπό πίεση είτε μηχανικά.



Εικόνα 11: Διαδικασία παραγωγής αφρού αλουμινίου με χύτευση
Πηγή: Product information of “Duocel”

Άξιο είναι να αναφερθεί ότι απαιτείται προσοχή τόσο στην διαδικασία χύτευσης του μετάλλου αλλά και στην διαδικασία αφαίρεσης του υλικού πλήρωσης. Η χύτευση περιλαμβάνει τα εξής στάδια: την τήξη του μετάλλου σε συνθήκες υψηλής πίεσης με σκοπό την μείωση του ιξώδους, την διαδικασία χύτευσης σε υψηλή πίεση, την αναρρόφηση του μετάλλου με την βοήθεια αντλίας κενού και τέλος την ελεγχόμενη στερεοποίηση. Με αυτή την διαδικασία εξασφαλίζεται η εισροή του υγρού μετάλλου σε όλο τον κενό χώρο που έχει δημιουργηθεί λόγω της απομάκρυνσης του πολυμερικού αφρού [19].

Το υλικό πλήρωσεως αφαιρείται με τέτοια διαδικασία ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος της θραύσης ιδιαίτερα των λεπτών στελεχών του κυψελοειδούς μετάλλου και την καταστροφή της δομής του. Η σύσταση της δομής των αφρών είναι κυψελοειδής χαρακτηρισμένη από ομοιογένεια και στιβαρότητα [19].



Εικόνα12 : Δημιουργία αντικειμένων με την διαδικασία χύτευσης με πολυμερικό πρότυπο
Πηγή: Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal Foams: Banhart.

2.4.2. Χύτευση (Lattice Block Materials)

Η παρασκευή ξεκινά αρχικά με την κατασκευή ενός πολυμερικού προτύπου δικτυωτής δομής. Το επόμενο βήμα είναι η διαδικασία χύτευσης του μετάλλου το οποίο θα λάβει την θέση του πολυμερικού αφρού ο οποίος θα εξαερωθεί. Το αρχικό πρότυπο είναι σε τέτοια μορφή ώστε η εισροή του υγρού μετάλλου να γίνει με εύκολο τρόπο. Πρόκειται για ένα συμμετρικό και γεωμετρικά απλό δίκτυο καναλιών. Όλα τα χυτεύσιμα μέταλλα μπορούν να λάβουν μέρος σε αυτή την διαδικασία. Είναι

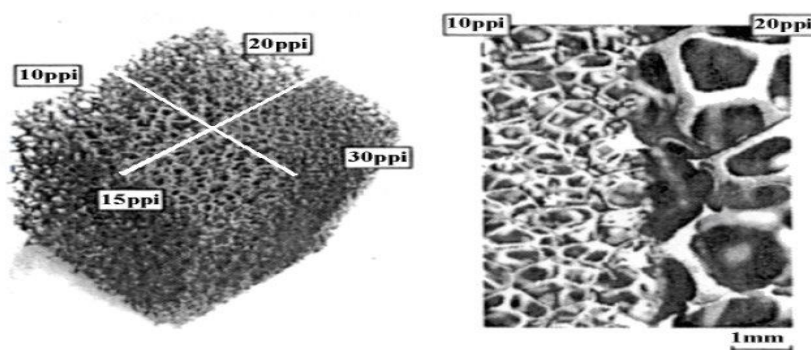
προτιμότερο να χρησιμοποιούνται μέταλλα τα οποία εμφανίζουν μεγαλύτερη ρευστότητα γιατί η χύτευση σαν διαδικασία είναι αρκετά απαιτητική. Τα μέταλλα με υψηλή ρευστότητα δημιουργούν προϊόντα τα οποία δεν παρουσιάζουν ατέλειες [19].

Τα πρώτα υλικά με αυτά τα χαρακτηριστικά και με δομή μορφής τρισδιάστατου πλέγματος εμφανίστηκαν από την εταιρία Jamcorp και είναι ευρέως γνωστά με τον όρο υλικά δικτυωτής δομής. Στην κατηγορία αυτή εντάσσεται το σύνολο των κυψελοειδών υλικών που η δομή τους συνίσταται στην παράθεση στοιχειωδών μοτίβων στο επίπεδο ή στον χώρο [19].

2.4.3. Χύτευση για την κατασκευή μεταλλικών σπόγγων μεταβλητού πορώδους.

Αρχικά κατασκευάζονται αναλώσιμα πρότυπα από πολυμερικό αφρό με διαφορετικό πορώδες. Έπειτα τα πρότυπα αυτά ενώνονται με ρητίνες με αποτέλεσμα να κατασκευαστεί ένα ενιαίο πρότυπο. Το νέο ενιαίο πρότυπο που δημιουργείται επικαλύπτεται από ένα μίγμα από κεραμικές ουσίες. Στην συνέχεια ακολουθεί το στάδιο της θέρμανσης [2].

Κατά την διαδικασία αυτή η ρητίνη αφαιρείται και το κεραμικό περίβλημα επέρχεται στο στάδιο της στερεοποίησης σχηματίζοντας έτσι ένα καλούπι χύτευσης το οποίο θα δώσει και το οριστικό σχήμα στο μεταλλικό σπόγγο. Η παρασκευή ενός μεταλλικού σπόγγου πλεονεκτεί σε εφαρμογές που επιβάλλεται η ομαλή μετάβαση από το ένα στάδιο στο άλλο [2].



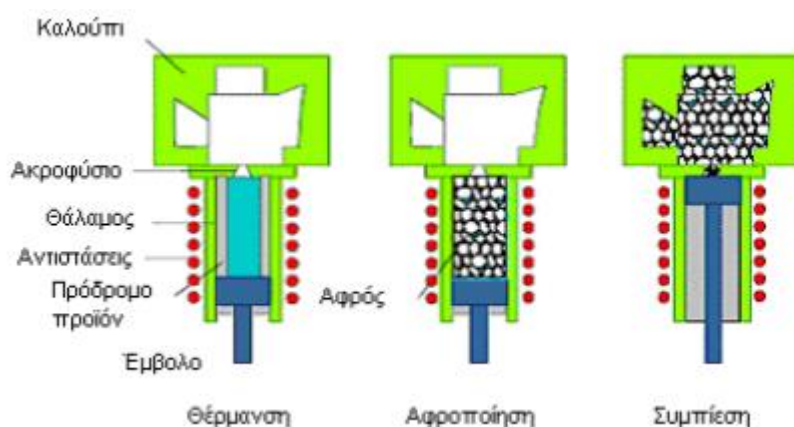
Δεξιά Εικόνα 13: Παράδειγμα κυβικού σπόγγου με τέσσερις διαστάσεις (διαφορετικά μέρη πορώδους)
Αριστερή Εικόνα: Διεπιφάνεια με περιοχές διαφορετικού πορώδους.

Πηγή: Production and infiltration of metallic open cell structures with different pore sizes. Banhart et al.

2.5. Αφροί αλουμινίου με αρκετά πολύπλοκο σχήμα

Πολλές φορές με την εξέλιξη της τεχνολογίας απαιτείται η κατασκευή μεταλλικών αφρών σε αρκετά πολύπλοκο σχήμα. Για να παραχθούν τέτοιοι μεταλλικοί αφροί εισάγεται μια ποσότητα διωκομένου αφρού σε υγρή μορφή. Στο καλούπι αυτό γίνεται και η τελική διόγκωση. Τα προϊόντα τα οποία προκύπτουν παρουσιάζουν πυκνότητα μεταξύ $0,5 \text{ g/cm}^3$ και 1 g/cm^3 . Το αρχικό στάδιο της διαδικασίας αυτής μπορεί να συσχετιστεί με αυτό της τεχνολογίας MERURA. Ένα παράδειγμα που θα μπορούσε να δοθεί είναι η ανάμιξη της πούδρας από αλουμίνιο με τον αφριστικό παράγοντα και στην συνέχεια η συνεχής διέλαση σε ένα αφροποιήσιμο υλικό που είναι συμπαγές [20].

Η βασική διαφορά της παραγωγής αυτής είναι ότι το συμπαγές αυτό υλικό θα θερμανθεί σε ένα θάλαμο αφροποίησης μέχρι το στάδιο που το κράμα θα επέλθει στο σημείο τήξης. Το αποτέλεσμα της όλης διαδικασίας είναι η δημιουργία ενός αφρού σε υγρή μορφή, ο οποίος θα χυτευτεί με πλήρη έλεγχο σε ένα καλούπι από μέταλλο ή σε ένα καλούπι από άμμο. Το τελευταίο επιτρέπει την παραγωγή και την δημιουργία πρωτοτύπων σε χαμηλό κόστος. Τα κομμάτια αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν πυρήνες στην χύτευση μέσω πίεσης αλουμινίου [20].



Εικόνα 14: Παραγωγή πολύπλοκων τεμαχίων από αφρό αλουμινίου
Πηγή: http://users.uoi.gr/mgeorgat/down/8_aluminum_foams.pdf

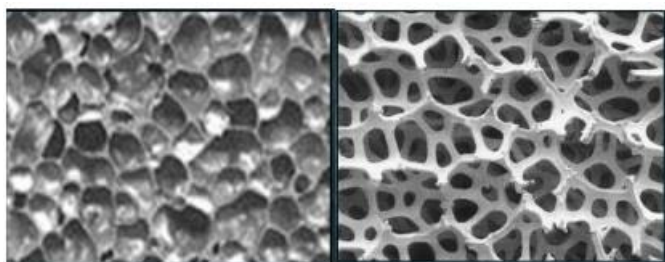
Κεφάλαιο 3:

Ιδιότητες Μεταλλικών Αφρών

Οι μεταλλικοί αφροί είναι υλικά που έχουν πληθώρα χαρακτηριστικών που είναι εντελώς διαφορετικά από τα αντίστοιχα υλικά από τα οποία έχουν παραχθεί. Η μορφή τους είναι κυψελοειδής έχουν μεγάλο λόγο δύναμης προς βάρος και χρησιμοποιούνται στην μηχανική καθώς και στην μετάδοση θερμότητας. Γενικά χαρακτηρίζονται ως ιστροπικά αφρώδη υλικά με αρκετά ασυνήθιστες ιδιότητες, οι οποίες όμως τα καθιστούν κατάλληλα για ειδικές εφαρμογές [21].

Όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα κεφάλαια οι μεταλλικοί αφροί κατασκευάζονται από διάφορα υλικά (αλουμίνιο, τιτάνιο, νικέλιο κ.α.). Το που θα χρησιμοποιηθεί ο μεταλλικός αφρός που θα παραχθεί, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επιλογή του υλικού που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη καθώς και στον τρόπο κατασκευής που θα επιλεγεί [21].

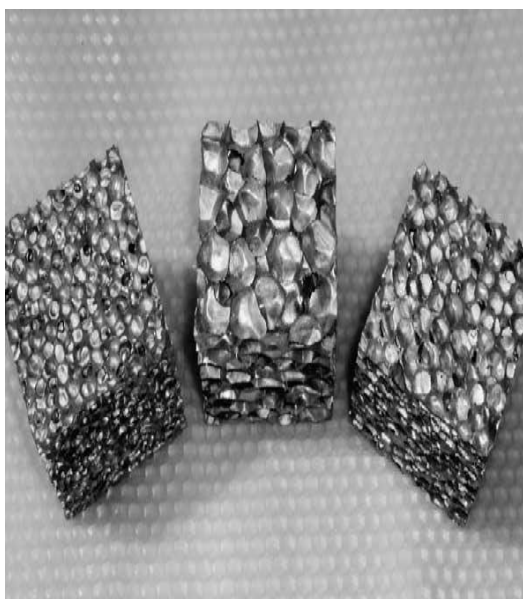
Ως προς την δόμηση οι μεταλλικοί αφροί μπορούν να χωριστούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες: Στους μεταλλικούς αφρούς **κλειστών κυψελών** και στους μεταλλικούς αφρούς **ανοικτών κυψελών**. Η διαφορά μεταξύ των δυο αυτών κατηγοριών είναι ευδιάκριτη. Οι κυψέλες ανοιχτού τύπου επιτρέπουν την διέλευση ρευστού. Οι αφροί αυτού του είδους χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτείται το φιλτράρισμα καθώς και η μετάδοση θερμότητας. Οι μεταλλικοί αφροί κλειστού τύπου είναι κατάλληλοι για την απορρόφηση ενέργειας, για δομική χρήση καθώς και για την κατασκευή εξαρτημάτων αυτοκινήτων [22].



Εικόνα 15: Μεταλλικοί αφροί
Κλειστών και Ανοικτών κυψελών.
Πηγή: www.spaceflight.esa

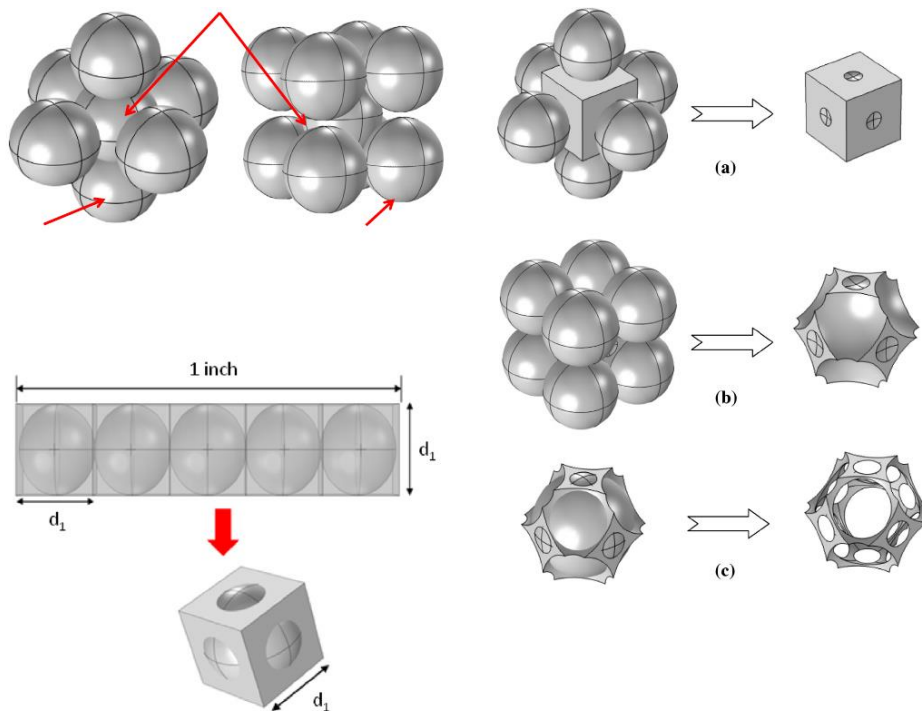
3.1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά Μεταλλικών Αφρών

Η δομική σύσταση των μεταλλικών αφρών χαρακτηρίζεται από την τοπολογία των πόρων (ανοικτές ή κλειστές κυψέλες), την τιμή της σχετικής συχνότητας, το μέγεθος καθώς και το σχήμα των κυψελών. Η σχετική πυκνότητα των μεταλλικών αφρών κυμαίνεται σε ένα μεγάλο φάσμα από 2% έως και 100% [23].



Εικόνα 16: Αφροί με διαφορετική πυκνότητα
Πηγή: Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 261 (2005)-124.

Στο εμπόριο οι μεταλλικοί αφροί (για παράδειγμα του αλουμινίου) που έχουν κατασκευαστεί με την βοήθεια της χύτευσης, η δομή τους μπορεί να περιγραφεί ως εξής: παρουσιάζεται ένα κενό διάστημα το οποίο στρογγυλοποιείται και περικλείεται από ένα είδος μετάλλου. Το κάθε ένα από αυτά χαρακτηρίζεται ως πόρος και συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας μια γεωμετρία με μικρές παραλλαγές στο εσωτερικό του [19].



Εικόνα 17 : Μορφοποίηση Μεταλλικών Αφρών

Πηγή: Microporous and Mesoporous Materials 196. (2014) A.S. Suleiman, N Dukhan .104-114

3.2. Φυσικές ιδιότητες Μεταλλικών Αφρών

Η σημαντικότερη ιδιότητα των μεταλλικών αφρών σχετίζεται με το ειδικό τους βάρος. Τα περισσότερα αφρώδη μεταλλικά υλικά είναι πολύ ελαφριά. Η πληθώρα των μεταλλικών αφρών έχουν πυκνότητα μικρότερη από την μονάδα με αποτέλεσμα να μπορούν να επιπλέουν στο νερό. **Γενικά οι ιδιότητες των μεταλλικών αφρών καθορίζονται από [24]:**

- 1) Την μορφή και την διαστασιολόγηση των κελιών
- 2) Τις ιδιότητες του αρχικού υλικού από το οποίο έχουν κατασκευαστεί.
- 3) Από την πυκνότητα και την μεταβολή του όγκου των μετάλλων

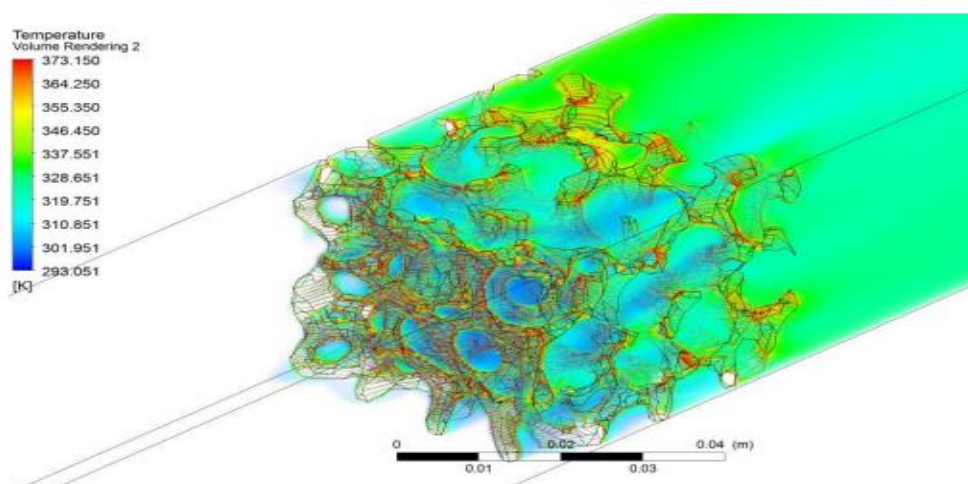
Θερμικές ιδιότητες:

Οι βασικές θερμικές ιδιότητες διαφοροποιούνται από το σημείο τήξης, τον συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας, την ειδική θερμότητα, την αντίσταση στην θερμότητα καθώς και την θερμική αγωγιμότητα που παρουσιάζουν. Όλα τα προαναφερόμενα είναι ίδια με αυτά του αρχικού υλικού. Το πώς θα μεταδοθεί η

θερμότητα στην εσωτερική δομή του αφρού συνδέεται άμεσα από την θερμική του αγωγή ενώ η αγωγή του αέρα στους πόρους μπορεί να μην ληφθεί υπ όψη [25].

Όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα έτσι και η θερμική έχει άμεση εξάρτηση από την πυκνότητα του υλικού. Η χρήση των υπολογιστικών μεθόδων καθώς και η μοντελοποίηση των κελιών παρουσιάζει μεγάλη σπουδαιότητα για να μπορέσει να υπολογιστεί η θερμότητα [25].

Οι μεταλλικοί αφροί ανοικτών κυψελών παρουσιάζουν μεγάλα ποσοστά μετάδοσης θερμότητας. Λόγω της αυξημένης εσωτερικής επιφάνειας ανά όγκο των αφρών αυτών, τους καθιστά μια πολύ καλή λύση για την χρήση τους ως εναλλακτικές θερμότητας που η εξέλιξη τους αναμένεται να αυξηθεί ακόμη πιο πολύ με την πάροδο των χρόνων. Οι μεταλλικοί αφροί όσο αναφορά την κατηγορία θερμότητα παρουσιάζουν συνδέσμους υψηλής αγωγιμότητας με αποτέλεσμα την ταχύτερη μεταφορά θερμότητας εντός του υλικού.

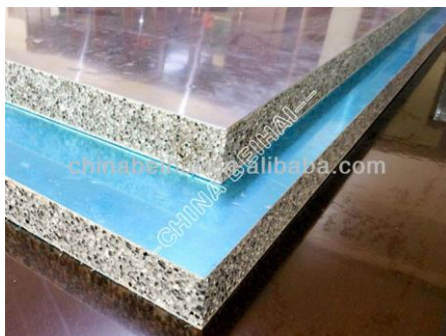


Εικόνα 18: Η μεταφορά θερμότητας σε δομή μεταλλικού αφρού

Πηγή: Manufacture, Characterization and application of cellular metals and metal foams". Banhart, J.

Μόνωση ήχου:

Οι μεταλλικοί αφροί αποτελούν εξαιρετικά υλικά απορρόφησης ήχου. Ο λόγος είναι ότι ο ήχος ανακλάται μέσα από την ακανόνιστη δομή των πόρων. Η κίνηση αυτή προκαλεί παραμορφώσεις στο εξωτερικό των κελιών και από ηχητική μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Όταν οι μεταλλικοί αφροί αποτελούνται από ομογενείς πόρους τότε η απορρόφηση του ήχου αυξάνεται [26].



Εικόνα 19: Πάνελ αφρού αλουμινίου ηχομόνωσης

Πηγή: http://www.chinaseniorsupplier.com/Construction_Real_Estate/Soundproofing_Materials/1679834144/Closed_Cell_Aluminum_Foam_roof_with_Al_Sheet.html

Αγωγιμότητα:

Τα πυκνά μέταλλα παρουσιάζουν κατά δέκα φορές μεγαλύτερη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα από αυτή των μεταλλικών αφρών. Η αναλογία του όγκου των μεταλλικών κομματιών των αφρών είναι πολύ μικρή σε σχέση με αυτή του όγκου των πόρων που είναι γεμάτοι αέρα. Η αγωγιμότητα των μεταλλικών αφρών αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η πυκνότητα του αφρού. Η θερμική αγωγιμότητα μπορεί να μειωθεί κ' άλλο μέσω μιας κατεργασίας οξείδωσης. Ο συντελεστής της θερμικής διαστολής παραμένει σταθερός για όλους τους τύπους των αφρών. Σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες δεν μεταβάλλονται αλλά σε μικρό βαθμό παραμορφώνονται [27].

3.3. Χημικές ιδιότητες Μεταλλικών Αφρών

Οι περισσότεροι αφροί και κυρίως του αλουμινίου είναι άφλεκτοι. Υπό την επίδραση υψηλής θερμότητας δεν εκλύουν τοξικά αέρια. Η συμπεριφορά των μεταλλικών αφρών στην διάβρωση εξαρτάται από τα κράματα από τα οποία έχουν κατασκευαστεί καθώς και από τον τρόπο κατασκευής [28].

Άξιο είναι να αναφερθεί ότι όλες οι ιδιότητες των μεταλλικών αφρών έχουν άμεση εξάρτηση με την δομή του υλικού. Οι αφροί που έχουν την ίδια σύσταση αλλά έχουν επεξεργαστεί διαφορετικά παρουσιάζουν διαφορετικές ιδιότητες. Θα ήταν ωφέλιμο λοιπόν πριν την χρήση ενός μεταλλικού αφρού να γνωρίζουμε την

τεχνολογία παραγωγής που έχει προηγηθεί καθώς και το κράμα από το οποίο έχει δημιουργηθεί [28].

3.4. Μέτρο ελαστικότητας

Στο τελικό προϊόν που προκύπτει, το μέτρο ελαστικότητας είναι μια σημαντική τιμή από την οποία μπορεί κανείς να εκτιμήσει τα όρια της αντοχής του. Το μέτρο ελαστικότητας των προϊόντων των μεταλλικών αφρών, αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας. Αυτός είναι ένας γενικός κανόνας για όλους τους μεταλλικούς αφρούς. Συνοψίζοντας η μεταβολή της πυκνότητας των μεταλλικών αφρών μεταβάλει και το μέτρο ελαστικότητας αυτών [25].

68 Metal Foams: A Design Guide

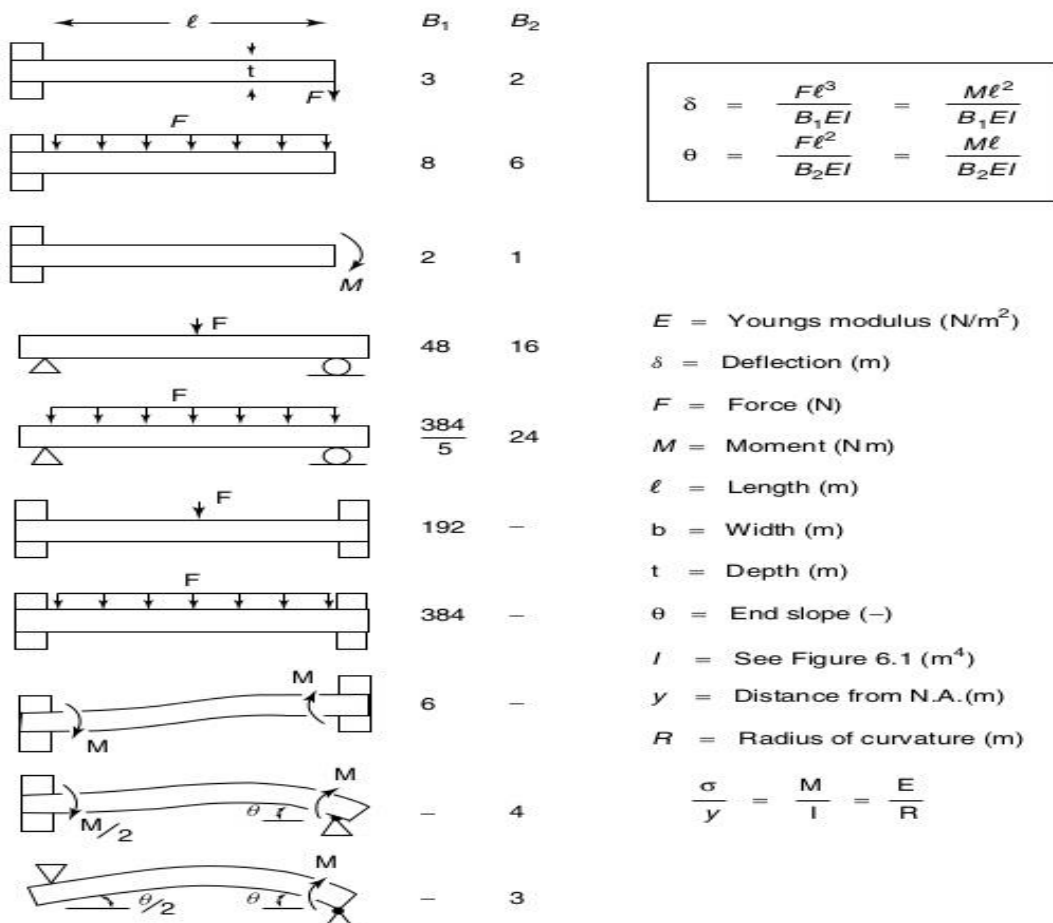
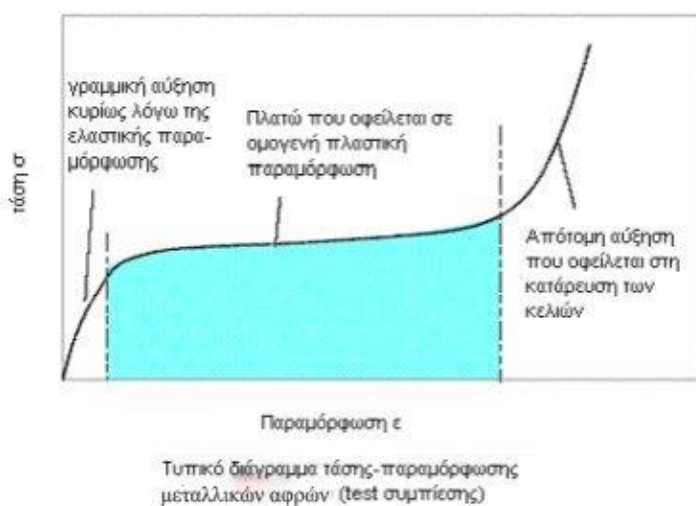


Figure 6.2 Elastic bending of beams and panels

Εικόνα 21 : Ελαστική κάμψη δοκών και φύλλων
 Πηγή: Metal foam a design guide : Ashby M.

3.5. Μηχανικές ιδιότητες

Λόγω της κυψελωτής δομής τους, οι μεταλλικοί αφροί παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά σε σύγκριση με τα άλλα μεταλλικά υλικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην μπορούν να ελεγχθούν με τα συμβατικά τεστ (αντοχή σε εφελκυσμό, κάμψη). Παρόλα αυτά η δοκιμή της θλίψης μπορεί να παρέχει τα πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα και κατηγοριοποιείται σε τρία μέρη [29]. Το διάγραμμα που ακολουθεί δείχνει μια γραμμική αύξηση της παραμόρφωσης κατά την αρχή της καταπόνησης της τάσης, ένα τμήμα αμετάβλητης τάσης στην μέση και το τμήμα που παύει η ελαστική παραμόρφωση και το υλικό διαπερνά στην πλαστική παραμόρφωση.



Εικόνα 21 Διάγραμμα τάσης -παραμόρφωσης
Πηγή: Αφρώδη Μέταλλα Νέα Αφρώδη Υλικά. Πεχλιβάνογλου

Αναλύοντας το διάγραμμα που προηγήθηκε τα αποτελέσματα που προκύπτουν στο πρώτο στάδιο δεν είναι μόνο συνέπεια της ελαστικής παραμόρφωσης που δέχεται το υλικό όπως θα συνέβαινε στην περίπτωση των απλών μετάλλων αλλά και της πλαστικής παραμόρφωσης. Στους αφρούς η μη αντιστρεπτή παραμόρφωση μπορεί να συμβεί και σε χαμηλή πίεση. Το ομαλό τμήμα που ακολουθεί εμφανίζει μια ομαλή ομογενή πλαστική παραμόρφωση. Το τρίτο και τελικό στάδιο οφείλεται στην κατάρρευση των κελιών. Τα τοιχώματα των κελιών λόγω της υψηλής καταπόνησης αγγίζονται μεταξύ τους, γεγονός το οποίο μεταβάλλει τα αρχικά τους χαρακτηριστικά.

Οι μηχανικές ιδιότητες των αφρών επηρεάζονται επίσης από την μορφολογία της επιφάνειας τους [30]. Οι αφροί που παρουσιάζουν μια λεπτή εξωτερική επιφάνεια παρουσιάζουν χαμηλότερη αντοχή, έτσι μπορεί κανείς να αναφέρει ότι η εξωτερική επιφάνεια μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα μέσο σκλήρυνσης.

Συγκριτικός Πίνακας Ιδιοτήτων Μεταλλικών Αφρών

Βασικό Κράμα		A199.5 foam	AlCu ₄ foam	A199.5 solid
Γενικές Ιδιότητες				
Παράγοντας αφροποίησης	-	TiH ₂	TiH ₂	-
Θερμική επεξεργασία αφρού	-	καμία	σκλήρυνση	-
Πυκνότητα	G cm ⁻³	0,4	0,7	2,7
Μέση διάμετρος πόρων	mm	4	3	-
Μηχανικές Ιδιότητες				
Αντοχή στη συμπίεση	MPa	3	21	-
Απορρόφηση ενέργειας στο 30% της παραμόρφωσης	MJ m ⁻³	0,72	5,2	-
	KJ kg ⁻¹	1,8	7,4	-
Συντελεστής Young	GPa	2,4	7	67
Ηλεκτρικές & Θερμικές ιδιότητες				
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	m(Ω mm ⁻²)	2,1	3,5	34
Ειδική ηλεκτρική αντίσταση	MΩ cm ⁻¹	48	29	2,9
Θερμική αγωγιμότητα	W(m K) ⁻¹	12	-	235
Συντελεστής θερμικής διαστολής	1/K	23·10 ⁻⁶	24·10 ⁻⁶	23,6·10 ⁻⁶

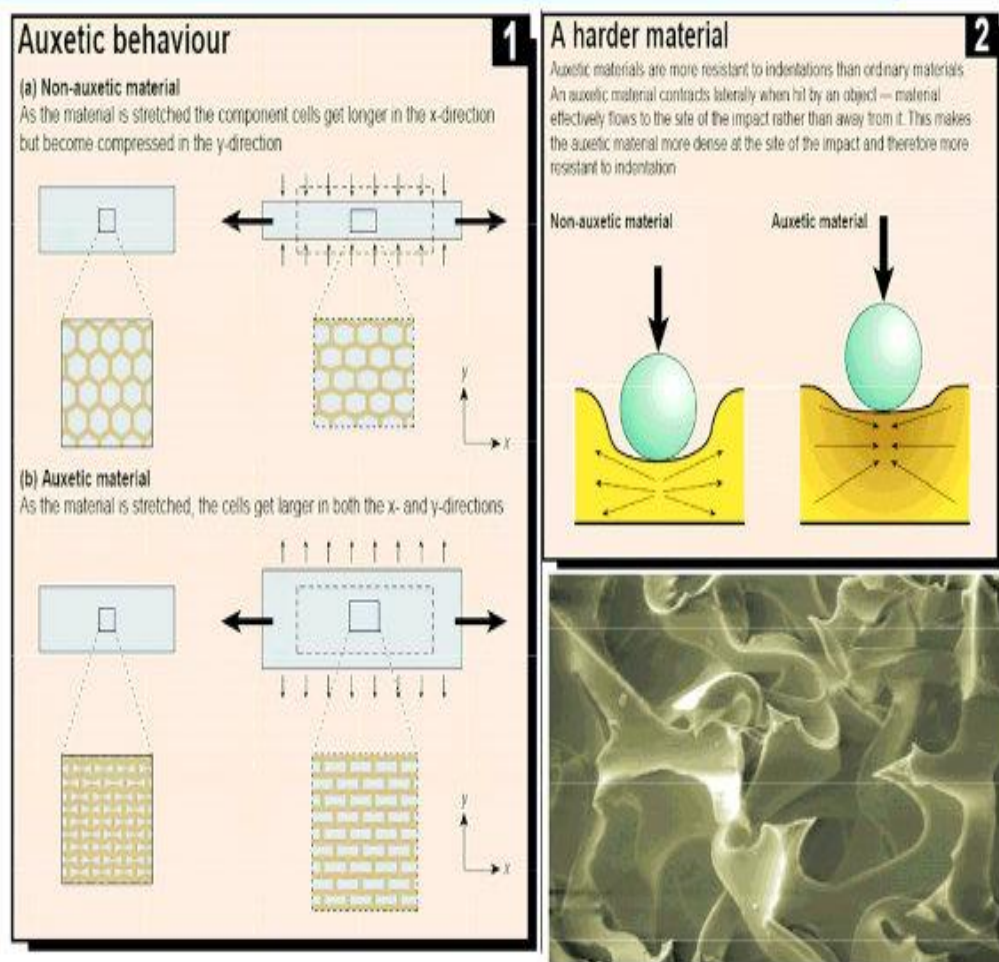
Εικόνα 22: Συγκριτικός Πίνακας Ιδιοτήτων Μεταλλικών Αφρών.
Πηγή: Αφρώδη Μέταλλα Νέα Αφρώδη Υλικά . Πεχλιβάνογλου

3.6.Αυξητικοί μεταλλικοί αφροί- ιδιότητες

Με τον όρο αυξητικές ιδιότητες καλούνται οι ιδιότητες που παρουσιάζουν τα υλικά που η τιμή του αριθμού Poisson που παρουσιάζουν είναι αρνητική. Ο αριθμός Poisson είναι ο λόγος της εγκάρσιας τάσης συστολής προς την διαμήκη τάση επιμήκυνσης. Όσο τα υλικά αυτά επιμηκύνονται τόσο αυξάνεται η διατομή τους [30].

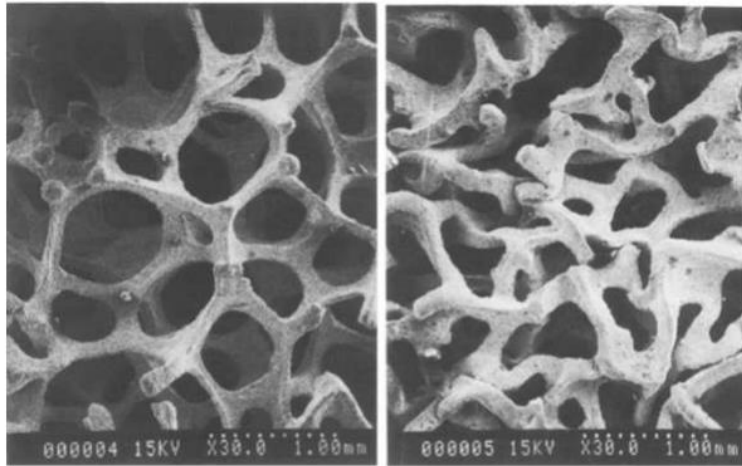
Ορισμένοι μεταλλικοί αφροί μπορούν να κατασκευαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να εμφανίζουν αυξητικές ιδιότητες. Μέσω των κατάλληλων παραγωγικών

διαδικασιών η κυβελωτή δομή τους μεταβάλλεται και πλέον οι κυψέλες έχουν τέτοια μορφή ώστε σε περίπτωση εφελκυστικής καταπόνησης, η δομή του υλικού να οδηγηθεί σε εγκάρσια έκταση.



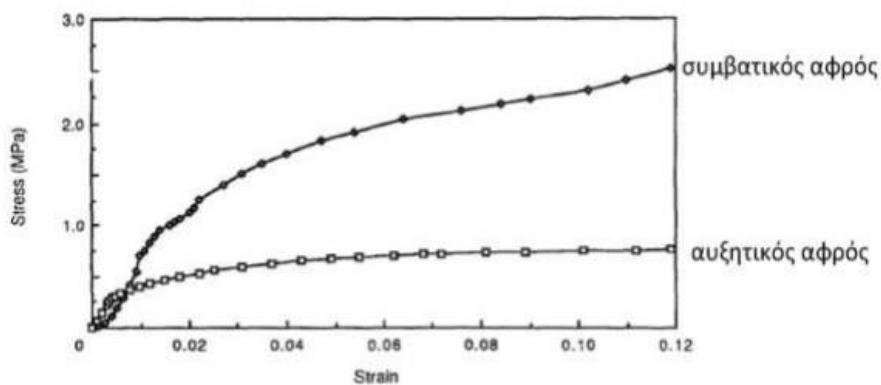
Εικόνα 20. Αυξητική συμπεριφορά μεταλλικών αφρών
Πηγή: Αφρώδη Μέταλλα Νέα Αφρώδη Υλικά. Πεχλιβάνογλου

Αναλυτικότερα οι μεταλλικοί αφροί λόγω του ότι ανήκουν στα ισότροπα υλικά παρουσιάζουν ένα εύρος τιμών στο λόγο του Poisson $[-1, +0,5]$. Μέσω μιας ειδικής επεξεργασίας συμφωνά με την οποία οι ακμές των κελιών αναδιπλώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε η μία κορυφή να πλησιάσει την άλλη, το πλήθος των κελιών αποκτά ένα είδος αυξητικής αντίδρασης στις εξωτερικές τάσεις. Οι μεταλλικοί αφροί που έχουν επεξεργαστεί με τον τρόπο αυτό ονομάζονται δομές επανεισόδου και αποτελεί μια από τις πιο σύνηθες αυξητικές δομές [31].



Εικόνα 23: Συμβατικός αφρός χαλκού, ανοικτών κελιών με ισότροπη συμπεριφορά και αφρός που έχει υποστεί μόνιμη παραμόρφωση με μεγάλο βαθμό τυχαιότητας και ισότροπη αυξητική αντίδραση
 Πηγή: Αφρώδη Μέταλλα Νέα Αφρώδη Υλικά . Πεγλιβάνογλου

Οι μεταλλικοί αυξητικοί αφροί μπορούν να παρουσιάσουν λόγο poisson ίσο με $\nu = -8$. Οι αυξητικοί αφροί εμφανίζουν μεγάλη ανεκτικότητα σε συνθλιπτικά φορτία σε σχέση με αυτά των συμβατικών μεταλλικών αφρών. Αναλυτικότερα σε έναν συμβατικό μεταλλικό αφρό η σχέση μεταξύ της τάσης και της παραμόρφωσης παραμένει στην ελαστική περιοχή μέχρι το 5% της παραμόρφωσης ενώ αντίστοιχα σε έναν αυξητικό αφρό που έχει δημιουργηθεί από το ίδιο το υλικό η σχετική συχνότητα μπορεί να παραμείνει γραμμική μέχρι και το 40% της παραμόρφωσης [31].



Εικόνα 24: Διάγραμμα θλιπτικής τάσης σε σχέση με την παραμόρφωση παράδειγμα μεταλλικού συμβατικού αφρού και αυξητικού μεταλλικού αφρού.
 Πηγή: : E.A.Friis et al. Negative Poisson's ratio polymeric and metallic foams, journal of materials science 23

3.7. Μηχανικές ιδιότητες μη-αυξητικών μεταλλικών αφρών

Οι μηχανικές ιδιότητες των μη αυξητικών μεταλλικών αφρών μπορούν να συμπτυχτούν στην περιγραφή του υλικού καθώς και από την περιγραφή της σχετικής πυκνότητας.

Η πυκνότητα του μεταλλικού αφρού συμβολίζεται με το γράμμα (ρ) ενώ με τον συμβολισμό (ρ_s) καλείται η πυκνότητα του συμπαγούς υλικού που είναι φτιαγμένο τα τοιχώματα των κελιών του. Η σχετική πυκνότητα του υλικού χαρακτηρίζεται από τον τύπο (ρ/ρ_s). Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες των μεταλλικών αφρών είναι το σχήμα των κελιών. Κατά την διαδικασία παραγωγής του υλικού, το σχήμα των κελιών σχηματίζεται από την ελάχιστη επιφανειακή τάση στα σύνορα των κελιών. Με την σύγχρονη τεχνολογία το σχήμα των κελιών διαμορφώνεται από την ελάχιστη επιφανειακή τάση των συνόρων των κελιών με αποτέλεσμα το σχήμα των κελιών να είναι σχεδόν πάντα εξαγωνικό. Η κατηγορία των αυξητικών αφρών παρουσιάζουν ασυνήθιστες μηχανικές ιδιότητες λόγω του ανομοιομορφου σχήμα των κελιών [32].

Οι μεταλλικοί αφροί που διατίθενται σήμερα στο εμπόριο παρουσιάζουν λόγο poisson που κυμαίνεται κοντά στο 0,3. Στην κατηγορία των αφρών αυτών το ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στην ικανότητα τους να απορροφούν ενέργεια με σταθερές τιμές τάσης [32].

Στην σύνθλιψη ισχύει :

$$E = a_2 E_s (\rho/\rho_s)^n$$

Ενώ στο μέτρο διάτμησης ο τύπος είναι :

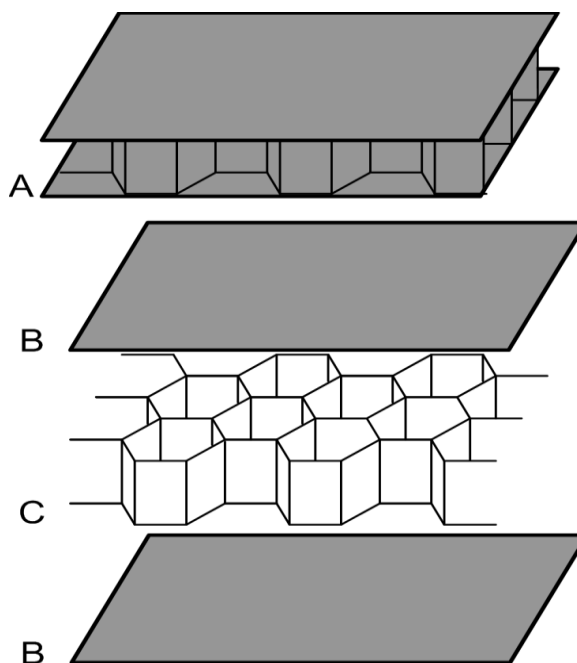
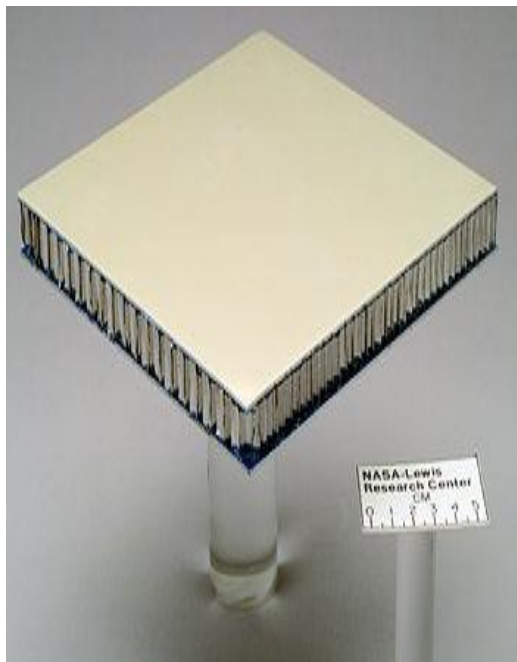
$$G = 3/8 a_2 G_s (\rho/\rho_s)^n$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το n κυμαίνεται από 1.8 μέχρι 2.2 ενώ το a_2 κυμαίνεται 0,1 μέχρι 4. Οι μεταβλητές αυτές έχουν άμεση εξάρτηση από την φύση των κελιών του αφρού.

3.8. Δομές σάντουιτς

Τυπικά μια δομή σάντουιτς έχει τρία κύρια μέρη: Στο εξωτερικό τοποθετούνται δυο σκληρά φύλλα ενώ ανάμεσα τοποθετείται ο μεταλλικός αφρός. Η εξωτερική επιφάνεια των μεταλλικών αφρών ενισχύει την αντοχή τους. Η συγκόλληση των δυο εξωτερικών φύλλων με το υλικό του μεταλλικού αφρού στοχεύει στην μεταφορά των φορτίων ανάμεσα στα στοιχεία που συντελούν το πάνελ [10].

Αναλυτικότερα τα εξωτερικά φύλλα δρουν μαζί με την μορφή εφαρμοσμένης τάσης ή ροπής αντίστασης ώστε να εξουδετερώσουν τις ροπές κάμψης που θα προκύψουν. Ο πυρήνας που αποτελείται από μεταλλικό αφρό έχει τον ρόλο να αντιμετωπίζει κάθε είδους διατμητική τάση που θα παρουσιαστεί και να συντελέσει στην σταθεροποίηση των εξωτερικών επιφανειών έναντι των κάμψεων καθώς και της ρυτίδωσης. Ακόμη το συνδετικό υλικό των δομών σάντουιτς έχει σπουδαίο ρόλο. Το βασικότερο πλεονέκτημα μιας δομής σάντουιτς είναι η αντοχή σε κάμψη και η μείωση του βάρους [10].



Εικόνα 25: Σύνθετα πάνελ σε δομή σάντουιτς (δοκιμή NASA)
Πηγή: [https:// Sandwich-structured_composite](https://Sandwich-structured_composite)

Για παράδειγμα η χρήση του σιδήρου για την εξωτερική επιφάνεια ή του αλουμινίου που εσωκλείουν τον εκάστοτε αφρό αυξάνει την ικανότητα του σε αντοχή δημιουργώντας μια νέα δομή σε σχήμα σάντουιτς. Αναλυτικότερα τα σύνθετα πάνελ (δομές σάντουιτς) είναι μια ειδική κατασκευή που ανάλογα με τις ιδιότητες του κάθε συστατικού που θα χρησιμοποιηθεί αποδίδει και διαφορετικές ιδιότητες.

Οι δομές σάντουιτς εφαρμόζονται πολύ συχνά στον κατασκευαστικό τομέα. Λόγω της παρουσίας των μεταλλικών αφρών στο εσωτερικό τους η ανάγκη σε θερμική μόνωση σε μόνωση ήχου και σε δημιουργία κατασκευών με χαμηλό ειδικό βάρος μειώνονται αισθητά [10].

Κεφάλαιο 4: Κατεργασίες Μεταλλικών Αφρών

4.1. Γενικά

Σε γενικές γραμμές οι μεταλλικοί αφροί και ιδιαίτερα οι αφροί του αλουμινίου μπορούν να δεχτούν κατεργασίες χωρίς να παρουσιάσουν κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα. Εξαιρέση στον κανόνα αποτελούν οι αφροί που αποτελούνται από SiC, Al₂O₃ που δημιουργούν αρκετά σκληρά υλικά και δεν ενδείκνυνται να δεχτούν κάποιο είδος κατεργασίας. Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι οι μεταλλικοί αφροί και ειδικότερα οι αφροί αλουμινίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με άλλα υλικά.

Είναι πολύ σημαντικό να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην κατεργασία των μεταλλικών αφρών καθώς εμφανίζουν κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που απαιτούν μια συγκεκριμένη προσέγγιση κατά την παρασκευή τους. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι τα εξής [24]:

- Αντοχή σε κρούση (η μορφοποίηση καθώς και η κατεργασία χαρακτηρίζεται αρκετά δύσκολη).
- Μεγάλη ευαισθησία σε αξονικές καταπονήσεις (η μορφοποίηση χαρακτηρίζεται δύσκολη).
- Αστοχία τόσο στα κυτταρικά τοιχώματα όσο και στην επιφάνεια (δύσκολη επικάλυψη).
- Εμφάνιση οξειδίων στην επιφάνεια των μεταλλικών αφρών (δυσκολία κατά την επικάλυψη και κατά την συγκόλληση)
- Εμφάνιση στερεοποιητικών κεραμικών (η κατεργασία χαρακτηρίζεται δύσκολη).

Τα προϊόντα τα οποία έχουν κατασκευαστεί με την βοήθεια της αφοποίησης τηγμένων μετάλλων παρουσιάζονται συχνά με πλεγματική δομή. Τα προϊόντα αυτά καλύπτονται με ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα. Παρόλα αυτά η λεπτή αυτή επιφάνεια συχνά εμφανίζει αρκετά ελαττώματα (μικρές οπές, ραγίσματα μικρών

διαστάσεων). Η επιφάνεια αυτή ενισχύει αισθητά το σύνολο των ιδιοτήτων καθώς και την εμφάνιση του εξαρτήματος [24].

Ακόμη υπάρχουν και άλλα κυψελοειδή μέταλλα τα οποία έχουν κατασκευαστεί με διάφορα καλούπια. Αυτά έχουν ανοικτή δομή χωρίς να παρουσιάζουν εξωτερικό περίβλημα. Αναλυτικότερα το καλούπι πρέπει να αφαιρεθεί μετά την διαδικασία της στερεοποίησης. Η διαδικασία κατεργασίας και των δυο δομών είναι αρκετά διαφορετικές μεταξύ τους.

4.2. Επικαλύψεις

4.2.1. Επικάλυψη με την μέθοδο εναπόθεσης ψεκασμού.

Με τον όρο θερμός ψεκασμός καλείται μια επιφανειακή τεχνική η οποία χρησιμοποιεί τηγμένη σκόνη προερχόμενη από θερμικές πηγές (laser ή ηλεκτρικό τόξο). Τα τηγμένα υλικά τοποθετούνται στην επιφάνεια με σκοπό να δημιουργηθεί μια επικάλυψη με την χρήση ενός μπέκ το οποίο ψεκάζει αέριο. Τα υλικά τα οποία τοποθετούνται μπορεί να ανήκουν στην κατηγορία των μετάλλων, των κεραμικών ή και των πλαστικών. Οι μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζουν αυτά τα υλικά έπειτα από την φάση του ψεκασμού δεν είναι όμοιες με αυτές που είχε το υλικό αρχικά [33].

Κατά την διαδικασία της ψύξης του λιωμένου υλικού σε γρήγορους ρυθμούς, οι παραμένουσες τάσεις σε συνδυασμό με τις ήδη υπάρχουσες ψαθυρές φάσεις προκαλούν την πιθανότητα υποχώρησης ενός τμήματος δομής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ότι η επιφάνεια που έχει ψεκαστεί είναι αρκετά πιο μικρή από αυτή της αρχικής επιφάνειας [33].

Με την βοήθεια της τεχνολογίας έχουν εξελιχθεί ένα σύνολο μεθόδων με σκοπό να αναβαθμίσουν τις μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζει η επιφάνεια. Για παράδειγμα με την μέθοδο προθέρμανσης της επιφάνειας που πρόκειται να ψεκαστεί η ταχύτητα της ψύξης καθώς και οι εσωτερικές τάσεις που αναπτύσσονται τείνουν να

μειώνονται σε αξιόλογο βαθμό. Ακόμη ένα παράδειγμα που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι εκείνο της χρήσης αδρανούς αερίου αντί για την χρήση πεπιεσμένου αέρα. Η χρήση αδρανούς αερίου ελαχιστοποιεί το ποσό των ψαθυρών φάσεων στα αποθέματα που έχουν ψεκαστεί.

Κάτι που θα αξίζει να προσέξουμε ιδιαίτερα είναι το στρώμα ανάμεσα στο εναποθετημένο σώμα και την καρδιά του μεταλλικού αφρού. Το σώμα αυτό θα πρέπει να μπορεί να μεταφέρει όσες περισσότερες διατμητικές τάσεις μπορεί. Σε περίπτωση που δεν γίνει αυτό μπορεί να εμφανιστούν σπασίματα λόγω των διατμητικών τάσεων [33].

4.3. Συνδέσεις

Οι τεχνικές συνδέσεων κρίνονται απαραίτητες σε εφαρμογές με κυψελωτά μέταλλα. Η δομή των υλικών μοιάζει πολύ μορφολογικά με αυτή του ξύλου. Έτσι λοιπόν οι συνδέσεις των κυψελωτών μετάλλων μπορούν να ακολουθήσουν τις ίδιες μεθόδους σύνδεσης με αυτή του ξύλου (κόλληση με κόλα ή τοποθέτηση μαντάλων). Η συνένωση μπορεί να γίνει ακόμη και με την βοήθεια των μεταλλικών εξαρτημάτων (τεχνική ηλεκτροσυγκόλλησης και κασσιτεροκόλλησης).

Η ένωση των αφρών με μπουλόνια είναι μια εύκολη διαδικασία, αρκετά γρήγορη και συμφέρει οικονομικά. Το πόσο δυνατή θα είναι η σύσφιξη καθορίζεται αρχικά από την πυκνότητα και το μέγεθος των πόρων του αφρού. Η δύναμη της σύσφιξης μπορεί να μεγιστοποιηθεί εάν η οπή που έχει δημιουργηθεί γεμίσει με κάποιου είδους συγκολλητικού μέσου [12].

Πολλές φορές στους μεταλλικούς αφρούς που ενώνονται με κόλλες παρατηρείται ότι η δύναμη τους υπερβαίνει την εσωτερική δύναμη των αφρών. Τα κύρια μειονεκτήματα των ενώσεων με κόλλα είναι η χαμηλή θερμοκρασιακή σταθερότητα που παρουσιάζουν, η δημιουργία ενός μονωτικού στρώματος και η παρουσία διαφορετικών τιμών θερμικής διαστολής της κόλλας με το υλικό. Άξιο είναι επίσης να αναφερθεί το γεγονός ότι το βάρος της κατασκευής αυξάνεται σημαντικά όταν ή σύνδεση γίνεται με την βοήθεια της κόλλας [12].

4.3.1 Σύνδεση μεταξύ μεταλλικού αφρού και πάνελ

A) Σύνδεση με την γρήση Βίδας

Η χρήση της Βίδας είναι μια μορφή σύνδεσης η οποία δεν πραγματοποιείται μόνο με το χτύπημα ενός πριτσινιού αλλά και με το σπείρωμα της βίδας. Κατά την συμπίεση του αφρού η Βίδα εισχωρεί όλο και πιο βαθιά. Το υλικό θα πρέπει να είναι αρκετό ώστε να μπορεί να συγκρατήσει το σπείρωμα. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να επιτευχθεί μια αρκετά καλή μηχανική σύνδεση η οποία έχει άμεση εξάρτηση με το πόσο πυκνό είναι το υλικό [34].

B) Σύνδεση με την βοήθεια Πριτσινιού (Πριτσίνωμα).

Η επιφάνεια του πριτσινιού είναι αρκετά απαλή και υπάρχει ένας μόνο μηχανισμός για την σύνδεση τριβής στο λεπτό τμήμα του πριτσινιού. Ο μηχανισμός της τριβής αυτής δεν θεωρείται επαρκής για τους μεταλλικούς αφρούς και θα πρέπει να ενισχυθεί με την χρήση ενός εξογκώματος στο κατώτερο τμήμα της κατασκευής. Η διάμετρος αυτού του εξογκώματος είναι αρκετά πιο μεγάλη από την προ-διάνοιξη της τρύπας [6].

4.4. Συγκολλήσεις

Ως προς το θέμα των συγκολλήσεων θα μπορούσε να ειπωθεί ότι οι μεταλλικοί αφροί μπορούν να συγκολληθούν. Οι τεχνικές που απαιτούνται όμως είναι αρκετά ακριβές. Το κύριο πρόβλημα που παρουσιάζει η συγκόλληση είναι η εμφάνιση της μεγάλης διαφοροποίησης τους πάχους του εξωτερικού περιβλήματος. Ο τρόπος να περιοριστεί το πρόβλημα είναι να επιτευχθεί η συγκόλληση με την μορφή laser. Αν το υλικό κατά την διαδικασία της αφοροποίησης χρησιμοποιηθεί ως πληρωτικό μέσο τότε το αποτέλεσμα της συγκόλλησης μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι αρκετά ικανοποιητικό.

Η χρήση χημικών κολλών μπορούν να συνδέσουν τόσο δύο μεταλλικούς αφρούς όσο και έναν μεταλλικό αφρό με κάποιο άλλο υλικό. Εάν ένας μεταλλικός αφρός πρέπει να συνδεθεί με ένα υλικό μεγάλης πυκνότητας τότε η συγκόλληση θα πρέπει να γίνει με μηχανικό τρόπο. Το αποτέλεσμα των συγκολλήσεων αυτών να μην είναι αρκετά δυνατό αλλά μπορεί να δημιουργηθούν προβλήματα διάβρωσης λόγω της απομάκρυνσης μεγάλης ποσότητας οξειδίου [28]. Η συγκόλληση με λέιζερ (παλμικό ή λέιζερ συνεχόμενης ακτινοβολίας) είναι μια τεχνολογία που όλο ένα και αναπτύσσεται. Εκτός του ότι είναι αρκετά πιο φθηνή σαν διαδικασία (λόγω του χαμηλού ποσού ενέργειας που διοχετεύεται στον αφρό) δημιουργείται ένα υλικό με σταθερή δομή.

4.4.1. Συγκόλληση μεταλλικών αφρών με την χρήση laser.

Η συγκόλληση μεταξύ των αφρών από αλουμίνιο γίνεται με την χρήση laser. Λόγω της κατάρρευσης της κυψελωτής δομής κατά την όλη διαδικασία της συγκόλλησης είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί μεγάλη ποσότητα πληρωτικού υλικού, κάτι που αυξάνει την πυκνότητα της δομής στην περιοχή της ραφής. Ακόμη μια επιπλέον δυσχέρεια στην εφαρμογή αυτή είναι η δομή του αφρού (διαφορά πάχους) που θα προκύψει καθώς δεν θα κολληθεί ομοιόμορφα σε όλη την διατομή. Ακόμη η γεωμετρική μορφή που μπορεί να πάρει η συγκόλληση μπορεί να επιλεγθεί μέσα από μια συγκεκριμένη ομάδα, ειδικά όταν πρόκειται για μεταλλικούς αφρούς αλουμινίου [24].

Ο τρόπος αυτός της συγκόλλησης μεταξύ του αφρού και του μεταλλικού πάνελ γίνεται καθώς η προσδιδόμενη θερμότητα τείνει να λιώνει και τις δύο επιφάνειες. Οι ακτίνες laser εισχωρούν βαθιά και έτσι οι κυψέλες μπορούν να εισχωρήσουν στην περιοχή της συγκόλλησης με το πάνελ. Ακόμη η θερμότητα που έχει συγκεντρωθεί μπορεί να προκαλέσει σε μικρά επίπεδα το λιώσιμο της δομής του αφρού εκτός της γραμμής συγκόλλησης. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι το τηγμένο μέταλλο του πάνελ ρέει μέσα στους πόρους του μεταλλικού αφρού και τους

γερμίζει αλλά όχι απόλυτα. Είναι εύλογο λοιπόν να αντιληφτεί κανείς ότι η αρχική δομή διαταράσσεται.

Η χρήση των μεταλλικών αφρών σε συνδυασμό με συμβατικά στερεά σώματα (μεταλλικά πάνελ, μεταλλικές δομές, κολώνες κ.α.) είναι πολύ συχνή στον τομέα της κατασκευής. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των υψηλών μεταλλικών αντοχών που παρουσιάζουν τα αντικείμενα αυτά σε συνθήκες φόρτισης [24].

4.5. Κόλληση

Η κόλληση καλείται η κατηγορία των τεχνικών που έχουν σαν στόχο να δημιουργήσουν έναν μηχανισμό ένωσης των υλικών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις κολλητικές δυνάμεις που παρουσιάζονται μεταξύ της επιφάνειας του υποστρώματος και της κόλλας. Τα αντικείμενα που έχουν υποστεί αυτή την διαδικασία δεν θα πρέπει να αποτύχουν στην διεπιφάνεια καθώς οι δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω της κόλλησης θα πρέπει να είναι αρκετά πιο μεγάλες από τις συνεκτικές δυνάμεις τόσο της κόλλας όσο και του υποστρώματος. Η διαδικασία της κόλλησης βρίσκεται εφαρμογή σχεδόν σε όλους τους μεταλλικούς αφρούς ανεξάρτητα με το αν αυτοί παρουσιάζουν μια εξωτερική επιφάνεια η οποία έχει δημιουργηθεί μέσα από μια διαδικασία χύτευσης.

4.6. Κοπή

Η κοπή τέτοιου είδους τεμαχίων δεν είναι μια εύκολη διαδικασία. Οι κοινές τεχνικές δεν μπορούν να εφαρμοστούν καθώς παρουσιάζεται ο κίνδυνος να παραμορφωθεί το υλικό. Γι αυτό το λόγο έχουν εξελιχθεί δυο κύριες τεχνικές [27]:

Κοπή με την χρήση ακτινών laser

Η κοπή των μεταλλικών αφρών με την χρήση laser απαιτεί να λάβουμε υπόψη την φύση των τεμαχίων που θα επεξεργαστούν. Η χαμηλή πυκνότητα των αφρών έχει ως αποτέλεσμα να λιώσει σε μεγαλύτερο βαθμό ο πυρήνας σε σχέση με τα εξωτερικά του φύλλα. Αυτό έχει σαν συνέπεια την κατάρρευση και συνάμα την

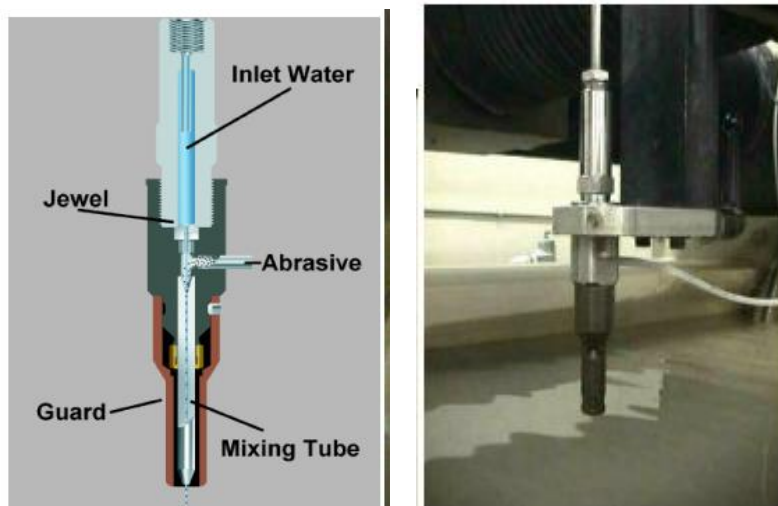
εκχείλιση του μετάλλου κάτι που επιφέρει αλλαγές στην ποιότητα της επιφάνειας που θα κοπεί.



Εικόνα 26 : Κοπή μεταλλικού αφρού με laser

Κοπή με την χρήση νερού.

Σε αυτήν την διαδικασία η κοπή πραγματοποιείται με την χρήση jet νερού σε ένα υλικό μορφής σάντουιτς που δεν έχει περάσει ακόμη στην διαδικασία της αεροποίησης. Από την φύση τους όμως τα τεμάχια αυτής της κατηγορίας παρουσιάζουν το εξής πρόβλημα: Μετά την κοπή παραμένουν μικροαντικείμενα στους πόρους τα οποία δεν μπορούν να αφαιρεθούν ακόμη και μετά την διαδικασία της πλύσης των αντικειμένων. Τα υπολείμματα αυτά εμποδίζουν στην δημιουργία μιας ομοιόμορφης επιφάνειας.



Εικόνα 27 : Κοπή μεταλλικού αφρού με την χρήση νερού
Πηγή : <http://www.waterjets.org/>

4.7 Ένωση πάνελ που περιέχουν μεταλλικούς αφρούς

Η εξέλιξη της τεχνολογίας απαιτεί πολλές φορές την ένωση μεταξύ δυο υλικών κατασκευών που περιέχουν μεταλλικούς αφρούς. Τα πάνελ, τα οποία περιέχουν αφρούς αλουμινίου απαιτούν διαφορετικές τεχνικές κατασκευής ανάλογα με την εκάστοτε χρήση τους:

Ένωση με την βοήθεια πιρτσινιών

Η ένωση με την βοήθεια των πιρτσινιών όλο ένα και εξελίσσεται. Οι αφροί αλουμινίου, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στο εσωτερικό τμήμα των ((σάντουιτς)) εάν συμπιεστούν αρκετά τότε η αντοχή τους σε παραμορφώσεις εφελκυσμού μειώνεται κατά το ήμισυ. Σε συνθήκες όμως μέγιστης συμπίεσης μπορεί να αποκτήσει ξανά όλες του τις μηχανικές ιδιότητες. Άξιο είναι να αναφερθεί ότι μπορούν να πιρτσινωθούν βίδες, οι οποίες όμως μπορεί να μην αντέξουν σε μια μεγάλη δύναμη.

4.8 Flow drilling

Ο τρόπος **flow drilling** είναι η μέθοδος κατασκευής οπών σε ένα μέταλλο που με την βοήθεια της τριβής (μέσο της θερμότητας) μπορεί να επιτευχθεί.

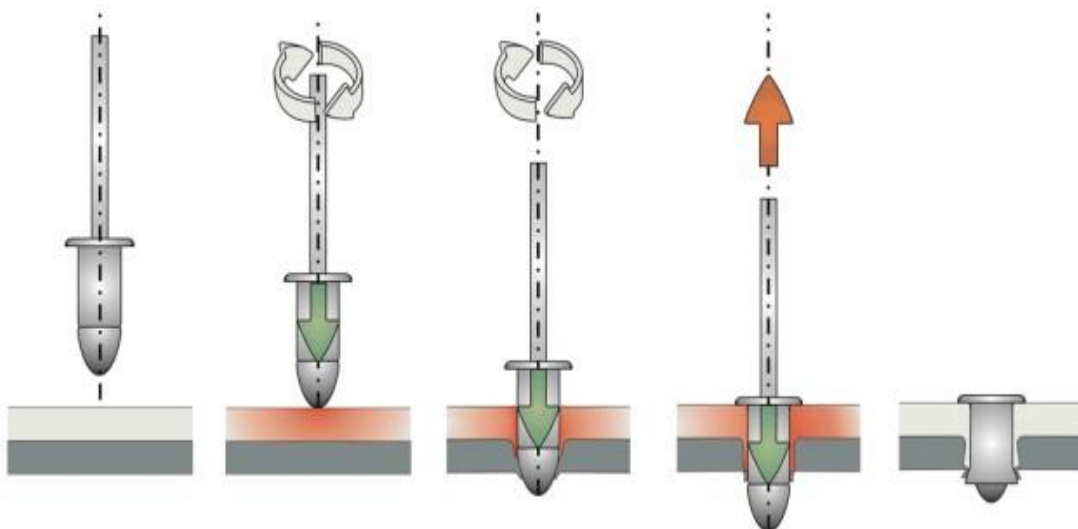
Διαδικασία flow drilling [33]:

-Αρχικά ένα πολυγωνικό περικόχλιο θα περιστραφεί με αυξημένη ταχύτητα με αποτέλεσμα την δημιουργία θερμότητας.

-Εξαιτίας της τριβής παρουσιάζεται μεγάλη τοπική παραγωγή θερμότητας, η οποία μαλακώνει το αντικείμενο, καθιστώντας το πλαστικό. Το εργαλείο στη συνέχεια εισχωρεί μέσα από το αντικείμενο, κάνοντας μια τρύπα σε αυτό.

-Στο σημείο της επιφάνειας που θα δημιουργηθεί η οπή θα διαρρεύσει το υλικό. Το υλικό αυτό που ρέει δεν χάνεται, αλλά σχηματίζει ένα χιτώνιο γύρω από την οπή. Το μήκος του εν λόγω χιτωνίου είναι έως και 3 φορές το αρχικό πάχος του υλικού. Η

παρουσία αυτού του μετάλλου χείλος γύρω από τις άκρες των οπών κάνει τις συνδέσεις ακόμη πιο ισχυρές.



Εικόνα 28: Διαδικασία Flow drilling

Πηγή : SFS solidifies its innovation leadership in riveting technology.

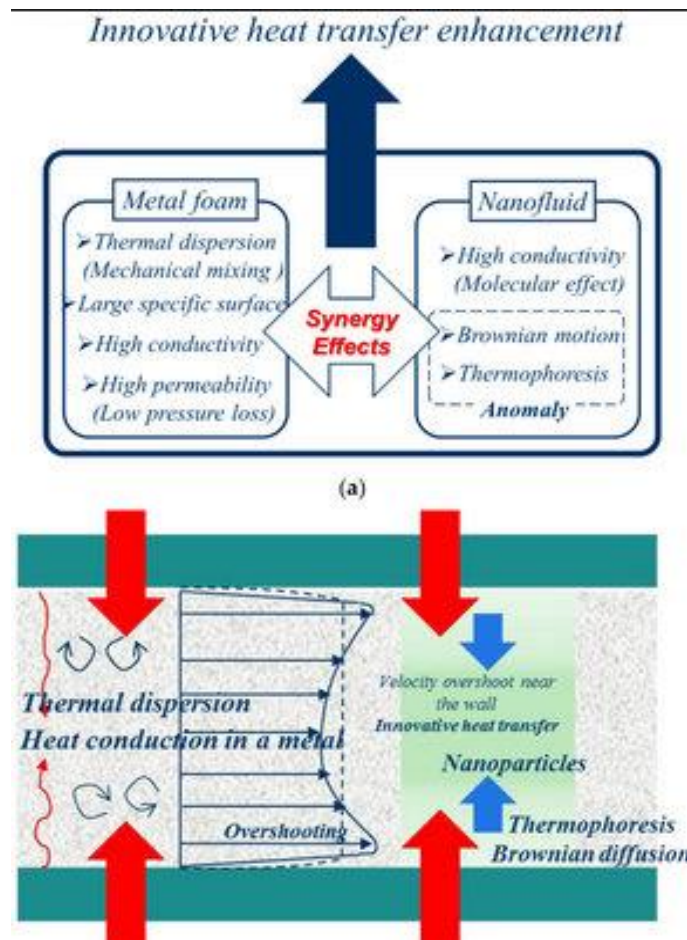
Τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής αυτής είναι τα εξής [33]:

- 1) Πρόκειται για μια πολύ γρήγορη διαδικασία που διαρκεί από δύο έως έξι δευτερόλεπτα.
- 2) Η διαδικασία διαμορφώνει εκ νέου το υλικό χωρίς να μειώνεται η ποσότητα αυτού, καθώς το πλεονάζον υλικό που σχηματίζεται καθιστά το υλικό ακόμη πιο δυνατό στην συγκόλληση.
- 3) Είναι μια διαδικασία που δεν παράγονται ρύποι σωματιδίων
- 4) Μπορεί να βρει εφαρμογή σχεδόν σε όλα τα είδη των μεταλλικών αφρών.

Τα μειονεκτήματα της εφαρμογής αυτής είναι [33]:

- 1) Το υλικό που θα δεχτεί την όλη διαδικασία θα πρέπει να εμφανίζει αυξημένα όρια αντοχής σε θερμοκρασία ώστε να μπορέσει να αντέξει την προστιθέμενη θερμότητα.

- 2) Οι μεταλλικοί αφροί που έχουν δεχτεί μια συγκεκριμένη επικάλυψη (π.χ. πλαστική) θεωρούνται συχνά ακατάλληλα για να συμμετέχουν σε αυτή την διαδικασία.



Εικόνα 29: Παράδειγμα χρήσης τεχνικής **flow drilling**

Πηγή: A Volume Averaging Theory for Convective Flow in a Nanofluid Saturated Metal Foam. (2016) Wenhao Zhang et al.

4.9. Χαρακτηρισμός μεταλλικών αφρών

Στην ενότητα αυτή θα καταγραφούν οι τεχνικές με τις οποίες ένας μεταλλικός αφρός χαρακτηρίζεται ως καταστροφικός η μη, δηλαδή εάν μετά από κάποιες συνθήκες καταπόνησης παραμορφώνεται μη αναστρέψιμα ή μεταβάλλεται κατά έναν μεγάλο βαθμό ή δεν δέχεται καμία μεταβολή κατά την διάρκεια της καταπόνησης αυτής. Η εξέταση αυτή γίνεται με την βοήθεια των παραμέτρων:

4.10. Μη καταστροφικός έλεγχος

Ανάλυση με την βοήθεια της ταλάντωσης

Η τεχνική αυτή στην πιο απλή της μορφή μπορεί να περιγραφεί ως εξής: ένα δοκίμιο το οποίο έχει ορθογωνική διατομή θα υποβληθεί σε ταλάντωση ώστε να δημιουργηθούν διεγέρσεις. Οι ταλαντώσεις θα συλλεχτούν από ένα επαγωγικό πηνίο. Το πλήθος των ταλαντώσεων που θα προκύψουν σε σχέση με την συχνότητα της διέγερσης αποκαλύπτει τις αιχμές του συντονισμού. Οι θέσεις που εμφανίζονται οι αιχμές αυτές, οι διαστάσεις και η μάζα του δοκιμίου του δείγματος αποτελούν το μέσο για να προσδιοριστεί το μέτρο ελαστικότητας του υλικού [35].

Παράμετρος εμποτισμού με χρώμα

Κατά την διαδικασία παραγωγής των αφρών πολλές φορές τυγχάνει να δημιουργηθούν κάποιου είδους ατέλειες στο υλικό όπως τρύπες και ρωγμές τόσο στο εσωτερικό όσο και στην εξωτερική τους επιφάνεια. Ο εμποτισμός του χρώματος αποτελεί την διαδικασία επάλειψης ενός χημικού υγρού στον εκάστοτε αφρό το οποίο τείνει να απορροφάται στις ρωγμές [35].

Όταν η επιφάνεια του μεταλλικού αφρού που μελετάται στεγνώσει τότε θα επικαλυφτεί με ένα ειδικό βάμμα το οποίο έχει την ιδιότητα να χρωματίσει το σημείο στο οποίο δεν έχει απορροφηθεί. Με την διαδικασία αυτή αποτυπώνονται οι ατέλειες οι οποίες είναι εμφανώς ορατές.

Τομογραφία μεταλλικών αφρών με ακτίνες –X

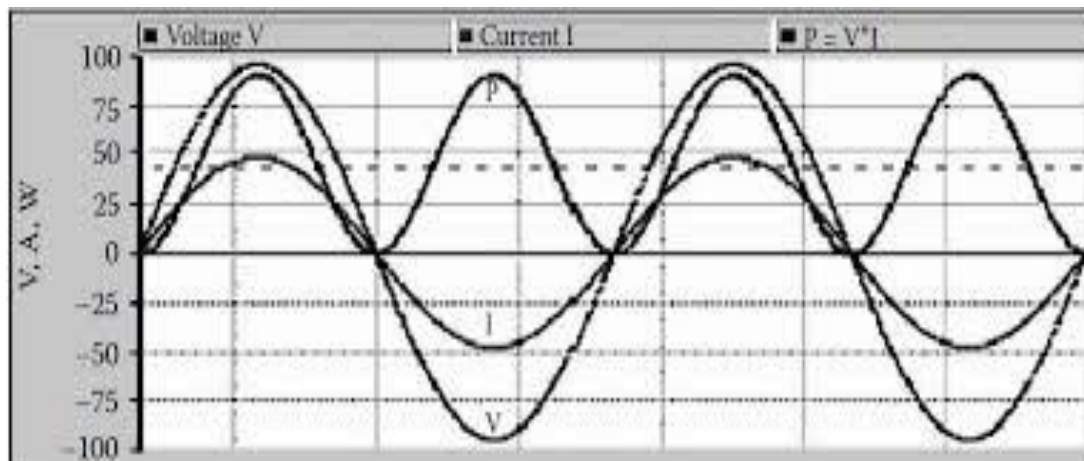
Κατά την διαδικασία αυτή παρουσιάζονται εικόνες με ακτίνες –X από ένα μεγάλο μέρος του δείγματος μεταλλικού αφρού. Από τις εικόνες που προκύπτουν καταγράφονται η εξασθένιση των ακτινών σε κάθε σημείο που μπορεί να έχει

προκύψει η αστοχία του υλικού. Αναλυτικότερα κατά την διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται ακτίνες X,Y και νετρόνια [35] :

- Τα νετρόνια χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των κενών
- Οι ακτίνες Y για να προσδιοριστούν τα κομμάτια που έχουν μεγάλο πάχος
- Και οι ακτίνες X για μικρορωγμές

Ακουστικές μετρήσεις

Με την βοήθεια ενός σωλήνα αντίστασης καταμετράται ο ήχος που απορροφάται από τους πόρους του υλικού. Αυτή η διαδικασία είναι αρκετά ακριβείς και γρήγορη ανάλογα με την μορφή του ήχου που παράγεται μπορεί να διαπιστωθεί έναν το υλικό που εξετάζεται παρουσιάζει αστοχίες και ρωγμές στο εσωτερικό του. Εάν το δείγμα παρουσιάζει ανοιχτό πορώδες με μεγάλα κενά, τότε οι συχνότητες του ήχου παρουσιάζονται σε χαμηλά επίπεδα στα σημεία αυτά. Από την άλλη μεριά στα δείγματα που είναι συμπαγή ο ήχος δεν διαπερνά το υλικό και η όποια απορρόφηση γίνεται μόνο στο τμήμα της επιφάνειας [35].



Εικόνα 30: Παράδειγμα χρήσης ακουστικής μέτρησης.

Πηγή: Manufacture John Banhart. (2001) Characterisation and application of cellular metals and metal foams.

Κεφάλαιο 5: Εφαρμογές Μεταλλικών Αφρών

5.1. Παράγοντες που επηρεάζουν την χρήση των μεταλλικών αφρών

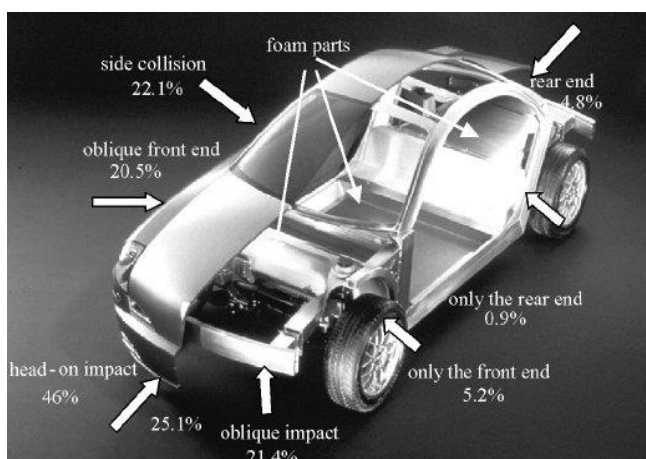
Η χρήση των μεταλλικών αφρών, επηρεάζονται από κάποιους βασικούς παράγοντες [32]:

- **Μορφολογία:** το Πορώδες (ανοικτού τύπου η κλειστού), την πυκνότητα που παρουσιάζει ο μεταλλικός αφρός και το επιθυμητό μέγεθος των πόρων. Το στάδιο της μορφολογίας είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τον υπολογισμό των μεταλλικών υλικών ανάλογα με το που θα χρησιμοποιηθούν.
- **Μεταλλουργία:** Η αρχική πρώτη ύλη που έχουν κατασκευαστεί οι μεταλλικοί αφοί.
- **Παραγωγική διαδικασία:** Η δυνατότητα μεταποίησης του αφρού ώστε να κατασκευαστούν νέα υλικά ή σύνθετες διατομές.
- **Οικονομικά:** Κόστος της όλης παραγωγής, καταλληλότητα για δημιουργία μεγάλου όγκου κατασκευών.

5.2. Εφαρμογή στην κατασκευή αυτοκινήτων

Στις μέρες μας κυριαρχεί μια τάση για την μείωση του βάρους των αυτοκινήτων. Ο κύριος λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η μέριμνα για την προστασία του περιβάλλοντος καθώς και η συμμόρφωση των αυτοκινητοβιομηχανιών στις νομοθετικές ρυθμίσεις που απαιτούν τον περιορισμό στην μόλυνση του περιβάλλοντος. Εκτός από αυτό ο χώρος της βιομηχανίας των αυτοκινήτων προσπαθεί να βελτιώσει στο μέγιστο την παθητική προστασία των αυτοκινήτων, η οποία επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το σχεδιασμό και την επιλογή των υλικών.

Οι αυτοκινητοβιομηχανίες προσπαθούν όλο ένα να αυξήσουν την ασφάλεια των οχημάτων που κατασκευάζουν, πράγμα που είχε σαν συνέπεια στις περισσότερες περιπτώσεις να αυξηθεί το βάρος των οχημάτων. Βέβαια η αύξηση βάρους ενός αυτοκινήτου αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για την μείωση των καυσίμων. Αυτή είναι και η κύρια αιτία που στην Ευρώπη και στην Ιαπωνία οι αυτοκινητοβιομηχανίες κατασκευάζουν μικρού μήκους αυτοκίνητα. Οι κινητήρες όμως των αμαξιών αυτών λαμβάνουν αρκετό όγκο. Έτσι η άνεση των επιβατών από το ήδη μικρό μήκος των αυτοκινήτων περιορίζεται. Ένα άλλο πρόβλημα το οποίο παρουσιάζεται είναι η εμφάνιση υπερθέρμανσης στα εξαρτήματα του κινητήρα. Ακόμη λόγω της ηχορύπανσης έχει δημιουργηθεί η ανάγκη να μειωθεί αισθητά ο ήχος των αυτοκινήτων εν κινήσει. Με την είσοδο των μεταλλικών αφρών πολλά από τα προβλήματα που ήδη έχουν αναφερθεί μπορούν να λυθούν.



Εικόνα 31. Αυτοκίνητο Karmann με εξαρτήματα κατασκευασμένα από αφρό αλουμινίου .
Πηγή: Karmann company

Λαμβάνοντας υπ όψη τις άριστες ηχομονωτικές ιδιότητες καθώς και την δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας, οι αφροί που έχουν κατασκευαστεί από αλουμίνιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή αυτοκινήτων. Κυριότερες εφαρμογές των μεταλλικών αφρών στην κατασκευή των αυτοκινήτων [36]:

Απορρόφηση ενέργειας:

Η Απορρόφηση της ενέργειας σε ένα αυτοκίνητο είναι ένα πολύ σημαντικό ζήτημα για την ασφάλεια του επιβάτη σε περίπτωση ατυχήματος. Στις μέρες μας τα αυτοκίνητα κατασκευάζονται με παραμορφώσιμα εξαρτήματα στην δομή τους. Τα εξαρτήματα αυτά τοποθετούνται σε περιοχές πρόσκρουσης με σκοπό να απορροφήσουν την ενέργεια κρούσης ώστε αυτή να περιοριστεί ή να μην φτάσει

καθόλου στον θάλαμο των επιβατών. Οι κατασκευές αυτές τις προστασίας (μπροστινοί πλάγιοι προφυλακτήρες, φτερά, κατασκευές των τόξων ασφάλειας στις πόρτες, άλλα εξαρτήματα που μπορεί να παραμορφωθούν κατά την κρούση) μπορούν να ενισχυθούν με αφρό αλουμινίου. Στην περίπτωση των φορτηγών με την βοήθεια των αφρών αλουμινίου μπορεί να αυξηθεί η ακαμψία των προστατευτικών μερών στην κάτω πλευρά.

Τα εξαρτήματα αυτά που είναι φτιαγμένα από αφρούς αλουμινίου δημιουργούν μια ελεγχόμενη και προγραμματισμένη παραμόρφωση κατά την κρούση ενός αυτοκινήτου με την μέγιστη δυνατή απορρόφηση ενέργειας. Το ζήτημα αυτό είναι πολύ σημαντικό κυρίως στην κατηγορία των μικρών αυτοκινήτων. Τα εξαρτήματα αυτά θα πρέπει να καταλαμβάνουν όσο το δυνατόν μικρότερο δυνατό όγκο.

Ελαφριές κατασκευές

Η καλή αναλογία βάρους και σκληρότητα των αφρών, τους επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν όχι μόνο στο τμήμα της προστασίας του αυτοκινήτου και σε άλλα δομικά μέρη που απαιτείται μεγάλη σταθερότητα (κινητήρας, οροφές). Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι τα μέρη αυτά δεν θα πρέπει να υφίστανται καμία ελαστική παραμόρφωση λόγω των αέριων ρευμάτων. Οι δονήσεις καλό θα είναι να περιορίζονται. Οι αφροί του αλουμινίου εμφανίζουν όπως εξετάσαμε και στα προηγούμενα κεφάλαια καλές μονωτικές και ελαστικές ιδιότητες άρα είναι μια καλή λύση για τα μέρη του αυτοκινήτου που ήδη έχουν αναφερθεί.

Μόνωση

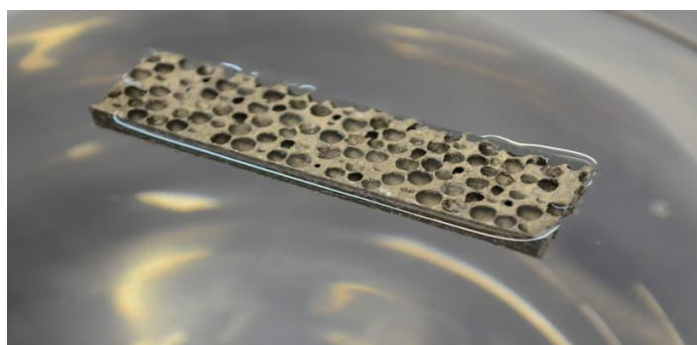
Όσο αναφορά την μόνωση, οι ηχομονωτικές ιδιότητες των αφρών του αλουμινίου είναι χρήσιμες για την ηχομόνωση της μηχανής του αυτοκινήτου. Ο κύριος σκοπός αυτής της περίπτωσης είναι να μην υπάρξει μεταφορά θορύβων τόσο στο θάλαμο των επιβατών όσο και στο περιβάλλον. Μια αξιόλογη προσπάθεια έγινε στην Γερμανία από την Karmann. Δημιουργείται το φύλλο αλουμινίου το οποίο είναι γεμάτο με αφρό αλουμινίου και ονομάζεται AFS. Η παραγωγή του γίνεται από ένα πρόδρομο αφοροποιήσιμο υλικό και από δύο φύλλα αλουμινίου με σχήμα οποιασδήποτε μορφής με την βοήθεια της έλασης. Κατά την διαδικασία της έλασης το υλικό μεταφέρεται σε κλίβανο με στόχο την αφοροποίηση. Το πάχος του αφρού

κυμαίνεται από 8 έως 12 mm ενώ τα εξωτερικά του φύλλα έχουν πάχος 1mm. Το AFS είναι ένα υλικό που παρουσιάζει 10 φορές μεγαλύτερη δυσκαμψία από ένα φύλλο σιδήρου καθώς και είναι 50% ελαφρύτερο. Σε σύγκριση με το πυκνό αλουμίνιο έχει καλύτερη ηχομόνωση της τάξεως των 95%. Ακόμη εξαιτίας της μεγάλης αντοχής σε στρέψη και ακαμψίας μπορούν να μειωθούν τα μέρη που πρέπει να τοποθετηθούν σε ένα σώμα αυτοκινήτου. Συνοψίζοντας όλα αυτά είναι εύλογο να αντιληφτεί κανείς ότι τα AFS είναι υλικά εξαιρετικής φύσεως για την κατασκευή αυτοκινήτων.

5.3. Εφαρμογή στον τομέα της ναυπηγίας

Στον τομέα της ναυσιπλοΐας η προσπάθεια μείωσης βάρους είναι πολύ σημαντική. Σε σύγκριση με την βιομηχανία των αυτοκινήτων χρειάζεται μεγάλη ευελιξία στην παραγωγή των υλικών λόγω του ότι τα πλοία δεν κατασκευάζονται σε μια γραμμή παραγωγής με μέρη που είναι τυποποιημένα [37].

Τα επίπεδα φύλλα μπορούν να συνδεθούν κατά βάση με το κύριο υλικό με ελαστικές συγκολλήσεις πολυουρεθάνης. Με αυτό τον τρόπο κατασκευάζονται ελαφριές και άκαμπτες κατασκευές που συμπεριφέρονται άψογα στις αποσβέσεις. Για τις εφαρμογές στον τομέα της ναυπηγικής μπορούν να συμπεριληφθούν αφρώδη στοιχεία τύπου sandwich τα οποία συνδέουν αποτελεσματικά τα κατάλληλα τεμάχια κατά την διαδικασία της ναυπήγησης. Σύμφωνα με έρευνες που βρίσκονται σε αρχικό στάδιο δείχνουν ότι στους PM-αφρούς αλουμινίου με κλειστούς πόρους το διάλυμα χλωριούχου νατρίου έχει την ικανότητα να εισχωρήσει μόνο επιφανειακά δίχως να προκαλεί παραμορφώσεις-ατέλειες στην δομή του υλικού [37].



Εικόνα 32: Ικανότητα μεταλλικού αφρού να επιπλέει στο νερό.
Πηγή: International Journal of Impact Engineering,(82).

5.4. Εφαρμογές στον κατασκευαστικό τομέα

Στις κτιριακές κατασκευές η χρήση των μεταλλικών αφρών μπορεί να αποδειχθεί σπουδαία. Η καλή αντίσταση στην διείσδυση της φωτιάς μπορεί να επιφέρει τον περιορισμό του χρόνου εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς και οι πολύ καλές θερμομονωτικές τους ιδιότητες μπορούν να μετριάσουν την κατανάλωση ενέργειας ενός κτιρίου για ψύξη και θέρμανση [28].

Για παράδειγμα τα προφίλ από αφρό αλουμινίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις εξωτερικές προσόψεις κτιρίων ή ακόμη και σαν προστασία (κάλυμμα) των εσωτερικών τοίχων ενός κτιρίου. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις οι αφροί βοηθούν στην εξοικονόμηση ενέργειας. Τα πλαίσια είναι ελαφριά, άκαμπτα και αντιπυρικά. Ακόμη τα κάγκελα των μπαλκονιών είναι απαραίτητο να ικανοποιούν μερικούς κανονισμούς ασφαλείας [8]. Τα περισσότερα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται έχουν μεγάλο βάρος και εμφανίζουν προβλήματα σε περίπτωση εμφάνισης πυρκαγιάς. Εάν το υλικό το οποίο έχουν κατασκευαστεί τα κάγκελα των μπαλκονιών αντικαθιστούνταν από αφρούς αλουμινίου τότε πολλά από τα πρόβλημα που μόλις αναφέρθηκαν θα λυνόταν [21].

Ακόμη η χρήση των αφρών θα ήταν χρήσιμη για την μείωση της ενέργειας στους ανελκυστήρες. Λόγω της συχνής επιτάχυνσης και επιβράδυνσης της ταχύτητας οι ελαφριές κατασκευές βοηθούν κατά πολύ στην καταπόνηση που δέχονται κατά την λειτουργία τους [27]. Ακόμη μια ιδιότητα που πρέπει να αναφερθεί είναι η ηχομόνωση. Οι αφροί μπορούν κάλλιστα να χρησιμοποιηθούν σαν ηχοαπορροφητικά υλικά σε σιδηροδρομικά τούνελ, σε γέφυρες ή ακόμη και σε εθνικές οδούς .

Όσο αναφορά την δόμηση συναντούμε στοιχεία που έχουν την μορφή Hat-profile. Το εσωτερικό τους μέρος αποτελείται από μεταλλικό αφρό, το οποίο έχει συγκολληθεί με διάφορες τεχνικές [8]. Οι ιδιότητες του στοιχείου αυτού δεν επηρεάζονται μόνο από το είδος συγκόλλησης αλλά και από όλη την διαδικασία κατασκευής. Σε γενικές γραμμές θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η ενέργεια που

απορροφάται από την κρούση, την στρέψη και την κάμψη είναι διπλάσια σε σχέση με αυτήν που απορροφάται όταν το προφίλ είναι κενό [29].



Εικόνα 33: Αερογέφυρα αποτελούμενη από τμήματα μεταλλικών αφρών.
Πηγή: Metal foam a design guide : Ashby M.

Κατασκευαστικά υλικά

Οι μεταλλικοί αφροί Νικελίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πλακίδια θέρμανσης του δαπέδου. Ακόμη μπορούν να τοποθετηθούν στο εσωτερικό των στύλων ως μέσο ενίσχυσης (η ανοικτή δομή επιτρέπει την ροή των υγρών θέρμανσης για την απομάκρυνση του πάγου ή των ψυκτικών υγρών). Η τεχνική συγκόλλησης μεταλλικών αφρών σε μια βάση διευρύνει την ευελιξία τους ως δομικά υλικά [6].

5.5. Κατασκευή φίλτρων και σιγαστήρων

Φίλτρα

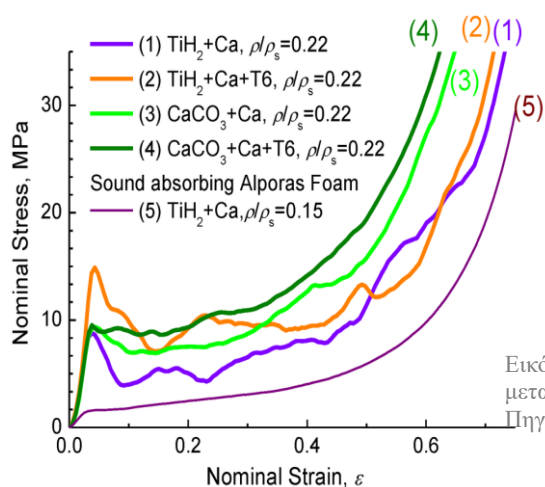
Τα πιο γνωστά χρησιμοποιούμενα μεταλλικά υλικά φίλτρων είναι ο πορώδης μπρούτζος και ο πορώδης ανοξείδωτος χάλυβας. Τα πορώδη φίλτρα κατατάσσονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες:

A) Τα φίλτρα κατακράτησης και διαχωρισμού στερεών σωματιδίων σε υγρό (φίλτρα καθαρισμού ανακυκλωμένων πολυμερών τηγμάτων).

Β)Τα φίλτρα κατακράτησης στερεών ή υγρών τεμαχίων διασκορπισμού σε αέριο (φίλτρα καυσαερίων του πετρελαίου, φίλτρα απομάκρυνσης νερού σε εναέριες γραμμές μεταφοράς).

Σιγαστήρες

Οι μεταλλικοί αφροί είναι γνωστοί για τις ηχομονωτικές ιδιότητες τους όσο αναφορά την μείωση του θορύβου. Λόγου χάρη η μείωση της πίεσης ενός αερίου το οποίο πρέπει να μεταφερθεί σε σωληνώσεις μεγάλου μήκους με σκοπό να εφοδιάσει το αέριο σε τοπικά δίκτυα, παράγει θόρυβο σε μεγάλη ένταση. Με την χρήση σωλήνων επενδυμένων από μεταλλικούς αφρούς εξαλείφεται σχεδόν εντελώς ο θόρυβος. Οι μεταλλικοί αφροί χρησιμοποιούνται και σε άλλες περιπτώσεις μείωσης του ήχου (σταθμοί παραγωγής ενέργειας από ατμό, εξατμίσεις αυτοκινήτων κ.α.).



Εικόνα 34: Διάγραμμα ηχοαπορρόφησης διαφόρων μεταλλικών αφρών.
Πηγή: Metals 2014, 4(3).

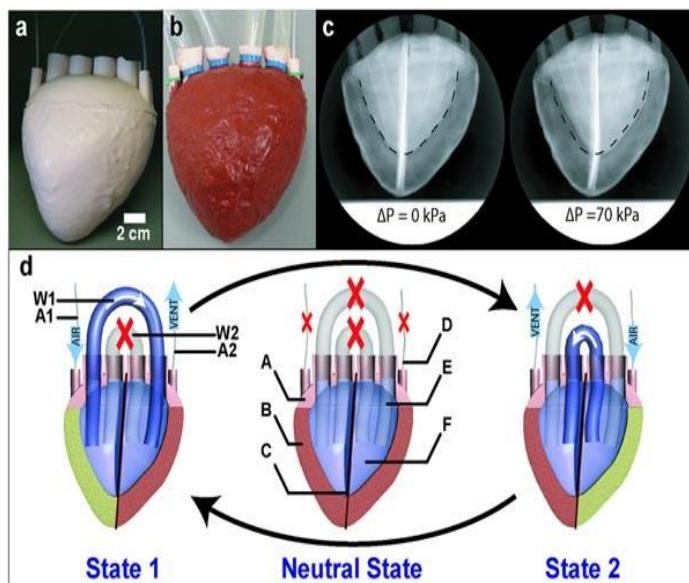
5.6. Ηλεκτρόδια Μπαταριών

Οι μεταλλικοί αφροί από Μόλυβδο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως στήριγμα των ενεργών υλικών μέσα στα οξέα του μολύβδου στις μπαταρίες ώστε να αντικατασταθούν οι συγκρατήρες μολύβδου με αποτέλεσμα την κατασκευή πολύ ελαφριών ηλεκτροδίων.

5.7. Μεταλλικοί αφροί και Ιατρική

Η χρήση μεταλλικών αφρών τιτανίου ή και των κραμάτων κοβαλτίου-χρωμίου χρησιμοποιούνται για εφαρμογή προσθετικής μελών καθώς και στην οδοντοιατρική λόγω της ιστοσυμβατότητας. Δεν υπάρχει μια γενική άποψη ακόμη για τον σχεδιασμό των εμφυτευμάτων με στόχο να έχουν την μέγιστη αντοχή στη φθορά και λειτουργικότητα [37].

Οι αφροί που έχουν σαν κύριο στοιχείο το μαγνήσιο χρησιμοποιούνται σαν πρόσθετα βιοδιασπώμενα. Με τον όρο βιοδιασπώμενα καλείται η διαδικασία κατά την οποία τα πρόσθετα αρχικά χρησιμοποιούνται για να στηρίξουν το οστό και έπειτα καθώς αυτός αναπτύσσεται, απορροφούνται από τον οργανισμό [37].



Εικόνα 35: The artificial organ is made from metal foam
Πηγή: Images courtesy of Cornell University-robotics lab.

5.8. Μεταλλικοί αφροί και αεροδιαστημική

Εξαιτίας τους χαμηλού βάρους, οι μεταλλικοί αφροί μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αεροδιαστημική. Τα φύλλα σάντουιτς μπορούν κάλλιστα να χρησιμοποιηθούν στην θέση των δομών honeycomb. Αυτή η αντικατάσταση έχει αρκετά πλεονεκτήματα όπως τη μείωση του κόστους καθώς και στην απουσία κολλήσεων (η οποία βοηθά στο να παραμείνει η δομή αυτούσια σε περίπτωση φωτιάς. Ελπιδοφόρες είναι οι έρευνες που γίνονται στην συμπεριφορά των μεταλλικών αφρών στην αεροδυναμική ως προς την καταπόνηση [37].

Η Boeing έχει αναπτύξει τη χρήση μεγάλων πλαισίων (τύπου sandwich) αφρών από τιτάνιο με την τεχνική της εναπόθεσης παγίδευσης αερίου καθώς και πλαίσια τύπου sandwich που είναι κατασκευασμένα από αφρούς αλουμινίου για τα ουραία τμήματα των ελικοπτέρων [38]. Αυτά του είδους τα πλαίσια παρουσιάζουν το σημαντικό πλεονέκτημα της καμπυλότητας ακόμη και σε τρισδιάστατες κατασκευές αντίθετα με τις επίπεδες κυψελοειδείς κατασκευές. Αυτή είναι και η αιτία που πολλοί κατασκευαστές ελικοπτέρων χρησιμοποιούν αφρούς αλουμινίου για να αντικαταστήσουν κυψελοειδή εξαρτήματα [39].



Εικόνα 36: Κινητήρας διαστημόπλοιου με επικάλυψη μεταλλικών αφρών.
Πηγή: www.nasa.gov.

Οι μεταλλικοί αφροί χρησιμοποιούνται και σε κατασκευαστικά τμήματα μέσα σε τουρμπίνες. Η σχέση της ακαμψίας και αυξανόμενης απόσβεσης είναι

ουσιαστική. Τα πτερύγια των τουρμπινών κόβονται στο επιθυμητό μήκος μέσα στο κυψελοειδές υλικό κατά την πρώτη λειτουργία και έτσι δημιουργείται μια στεγανή αέρια ασπίδα [39]. Τέλος όσο αναφορά την ανάπτυξη της τεχνολογίας των μεταλλικών αφρών στο διάστημα, οι μεταλλικοί αφροί χρησιμοποιούνται για να απορροφηθεί η ενέργεια στο σύστημα προσγείωσης καθώς και στην επιδιόρθωση-ενίσχυση ορισμένων τμημάτων δορυφόρων [39].

5.9. Ανακύκλωση

Οι περισσότεροι αφροί ανακυκλώνονται με σχετική ευκολία. Αν τα τμήματα αυτά παρουσιάζουν χαμηλή πυκνότητα ή είναι αρκετά μεγάλα κομμάτια κρίνεται σκόπιμο να συμπιεστούν πριν την τήξη. Η ανακύκλωση δεν αποσκοπεί μόνο στην προστασία του περιβάλλοντος αλλά και στην επαναξιοποίηση των προϊόντων κάτι που επιφέρει πρόσθετα κέρδη στην οικονομία της βιομηχανίας.

5.10. Καταλύτες

Οι μεταλλικοί αφροί παρέχουν μεγάλη ολκιμότητα και θερμική αγωγιμότητα. Η αποτελεσματικότητα αυτή οφείλεται στην επιφάνεια αλληλεπίδρασης ανάμεσα στον καταλύτη και του υγρού ή του αερίου που περιέχει. Για παράδειγμα μια τέτοια κατασκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση οξειδίων του αζώτου από τα καυσαέρια. Ένα διάλυμα διαποτίζει τον αφρό (ο οποίος έχει καταλυτικές ουσίες) και έπειτα από μια σειρά κατεργασιών (διέλαση-θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία) δημιουργείται στο εσωτερικό της δομής ένα λεπτό φιλμ με αντιδιαβρωτικές ιδιότητες που παραμένει σταθερό ακόμη και μετά από πολλούς θερμικούς κύκλους [39].

5.11. Ψυγεία από μεταλλικούς αφρούς και intercooler

Οι περισσότερες κατασκευές που έχουν καταγραφεί έχουν δημιουργηθεί από μεταλλικούς αφρούς κραμάτων με κοινό γνώρισμα τις κλειστές κυψέλες. Παρόλα

αυτά θα πρέπει να σημειωθεί και η κατηγορία εκείνη των μεταλλικών αφρών της οποίας κοινό γνώρισμα είναι οι ανοικτές κυψέλες (ανοικτοί πόροι). Το υλικό είναι ενιαίο και συνεχές. Οι αφροί ανοιχτού τύπου παρουσιάζουν μικρότερη αντοχή σε συνθήκες συμπίεσης σε σχέση με αυτούς του κλειστού τύπου. Εμφανίζουν όμως ένα χαρακτηριστικό το οποίο τα καθιστά πολύτιμα για μια συγκεκριμένη χρήση. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι η μεγάλη ελεύθερη επιφάνεια για δεδομένη μάζα μετάλλου.

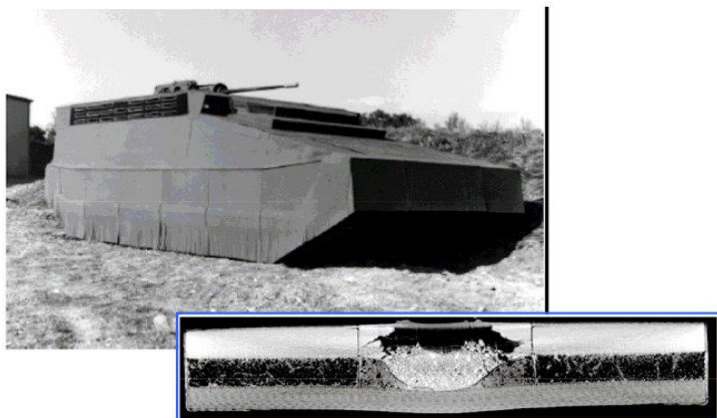
Η κατασκευή εναλλακτών θερμότητας είναι το πιο συχνό παράδειγμα της χρήσης των μεταλλικών αφρών με ανοιχτούς πόρους. Ένας εναλλακτής κατασκευασμένος από αφρό ανοιχτού τύπου με μέση διάμετρο πόρου της τάξεως των 2,5mm ο οποίος έχει κατασκευαστεί από κράμα αλουμινίου T-6106 με διαστάσεις 40mm x 40mm x 2mm παρουσιάζει λόγο ελεύθερης επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας προς όγκος της τάξης των 10.000 m²/m³. Η τιμή αυτή είναι δύο με τρεις φορές μεγαλύτερη σε σύγκριση με τους πιο καλοσχεδιασμένους συμβατικούς εναλλακτες. Η πτώση πίεσης που δημιουργείται από το ρευστό που διαπερνά τον αφρώδη εναλλακτη κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με αυτά των συμβατικών εναλλακτών.

Κατά την πειραματική διαδικασία η συνολική απόδοση του εναλλακτη παρουσιάστηκε δυο φορές μεγαλύτερη σε σύγκριση με αυτή ενός συμβατικού εναλλακτη. Είναι λοιπόν θέμα χρόνου για την εμφάνιση των πρώτων υπερ-αποδοτικών εμπορικών ψυγείων και intercooler αφρού στα αυτοκίνητα [40]. Οι μεταλλικοί αφροί υιοθετούνται σε όλες τις εφαρμογές εναλλαγής θερμότητας (ψύξη ηλεκτρονικών, ψυγεία-εναλλακτες οχημάτων, βιομηχανικά ψυγεία κ.α.).

5.12. Βλήματα από μεταλλικούς αφρούς

Λόγω της υψηλής απορρόφησης δυνάμεων πρόσκρουσης των μεταλλικών αφρών αρκετές εταιρίες στρατιωτικών εφαρμογών, όπως για παράδειγμα η United Defense δοκιμάζουν πολλά είδη μεταλλικών αφρών με σκοπό να θωρακίσουν τα οχήματά τους. Οι πιο συχνοί μεταλλικοί αφροί που χρησιμοποιούνται για την

θωράκιση των οχημάτων είναι οι αφροί κραμάτων αλουμινίου, οι οποίοι είναι εμποτισμένοι με συνθετικές ρητίνες ώστε να βελτιώσουν ακόμη περισσότερο τις μηχανικές τους ιδιότητες.



Εικόνα 36: θωράκιση οχήματος με μεταλλικό αφρό
Πηγή: Bullet-Shredding Metal Foam Poised for Market. Seffers

Οι ενισχυμένοι αυτοί αφροί αποκτούν απίστευτες ιδιότητες σχετικά με την απορρόφηση συγκρούσεων όσο αναφορά τη διαχείριση των τασεων, πίεσης και τάσης χωρίς να παρουσιάζεται καμία παραμόρφωση. Εκτός από την απορρόφηση συγκρούσεων οι θωρακίσεις έχουν χαμηλό βάρος και αποτελούνται από πολλά στρώματα κεραμικών υλικών ενισχυμένα από αφρό αλουμινίου. Τέλος είναι σε θέση να αποσβέσουν κάθε κινητική και θερμική ενέργεια βλημάτων.

Συμπεράσματα

Με την πάροδο των χρόνων το ενδιαφέρον για την χρήση των μεταλλικών αφρών έχει αυξηθεί ιδιαίτερα. Ένα από τους βασικότερους λόγους είναι η αυξημένη ζήτηση για την δημιουργία εφαρμογών με μειωμένο βάρος. Παρόλο που στην αρχή το κόστος της εφαρμογής ήταν υψηλό, τα τελευταία χρόνια ο τρόπος παραγωγής του εξελίσσεται ραγδαία με αποτέλεσμα την δημιουργία δομών μεταλλικών αφρών με χαμηλότερο κόστος απ ότι στην αρχή και με διαδικασία ολοένα και πιο ελεγχόμενη. Οι νέες αυτές τεχνολογίες έχουν μειώσει ή εξαφανίσει τελείως το πρόβλημα κατασκευής δομών με μη αναπαραγόμενες ιδιότητες με αποτέλεσμα την εμφάνιση αφρών υψηλής ποιότητας.

Λόγω του χαμηλού τους βάρους, της εξαιρετικής ικανότητας απορρόφησης ενέργειας και ήχου που παρουσιάζουν καθώς και της μεγάλης αντίστασης τους στην φωτιά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχεδόν σε κάθε τομέα της καθημερινότητας. Οι μεταλλικοί αφροί χρησιμοποιούνται πλέον στην μηχανολογία, στον οικοδομικό κλάδο, στην ναυπηγική, στην αεροδιαστημική στην βιομηχανία των χημικών κ.α. Βέβαια οι μεταλλικοί αφροί παράγονται ακόμη από ένα μικρό αριθμό εταιριών, σε περιορισμένη κλίμακα και για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Παρά τις όποιες δυσχέρειες και προβλήματα υπάρχουν στην παραγωγή μεταλλικών αφρών το ενδιαφέρον της εμπορικής βιομηχανίας για το υλικό αυτό όλο ένα και μεγαλώνει. Μεγάλες προσπάθειες γίνονται σε παγκόσμιο επίπεδο κυρίως μέσα από ερευνητικές διαδικασίες. Στόχος των ερευνών αυτών είναι η δημιουργία μεταλλικών αφρών με υψηλή ποιότητα αλλά συγχρόνως με χαμηλό κόστος παραγωγής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να κατασκευάζονται προϊόντα ελκυστικά στην βιομηχανία με μικρό βάρος, μεγάλη ακαμψία καθώς και αυξημένα ποσοστά απορρόφησης ενέργειας.

Η παρούσα γενιά των μεταλλικών αφρών παρουσιάζουν δυναμικό προφίλ και η όλη διάρκεια επεξεργασίας εξελίσσεται με γρήγορους ρυθμούς. Άξιο είναι βέβαια να αναφερθεί το γεγονός ότι μερικά στάδια επεξεργασίας χρήζουν ακόμη βελτίωσης. Λόγου ότι από τα μέταλλα και τα κράματα μπορούν να παράγουν πορώδη υλικά με εξαιρετικές ιδιότητες προβλέπεται μελλοντικά να αναπτυχθούν ακόμη περισσότερο.

Μέχρι σήμερα τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι αρκετά ευνοϊκά. Θα χρειαστεί όμως περισσότερη προσπάθεια ώστε οι μεταλλικοί αφροί να μπορούν να παραχθούν από περισσότερες βιομηχανίες με ακόμη πιο χαμηλό κόστος παραγωγής .

Βιβλιογραφία

1. Friedrich B, Jessen K, Rombach G. (2003). Aluminium foam – Production, Properties and Recycling Possibilities. ERZMETALL (11), 56.
2. Banhart J. (2001). Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. Progress in Material Science 46, 559-632.
3. Sosnick B. (1948). Making foamlike mass of metal. San Francisco.486, 209.
4. Beranek L.L (1960). Noise Reduction, Graw-Hill, New York.
5. Kheradmand B, Otroj S, Soleimanpour Z, Beigyfar M. (2013). Comparison between methods used for manufacturing of aluminum foam. Life Science Journal. 10 (1).
6. Banhart J. (2000). Production Methods for Metallic foams. Institute for Applied Materials Research. Jom (12), 22-27.
7. Shinko wire Co. (1997). Alporas Data Sheets, Amagasaki-shi, Japan.
Yaniv S.L, Acoust J. (1973). Soc. Am. 54, 1138.
8. Ashby M.A, Evans A, Fleck N, Gibson L, Hutchinson J, Wadley H. (2000). Metal foams, a design guide. Elsevier. Burlington.
9. Bedyk, J.C. (2002). Production and Application of Aluminium foam, Past Product Potential Revisited in the New Millennium– Light Metal Age, 24-29.
10. Babcs'an N, Leitmeier D, Banhart J. (2004). Metal foams-High temperature colloids Part 1. Ex situ analysis of metal foams. A Hahn-Meitner Institute, Department of Materials Science, Glienicke, Berlin, Germany.
11. Shapovalov V.I, Withers J.C. (2008). Hydrogen technology for porous metals (Gasars) production. Withers aterials and Electrochemical Research Corporation. Tucson, USA.
12. Sobczak J. (2003). High porosity media for transportation. Journal of kones Internal Combustion Engines , (10), 34.
13. Gergely V, Clyne B. (2000).The Formgrip Process: Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors.

14. Gergely V, Simancik F, Matthams T.J, Clyne T.W. (1999). Preparation of Ceramic/Metal Foam Laminates Using an In Situ Foaming Technique, in 12th International Conference on Composite Materials. Paris, Woodhead, Cambridge, 589.
15. Guner et al. (2015). New Approaches to Aluminum Integral Foam Production with Casting Methods. *Metals*. 5, 1553-1565.
16. Yu C-J, Eifert H. (1998). Metal foams. *Advanced Materials & processes Mepura Alulight*. Metall pulver GmbH. Brannau, Ranshofen, Austria, 45-47.
17. Ashby M.F, Hutchinson J.W, Evans A.G. (1998). *A Design Guide*: Cambridge University Press. Cambridge. UK.
18. Koch A, Thompson M, Nardone V. (1994). *Proceedings 4th International Conference on Aluminum Alloys*. Atlanta. GA, 387.
19. Sugimura Y, Meyer J, He M, Bart Smith H, Grenstedt J.L, Evans A.G. (1997). *Acta Mater*. 45, 5345.
20. Figliola R, Beasley D. (2000). *Theory and design for Mechanical Measurements*, John Wiley and sons, New York.
21. Παϊπέτης Α, Μπάρκουλα Μ. (2016). *Σύνθετα Υλικά: Χαρακτηρισμός και Ιδιότητες Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών. Σημειώσεις εργαστηρίου.*
22. Otsuka M, Kojima A, Itoh M, Ishii E. (1991). *Science and Engineering of Light Metals*. Japan Institute of Light Metals. Tokyo, 999.
23. Gibson L.J, Ashby M.F. (1997). *Cellular Solids*, 2nd ed. Cambridge University Press. Cambridge. UK.
24. Grohn M, Voss D, Hintz C, Sahm P. (2001). *Production and infiltration of metallic open cell structures with different pore sizes*, Bremen, Germany, 18-20 June, MIT Press-Verlag, Bremen, 197.
25. Korner C, Singer R.F. (2000). *Processing of Metal Foams—Challenges and Opportunities*. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany.
26. Kanaun, S. and Kochekserai, S.B. (2012). Conductive properties of foam materials with open or closed cells. *International Journal of Engineering Science* 50. pp. 124-131.

27. Zwikker C, Kosten C.W. (1949). Sound Absorbing Materials. Elsevier. New York.
28. Libeer W, Ramos F, Newton C, Alipanahrostami M, Depcik C, Li X. (2016). Two-phase heat and mass transfer of phase change materials in thermal management systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 100, 215-223.
29. Rubar R, Beer M, Kudelas B. (2015). Copper metal foam as an essential construction element of innovative heat exchanger. *Pandula*.
30. Kaptay G, Banhart J, Ashby M.F. (2001). *Cellular Metals and Metal Foaming Technology*. MIT-Verlag, N.A. Fleck (Eds.), 117.
31. Πεγλιβανόγλου Γ. (2016). Προσωπικές σημειώσεις που έχουν ενταχθεί στο περιοδικό R&D Team.
32. Choi, J. B., Lakes. R. S. (1991). Design of a fastener based on negative Poisson's ratio foam *Cellular Polymers*. 10, 205-212.
33. Ashby M.A, Evans A, Fleck N, Gibson L, Hutchinson J, Wadley H. (2000). *Metal foams, a design guide*. Elsevier. Burlington.
34. Scott F. Albert J. Peter J. (2005). Microstructural alterations associated with friction drilling of steel, aluminum, and titanium". *Journal of Materials Engineering and Performance* 14 (5): 647–653
35. Byakova A, Gnloskurenko S, Benzimyanniy Y, Nakamura T. (2014). Closed-Cell Aluminum Foam of Improved Sound Absorption Ability: Manufacture and Properties *Metals*, 4(3), 445-454.
36. Manufacture John Banhart. characterisation and application of cellular metals and metal foams. (2001) *Pergamon Science*.46, (6).
37. Arikan M.M, Nebioglu M. (2015). Review New Approaches to Aluminum Integral Foam Production with Casting Methods. Engineering Faculty, Material Science and Engineering Department, Alanya Alaaddin Keykubat University, Turkey.

38. Fleischman T. (2016). Metal-foam hybrid has potential in soft robotics, aeronautics. Cornell chronicle. <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/1.11780>
International Journal of Impact Engineering Volume 82,1-144.
39. Kheradmand B, Otraj S, Soleimanpour Z, Beigyfar M. (2013). Comparison between methods used for manufacturing of aluminum foam. Life Science Journal. 10 (1).
40. Gao L, Sun Y.G, (2015). Thermal Control of Composite Sandwich Structure with Lattice Truss Cores. Journal of Thermophysics and Heat Transfer 29:1, 47-54.
41. Topin F. Bonnet J-P. Madani B. Tadrist L. (2006). Experimental Analysis of Multiphase Flow in Metallic foam: Flow Laws, Heat Transfer and Convective Boiling. Advanced Engineering Materials 8 (9): 890.
42. Hardy P.W, Peisker G.W. (1967). Method of producing a lightweight foamed metal, US Patent 3300296.
43. Banhart J. (2001). Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. Progress in Material Science 46, 559-632.

