

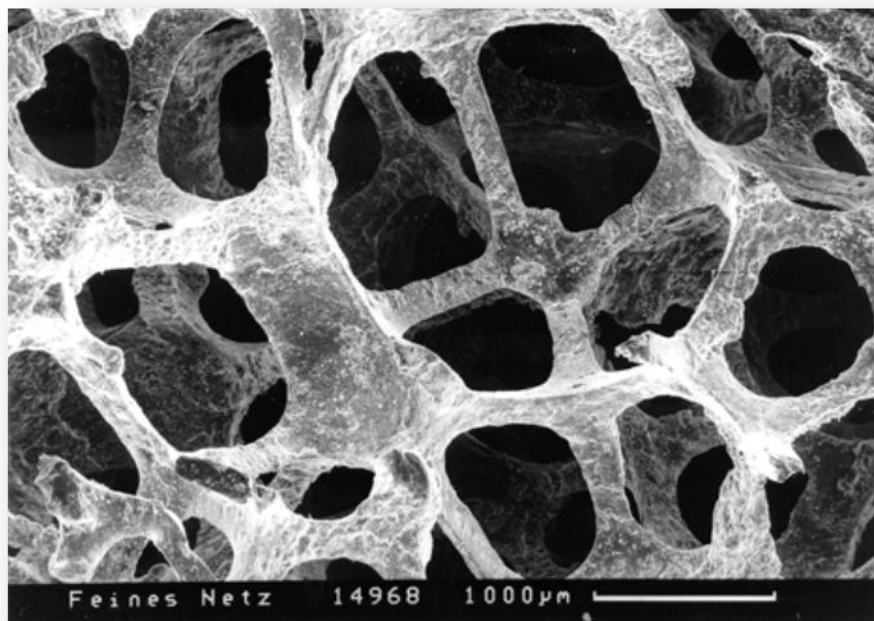


**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ  
ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ  
ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ»

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΜΠ

Μεταπτυχιακή εργασία  
Θέμα : Μεταλλικοί Αφροί



Επιβλέπων Καθηγητής : Μανωλάκος Δημήτριος

Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Καράπας Νικόλαος

Αθήνα Ιούνιος 2015

### Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου κύριο Μανωλάκο, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και τη δυνατότητα να εκπονήσω την εργασία αυτή στο εργαστήριο του.

Στη συνέχεια ευχαριστώ ιδιαίτερα το διδάκτορα Παπαντωνίου Ιωάννη για τη βοήθεια του, για τις ιδέες και τις ουσιαστικές συζητήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια των ερευνών και της μελέτης αυτής της εργασίας. Χωρίς τη βοήθεια τους δεν θα είχα φτάσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για τη συμπαράσταση και βοήθεια σε όλη τη διάρκεια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
1. Εισαγωγή.....	6
2. Ιστορική Αναδρομή.....	10
3. Μέθοδοι Παραγωγής Μεταλλικών Αφρών.....	14
3.1. Παραγωγή πορώδων μετάλλων από υγρό μέταλλο.....	18
3.1.1 Απ'ευθείας αφροποίηση μετάλλων . . . . .	18
3.1.1.1 Αφροποίηση με εισαγωγή αερίου(Τεχνολογία παραγωγής Alcan/Norsk Hydro) . . . . .	19
3.1.1.2 Αφροποίηση με μέσα που δημιουργούν φυσαλίδες. . . . .	21
3.1.2 Ευτηκτική στερεοποίηση στερεού- αερίου (“gasars”). . . . .	24
3.2. Τήξη από σκόνη μετάλλου.....	26
3.2.1. Διαδικασία FORMGRIP . . . . .	26
3.2.2 Τεχνική συμπίεσης τήγατος κόνεων . . . . .	28
3.2.2.2 Παραγωγή αφρού αλουμινίου με την τεχνολογία MEPURA. . . . .	30
3.2.2.3 Παραγωγή αφρού αλουμινίου με αρκετά πολύπλοκο σχήμα.. . . .	31
3.3. Μέθοδοι Χύτευσης.....	38
3.3.1 Χύτευση δύο σταδίων με χρήση πολυμερικού προτύπου. . . . .	38
3.3.2 Χύτευση με πολυμερικό πρότυπο Laticce Block Materials(LBM). . . . .	39
3.3.3 Χύτευση σε πρότυπο για τη δημιουργία μεταλλικών σπόγγων μεταβλητού πορώδους. . . . .	40
3.4. Μέθοδος “Osprey”. Αφροποίηση με ψεκασμό.....	41
4. Κατεργασίες-Μορφοποιήσεις Μεταλλικών Αφρών.....	42
5. Μέθοδος χαρακτηρισμού Μεταλλικών Αφρών.....	45
5.1. Μη καταστροφικός έλεγχος. . . . .	45
5.2. Καταστροφικοί Έλεγχοι. . . . .	48
6. Ιδιότητες - Μηχανικές ιδιότητες μεταλλικών αφρών .....	49
6.1 Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες. . . . .	49
6.2 Μηχανικές Ιδιότητες Αφρών. . . . .	51
6.3 Αντοχή των δομών Σάντουιτς – Απορρόφηση ενέργειας. . . . .	52
6.4 Μέτρο Ελαστικότητας. . . . .	54
7. Εφαρμογές μεταλλικών αφρών .....	55
8. Μελλοντικές εξελίξεις .....	65

9. Πρώτη πειραματική διαδικασία .....	66
9.1 Κατεργασία δοκιμίων .....	75
10. Δεύτερη Πειραματική διαδικασία .....	77
10.1 Συμπεράσματα.....	84
10.2 Σκληρομέτρηση.....	85
10.3 Παρατηρήσεις με στερεοσκόπιο.....	89
10.4 Ανάλυση βίντεο.....	94
10. 5 Επανάληψη πειραματικής διαδικασίας με σκοπό τη δόκιμη θλίψης.....	102
11. Επίλογος.....	110
12. Βιβλιογραφία.....	111

## Περίληψη

Οι μεταλλικοί αφροί είναι μια κατηγορία πορώδων υλικών, με εξαιρετικά χαμηλή πυκνότητα και ικανοποιητικό συνδυασμό ακουστικών, θερμικών, ηλεκτρικών, μηχανικών και ακουστικών ιδιοτήτων.

Αυτές οι ιδιότητες τους καθιστούν ενδιαφέροντα υλικά για εφαρμογές όπου απαιτούνται περισσότερες από μια λειτουργίες όπως για παράδειγμα ηχομόνωση, πυροπροστασία και απορρόφηση ενέργειας.

Έτσι λοιπόν μας παρέχουν μια μεγάλη ποικιλία από ελαφρού βάρους κατασκευές, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροναυπηγική, στην μηχανολογία, στις οικοδομές, στις οικιακές συσκευές, στην βιομηχανία των χημικών αλλά και στη βιομηχανία επίπλων κ.α.

Από τη δεκαετία του πενήντα είναι γνωστοί οι μέθοδοι παρασκευής των μεταλλικών αφρών . Δεν εξαπλώθηκαν εκτεταμένα λόγω υψηλού κόστους και δυσκολία στην παρασκευή τους .

Μετά από εκτεταμένη έρευνα, ανακαλύφθηκαν καινούργιες τεχνολογίες παραγωγής μεταλλικών αφρών οι οποίες έχουν μειώσει στο ελάχιστο ή έχουν εξαλείψει αυτά τα προβλήματα, με αποτέλεσμα την παραγωγή αφρών υψηλής ποιότητας.

Η σημερινή γενιά των μεταλλικών αφρών έχουν προφίλ δυναμικό και ο έλεγχος της επεξεργασίας βελτιώνεται ραγδαία, πολλοί βέβαια από αυτούς εξακολουθούν να είναι υπό ανάπτυξη.

Επειδή από τα μέταλλα και τα κράματα μπορούν εύκολα να παραχθούν πορώδη υλικά με αρκετά καλές ιδιότητες, προβλέπεται μεγάλη ανάπτυξη στ μέλλον.

Τέλος στόχος της πειραματικής διαδικασίας είναι η μελέτη ενός τρόπου παραγωγής μεταλλικών αφρών, η παραγωγή μεταλλικών αφρών από πρόδρομα δοκίμια, παρατηρήσεις με στερεοσκόπιο και ένα πείραμα θλίψης.

## ABSTRACT

Metal foams are a class of porous materials with very low density and a satisfactory combination of mechanical, electrical, thermal, acoustic and explosionproof properties.

These combined properties make them interesting materials for applications requiring more than one function such as high stiffness, fire protection and sound insulation

So they provided us a wide variety of lightweight construction, they can be used in the automotive, engineering, construction, household appliances, industrial chemicals etc.

Methods of manufacturing metal foams are known from decade of fifties. There are two reasons why it has not yet spread widely: difficulty in controlling manufacturing and high cost.

After extensive research, they discovered new metal foams production technologies which have minimize or eliminate these problems, thus producing high quality foams.

The current generation of metal foams have dynamic profile and control of processing is improved rapidly, of course many of them are still under development.

Because of metals and alloys can be easily produced porous materials with several interesting properties, provided in the future rapid development of this kind of materials.

Finally target the experimental procedure is the study of how production of metallic foams, production of metallic foams from precursor essays, observations with a stereoscope and a grief experiment.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

**“When nature builds large load-bearing structures, she generally uses cellular materials : wood , bone , coral.**

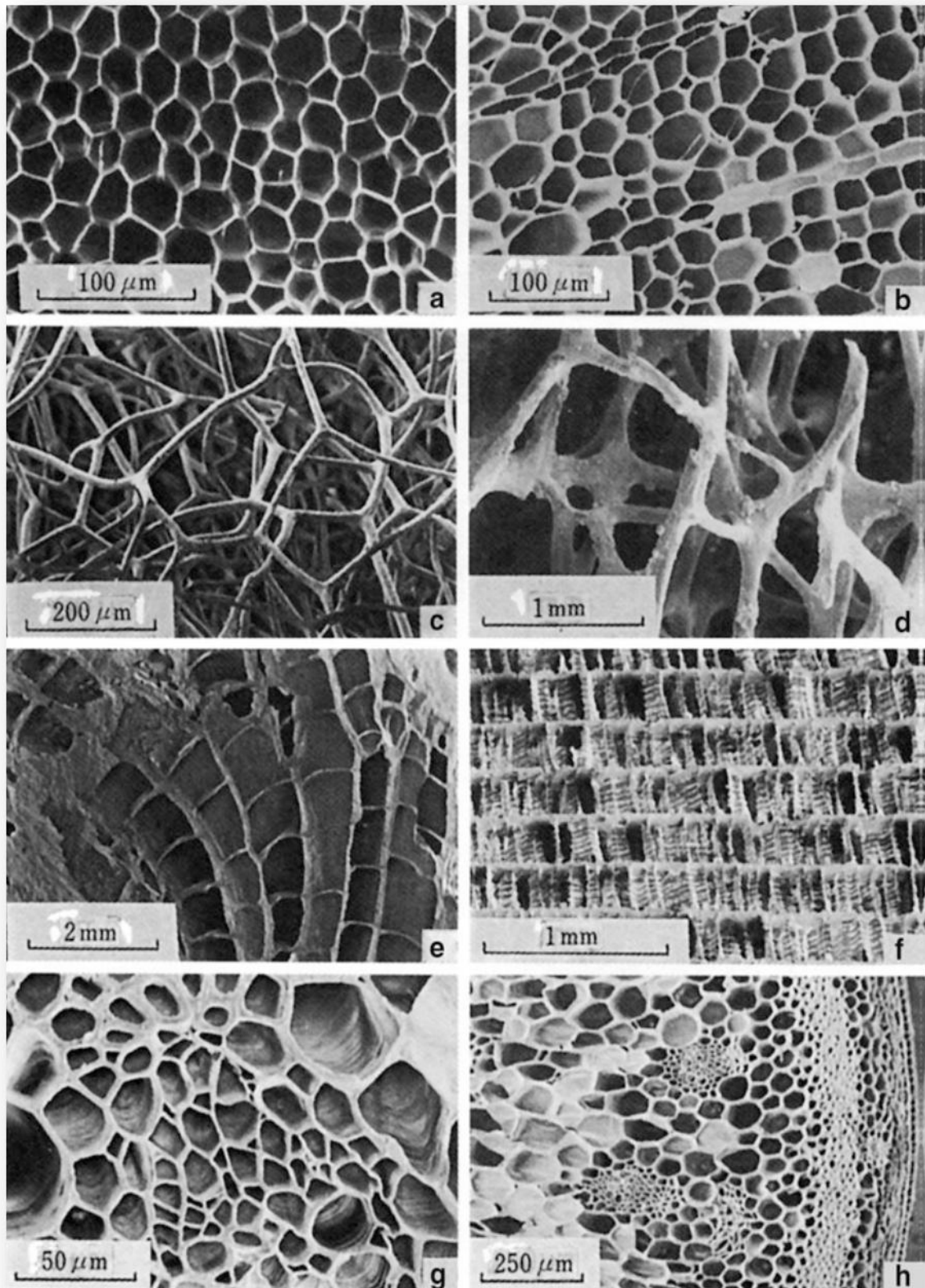
**There must be good reason for it”**

*M.F. Ashby, Cambridge University*

*«Όταν ο σύγχρονος άνθρωπος δημιουργεί ανθεκτικές κατασκευές, χρησιμοποιεί συμπαγή στερεά υλικά : χάλυβα, σκυρόδεμα , γυαλί. Όταν η φύση δημιουργεί, χρησιμοποιεί κατά κύριο λόγο πορώδη υλικά: ξύλο, οστά, όστρακα. Σίγουρα θα πρέπει να υπάρχουν κάποιοι καλοί λόγοι για αυτό.»*

Όπως επιγραμματικά αναφέρει ένας από τους κυριότερους ερευνητές των Μεταλλικών Αφρών, ο «M.F. Ashby», υπάρχουν σοβαροί λόγοι να ασχοληθεί η επιστήμη με την κατανόηση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των πορώδων υλικών και την μεταφορά των μηχανισμών και των νόμων που τα διέπουν, στη σύγχρονη τεχνολογία.

Στο φυσικό κόσμο παρατηρείται ένας μεγάλος αριθμός από πορώδη υλικά π.χ. ξύλα, οστά, φύλλα, μίσχοι, σπόγγοι, κηρύθρες κ.λ.π. . Αυτοί οι πόροι πραγματοποιούν τις λειτουργίες εφοδιασμού. (εικ.1.1)



εικ.1.1 Φυσικά κυτταρικά υλικά: (a) φελλός, (b) μπάλα, (c) σπόγγος, (d) σπογγώδη οστό, (e) κοράλλι, (f) οστό σουπιάς, (g) ίριδα φύλλου, και (h) μίσχος ενός φυτού (1997 Cambridge University)



Ο όρος «αφρός» δεν χρησιμοποιείται πάντα εύστοχα και για το λόγο αυτό πρέπει να καθοριστεί.

Οι αφροί προκύπτουν από μια ομοιόμορφη διασπορά της αέριας φάσης σε υγρή ή στερεή.

Στον τομέα των υδατικών αφρών ο όρος αφρός συνήθως προορίζεται στη διασπορά φυσαλίδων αερίου σε υγρά και οι αφροί παράγονται σε υγρή ή ημιστερεά κατάσταση

Η μορφολογία τέτοιων αφρών ωστόσο μπορεί να διατηρηθεί και στη μετάβαση στην στερεά κατάσταση, που αποκαλείται με τον όρο «στερεός αφρός» (solid foam).

Για μεταλλικά συστήματα ορίζουμε:

- **κυτταρικά μέταλλα**, τα οποία είναι υλικά με ένα υψηλό κλάσμα όγκου κενών που αποτελείται από ένα διασυνδεδεμένο, δίκτυο από αντηρίδες και πλάκες

- **πορώδη μέταλλα**, που έχουν απομονωθεί, σχεδόν σφαιρικοί πόροι και το πορώδες επίπεδο είναι συνήθως μικρότερο από 70%. Μηχανικά, οι πόροι δεν αλληλεπιδρούν αν το πορώδες είναι λιγότερο από 20% περίπου.

- **μεταλλικοί αφροί**, είναι μια υποομάδα των κυτταρικών μετάλλων, που συνήθως έχουν πολυεδρικά κύτταρα, αλλά τα σχήματα μπορεί να ποικίλλουν σε περιπτώσεις όπως, για παράδειγμα, της κατευθυνόμενης στερεοποίησης, που δημιουργούνται διαφορετικές μορφολογίες.

Τα πορώδη στερεά δεν είναι απαραίτητο να κατασκευασθούν μόνο από υγρή κατάσταση και για τον λόγο αυτό μπορούν να έχουν οποιαδήποτε μορφολογία όπως για παράδειγμα η τυπική ανοικτή δομή που προκύπτει από σκόνες με πυροσυσσωμάτωση (sintering).

Συχνά τέτοιες πορώδεις δομές ονομάζονται «αφροί» αν και ο όρος «σπογγώδη» ταιριάζει καλύτερα.

Μεταξύ των τεχνικά κατασκευασμένων πορωδών υλικών, οι πολυμερικοί αφροί είναι οι πιο σημαντικοί και έχουν ευρεία εφαρμογή σχεδόν σε κάθε τομέα της τεχνολογίας.[4]

Σύμφωνα με τους Gibson και Ashby τα πορώδη υλικά μπορεί να θεωρηθεί ότι συγκροτούν μια συνάθροιση πολυεδρικών κελιών, αποτελούμενα από ένα δίκτυο στερεών στυλίσκων (ακμές των κελιών) που συνδέονται μεταξύ τους με λεπτά στερεά φύλλα του ίδιου υλικού (τοιχώματα κελιού).

Εάν η συνάθροιση των κελιών είναι στο επίπεδο (δισδιάστατη), η απορρέουσα μορφολογία είναι κυψελοειδούς μορφής και εάν είναι στο χώρο προσδιορίζεται ως αφρός.

Επίσης όσο αφορά τα πορώδη υλικά διακρίνουμε δύο μεγάλες κατηγορίες:

**τα κλειστού κελιού**, όπου οι πόροι απομονώνονται από τους γειτονικούς τους από την στερεή φάση που τα περιβάλλει και

**τα ανοικτού κελιού**, όπου οι πόροι είναι συνεχείς και «σπηλαιοειδούς» μορφής μέσα στην στερεή φάση.

Επίσης είναι εφικτός ο συνδυασμός των δύο προηγούμενων κατηγοριών.

Στη βιβλιογραφία και στην πρακτική χρήση, υπάρχει κάποια σύγχυση όσον αφορά τον όρο «μεταλλικός αφρός», που χρησιμοποιείται συχνά για οποιοδήποτε μη-πυκνό μεταλλικό υλικό.

Γενικά όταν αναφερόμαστε σε «μεταλλικούς αφρούς» εννοούμε τους στερεούς αφρούς.

Ο στερεός αφρός είναι μια ειδική περίπτωση υλικών που είναι γνωστά ως «κυψελοειδή στερεά» (cellular solids).

Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον για τους μεταλλικούς αφρούς έχει αυξηθεί ιδιαίτερα.

Γενικά τα τελευταία 40 χρόνια έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για να δημιουργηθούν δομές μεταλλικών αφρών, οι οποίες όμως δεν βρήκαν εφαρμογή λόγω του υψηλού κόστους.

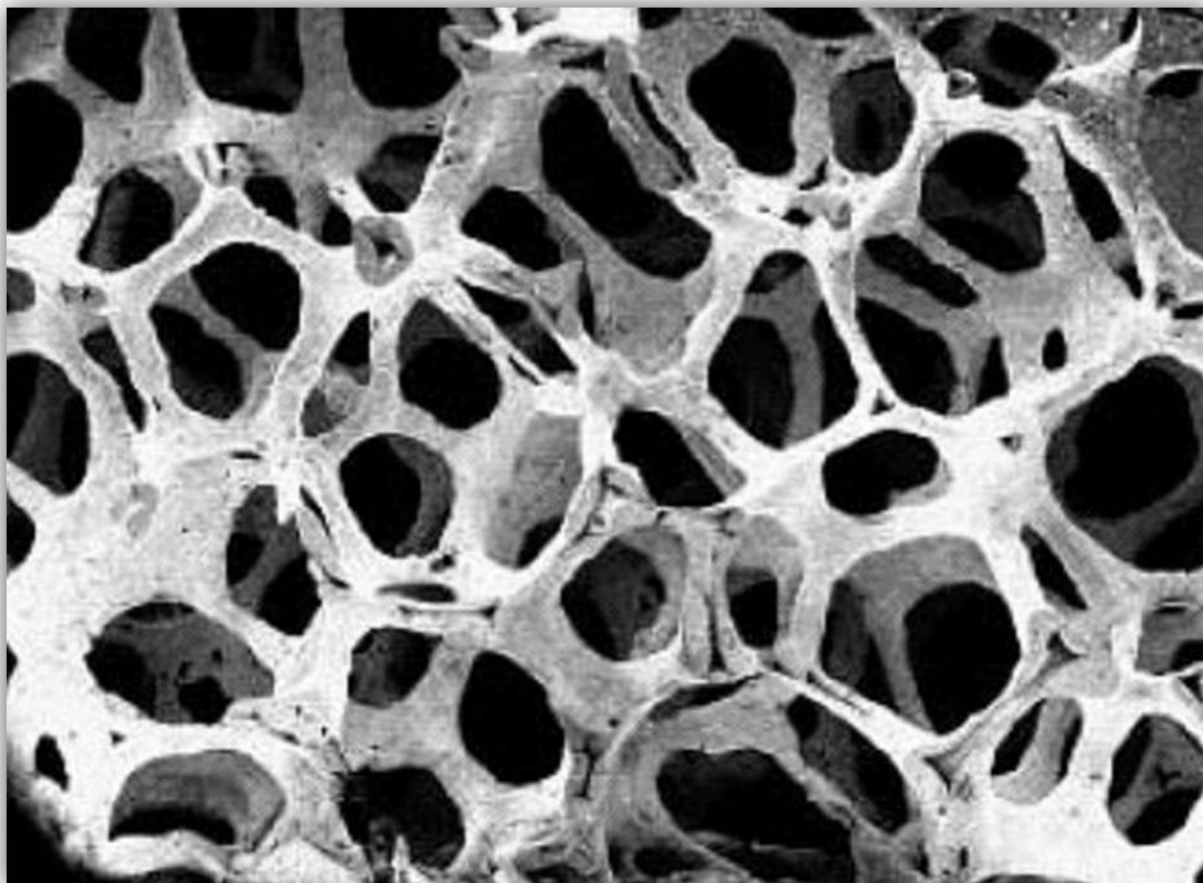
Επίσης ένα άλλο πρόβλημα ήταν το ότι δεν μπορούσαν να παραχθούν δομές με αναπαραγόμενες ιδιότητες.

Αυτό μπορεί να οφειλόταν παραδείγματος χάριν στην χαμηλή αφριστικότητα του λειωμένου μετάλλου, στην μεγάλη διασπορά, στο μέγεθος των πόρων ή στην συρρίκνωση κατά την στερεοποίηση.

Μετά από αρκετές έρευνες, ανακαλύφθηκαν καινούργιες τεχνολογίες παραγωγής μεταλλικών αφρών οι οποίες έχουν μειώσει στο ελάχιστο ή έχουν εξαλείψει αυτά τα προβλήματα, με αποτέλεσμα την παραγωγή αφρών υψηλής ποιότητας.

Η σημερινή γενιά των μεταλλικών αφρών (metfoams) έχουν πολύ καλό προφίλ και βελτιώνεται ραγδαία ο έλεγχος της επεξεργασίας. Πολλοί από αυτούς βέβαια εξακολουθούν να είναι υπό ανάπτυξη.

Επειδή από τα μέταλλα και τα κράματα μπορούν εύκολα να παραχθούν πορώδη υλικά με αρκετά ενδιαφέρουσες ιδιότητες, προβλέπεται στο μέλλον μεγάλη ανάπτυξη αυτών .



*Εικ.:1.2Μεταλλικός αφρός σε μεγέθυνση*

## **2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ**

Η παραγωγή μεταλλικών αφρών έγινε για πρώτη φορά στα τέλη της δεκαετίας του 1940 από τον Benjamin Sosnicki.

Η μέθοδος του εκμεταλλευόταν το γεγονός ότι σε κράματα που οι διαφορετικές φάσεις έχουν μεγάλη διαφορά στο σημείο τήξης και βρασμού, οι φάσεις μπορούν να τακούν και να βράσουν ανεξάρτητα η μια από την άλλη.

Η διαδικασία έχει ως εξής: ένα πολυφασικό κράμα θερμαίνεται, με την σύσταση του κράματος να είναι τέτοια, ώστε το ένα συστατικό να βράζει ενώ το άλλο μόλις έχει αρχίσει να λιώνει.

Το κράμα κατά την διάρκεια της θέρμανσης βρίσκεται μέσα σε ένα αυτόκλειστο (εφαρμογή υψηλής πίεσης), έτσι ώστε το μέταλλο στην αέρια φάση να μην μπορεί να φύγει από το υγρό μέταλλο.

Μείωση της πίεσης οδηγεί σε ξαφνικό βρασμό του κράματος, το οποίο στην συνέχεια μπορεί να ψυχθεί και να δώσει ένα στερεό γεμάτο από κλειστούς πόρους.

Οι προτεινόμενες χρήσεις αξιοποιούσαν την βελτιωμένη αντοχή σε κρούση του κράματος καθώς και την θερμομόνωση και ηχομόνωση.

Προφανώς μόνο λίγα κράματα ήταν κατάλληλα για αυτή τη διαδικασία, αφού μια από τις φάσεις έπρεπε να έχει εξαιρετικά χαμηλό σημείο βρασμού με αποτέλεσμα η σύνθεση του κράματος να περιλαμβάνει στοιχεία όπως ο ψευδάργυρος, το κάδμιο και ο υδράργυρος, στοιχεία σχετικά πτητικά και εκρηκτικά.

Η όλη διαδικασία έδινε μικρή ποσότητα μη κανονικού αφρού η οποία ήταν αρκετά δαπανηρή και περιείχε μερικά επικίνδυνα μέταλλα.

Ίσως γι' αυτό η συγκεκριμένη διαδικασία δεν χρησιμοποιήθηκε ποτέ.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1950 έγινε και η παραγωγή μεταλλικών αφρών με ανοιχτούς πόρους. Το 1959 έγινε μια μεγάλη καινοτομία στην παραγωγή των μεταλλικών αφρών από τους ερευνητές της United Aircraft Corporation.

Στην καινούργια αυτή μέθοδο αναμιγνύουμε ένα κονιοποιημένο μέταλλο μαζί με ένα υλικό σε σκόνη που χρησιμεύει στην παραγωγή αερίων.

Το υλικό που θα παράγει το αέριο πρέπει να το επιλέξουμε προσεκτικά, ώστε κοντά στην θερμοκρασία τήξης του μετάλλου να αποσυντίθεται και να παράγει μεγάλη ποσότητα αερίου.

Ένα μειονέκτημα της μεθόδου αυτής ήταν ότι παρουσίαζε προβλήματα κατά την διαδικασία της ψύξης του αφρού.

Το 1963 οι Hardy και Peisker παρουσίασαν μια καινούργια μέθοδο στην οποία προσθέτανε κατευθείαν τον αφριστικό παράγοντα στο τήγμα του μετάλλου. Αυτή η μέθοδος ήταν πολύ πιο φθηνή από εκείνη που χρησιμοποιούσε κονιοποιημένο μέταλλο.

Σε γενικές γραμμές όμως η παραγωγή των μεταλλικών αφρών ήταν αρκετά δαπανηρή, μη αξιόπιστη και γινόταν περισσότερο στα εργαστήρια των Πανεπιστημίων για εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Στις επόμενες δεκαετίες ακολούθησαν και άλλες έρευνες για την παραγωγή και εφαρμογή των νέων υλικών η οποία όμως παρέμενε σε χαμηλά επίπεδα έως τη δεκαετία του '90, όπου αναπτύχθηκαν μερικά Ευρωπαϊκά προγράμματα (EFG, InnoZelmet, LISA, MURI,ULMA) και εμφανίστηκαν μερικές εταιρείες με σκοπό την εμπορική τους εκμετάλλευση.

Στην ανάπτυξη τους βοήθησε και η τεχνογνωσία των σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας (MMC),αφού αρκετές εφαρμογές τους διέπονται από τους ίδιους νόμους και περιορισμούς.

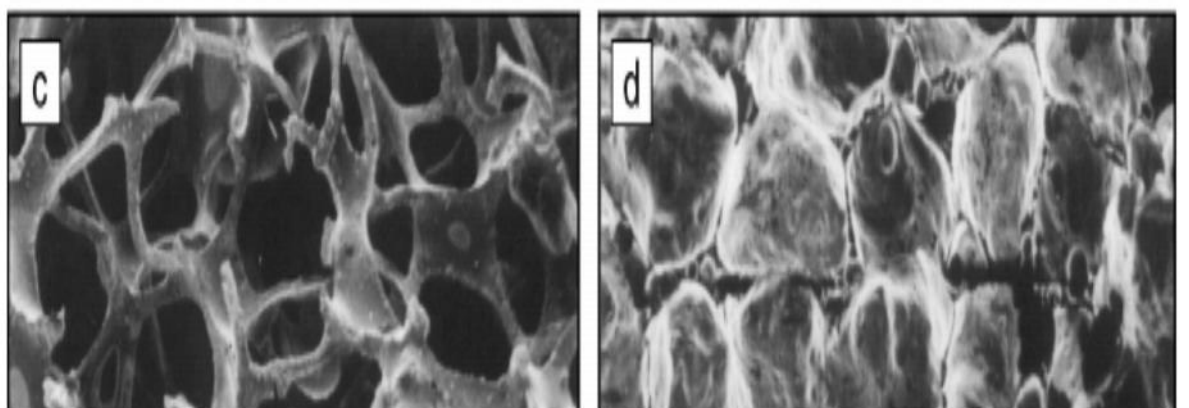
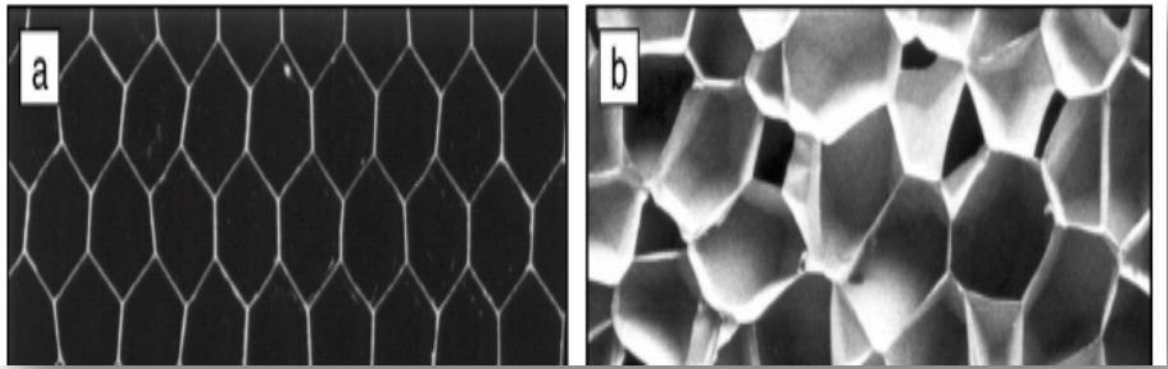
Τα πορώδη υλικά και οι ιδιότητές τους περιγράφηκαν στις μέρες μας με αρκετές λεπτομέρειες από τους Gibson και Ashby .

Επίσης μια εκτεταμένη αναφορά συναντάμε το 2001 από τον J. Banhart . Από τότε μέχρι σήμερα αρκετές τεχνικές έχουν αναπτυχθεί όσο αφορά την παραγωγή και τις εφαρμογές των μεταλλικών αφρών σε σημείο που να επιβάλλεται η ανάπτυξη νέας τεχνολογίας στην περιοχή αυτών των πορωδών υλικών. Τα τελευταία χρόνια έγιναν αρκετές επιστημονικές μελέτες, και έρευνες πάνω στα πορώδη υλικά. Οι προερχόμενοι από τήξη αφροί επικράτησαν στην εμβρυακή αγορά με διάφορες εταιρίες ανά τον κόσμο να προσφέρουν νέα προϊόντα. Ακόμα και σήμερα η αγορά των μεταλλικών αφρών είναι περιορισμένη λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής αφρών υψηλής ποιότητας.

Σήμερα σχεδόν όλη η έρευνα επικεντρώνεται στους αφρούς αλουμινίου (λόγω της χαμηλής πυκνότητας, της αντίστασης σε διάβρωση και ένα χαμηλό σημείο τήξης , το οποίο τους δίνει υψηλή κατεργασιμότητα).

Παρ' όλα αυτά έχουν κατασκευαστεί και αφροί από σίδηρο, νικέλιο και μόλυβδο.

Οι αφροί του νικελίου χρησιμοποιούνται σαν χημικά φίλτρα ενώ οι άλλοι έχουν αμφίβολη ποιότητα και απασχολούν τους ερευνητές πιο πολύ ερευνητικά.



*Κυψελωτά υλικά στο μικροσκόπιο. a) Κυψελωτό αλουμίνιο, b) Αφρός πολυαιθυλενίου με κλειστές κυψέλες, c) Αφρός νικελίου με ανοιχτές κυψέλες, d) Αφρώδες γυαλί με κλειστές κυψέλες.*

### 3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Μετά την δεκαετία του '90 αναπτύχθηκαν αρκετοί τρόποι παρασκευής πορώδων μεταλλικών υλικών. Η ποικιλία των μεθόδων παραγωγής έχει οδηγήσει σε μια αντίστοιχη ποικιλία υλικών όσο αφορά την εσωτερική τους δομή.

Μερικές μέθοδοι εφαρμόζουν ίδιες τεχνικές με αυτές που εφαρμόζονται για να αφοροποιήσουν υδατογενή ή πολυμερικά μείγματα, ενώ αντιθέτως άλλα σχεδιάζονται ειδικά εκμεταλλευόμενοι τις χαρακτηριστικές ιδιότητες των πρόδρομων υλικών.

Μπορούμε να διακρίνουμε τους τρόπους παρασκευής σύμφωνα με την αρχική κατάσταση του μητρικού υλικού.

Έτσι έχουμε μεθόδους παρασκευής υγρής κατάστασης, στερεάς κατάστασης και ατμοποίησης.

Κάθε μέθοδος οδηγεί σε διαφορετική τοπολογία της δομής των παραγόμενων υλικών.

Η δομή χαρακτηρίζεται **στοχαστική** μόνο όταν διακρίνεται από στατική ομοιομορφία και **συντακτική ή περιοδική** όταν συνίσταται από την επαναλαμβανόμενη παράθεση συμμετρικών τύπων στο επίπεδο ή στο χώρο.

Τα τελικά προϊόντα πολλές φορές δεν διαφέρουν σημαντικά ως προς το μέγεθος του κελιού, τη χημική σύσταση και τη σχετική πυκνότητα .

Εννέα διαδικασίες-διαδρομές έχουν αναπτυχθεί για την παραγωγή μεταλλικών αφρών.

1. Διοχέτευσης αερίου μέσα σε λιωμένο Al - SiC ή Al - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> κράματα . [ Al , Mg ]
2. Με την ανάδευση ενός παράγοντα αφρισμού (τυπικά TiH<sub>2</sub> ) σε ένα τηγμένο κράμα (τυπικά σε ένα κράμα αλουμινίου) και ελέγχεται η πίεση ενώ ταυτόχρονα ψύχεται.
3. Ενοποίηση των μετάλλων σε σκόνη ( κράματα αλουμινίου είναι η πιο κοινή ) με έναν παράγοντα αφρισμού σωματιδίων (TiH<sub>2</sub> πάλι ) που ακολουθείται από θέρμανση. Σε αυτή την ευαίσθητη κατάσταση ο παράγοντας αφοροποίησης διασπάται και εκλύεται αέριο υδρογόνου διογκώνοντας το υλικό . [Al, Zn, Fe, Pb, Au]
4. Κατασκευή ενός κεραμικού καλουπιού από ένα πρόδρομο κερί ή πολυμερές αφρού, ακολουθεί καύση του προδρόμου και μέσω πίεσης γίνεται διήθηση λιωμένου μετάλλου ή μεταλλικής σκόνης, τα οποία στη συνέχεια συντήκονται . [Al, Mg, Ni- Cr, ανοξείδωτος χάλυβας, Cu ]
5. Η εναπόθεση ατμών ή ηλεκτροαπόθεση μετάλλου σε ένα πολυμερές πρόδρομο αφρού ο οποίος στη συνέχεια καίγεται , αφήνοντας κυτταρικές ακμές με κοίλους πυρήνες . [Ni, Ti]

6. Η παγίδευση από υψηλής πίεσης αδρανούς αερίου σε πόρους από σκόνη θερμοϊσοστατικής συμπίεσης (HiPing), ακολουθούμενη από την διαστολή του αερίου σε αυξημένη θερμοκρασία.[Ti]

7. Πυροσυσσωμάτωση κοίλων σφαιρών, δημιουργημένες μέσω μιας ατομικής τροποποιημένης διαδικασίας ή από οξείδιο μετάλλου ή υδρίδιο σφαίρες που ακολουθείται από αναγωγή ή dehydration, ή με εναπόθεση ατμού του μετάλλου πάνω σε σφαίρες πολυμερούς. [Ni, Co, Ni-Cr κράματα]

8. Συμπίεση μεταλλικής σκόνης με άλλα υλικά, τα οποία είναι ευδιάλυτα στο νερό. Στη συνέχεια ακολουθείται απόπλυση και μένει ο μεταλλικός αφρός [Al, με αλάτι όπως το εκπλύσιμων σκόνη]

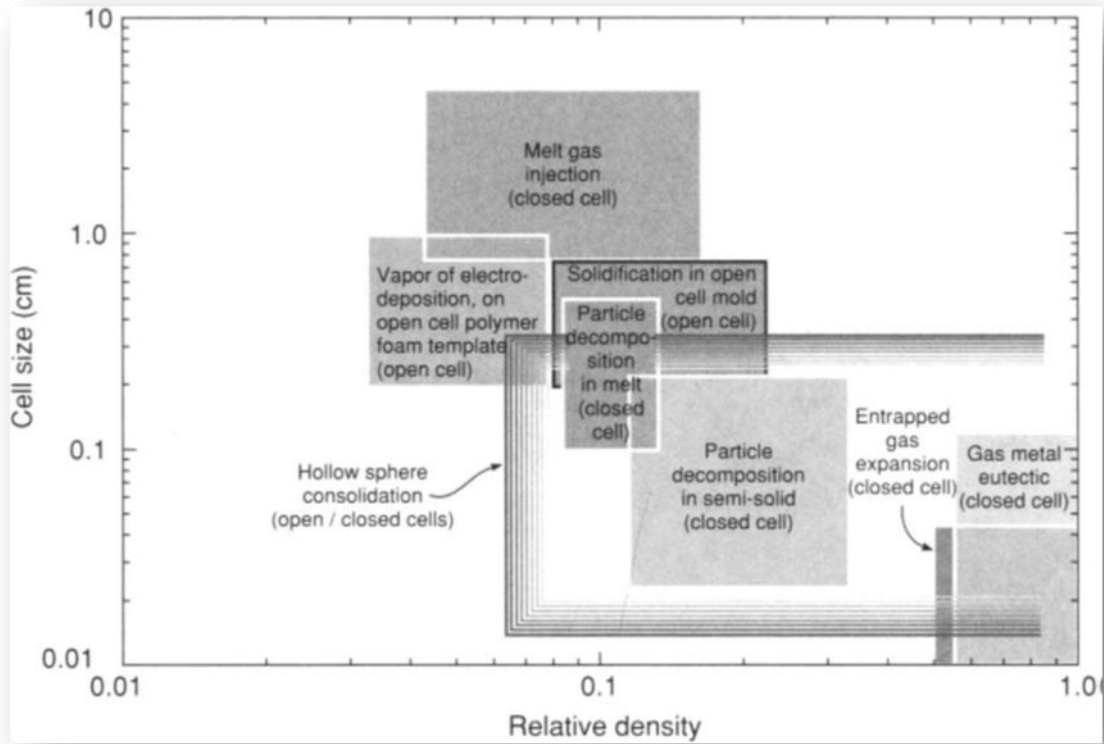
9. Διάλυση αερίου (συνήθως υδρογόνου) σε ένα υγρό μέταλλο υπό πίεση, επιτρέποντας να κυκλοφορήσει με ελεγχόμενο τρόπο κατά τη διάρκεια της μετέπειτα στερεοποίησης. [Cu, Ni, Al][5]

Μόνο οι πρώτες πέντε από αυτές τις διαδικασίες βρίσκονται σε εμπορική παραγωγή.

Κάθε μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ένα μικρό υποσύνολο των μετάλλων για να δημιουργήσει ένα πορώδες υλικό με ένα περιορισμένο φάσμα σχετικών πυκνοτήτων.

Στο παρακάτω σχήμα συνοψίζεται το εύρος του μεγέθους των κυττάρων, ο τύπος των κυττάρων (ανοικτός ή κλειστός), και οι σχετικές πυκνότητες που μπορούν να κατασκευάζονται με τις τρέχουσες μεθόδους.(σχ.3.1)[5]





σχ:3.1 Το εύρος του μεγέθους των κελιών και της σχετικής πυκνότητας για τις διάφορες μεθόδους παρασκευής μεταλλικών αφρών[5]

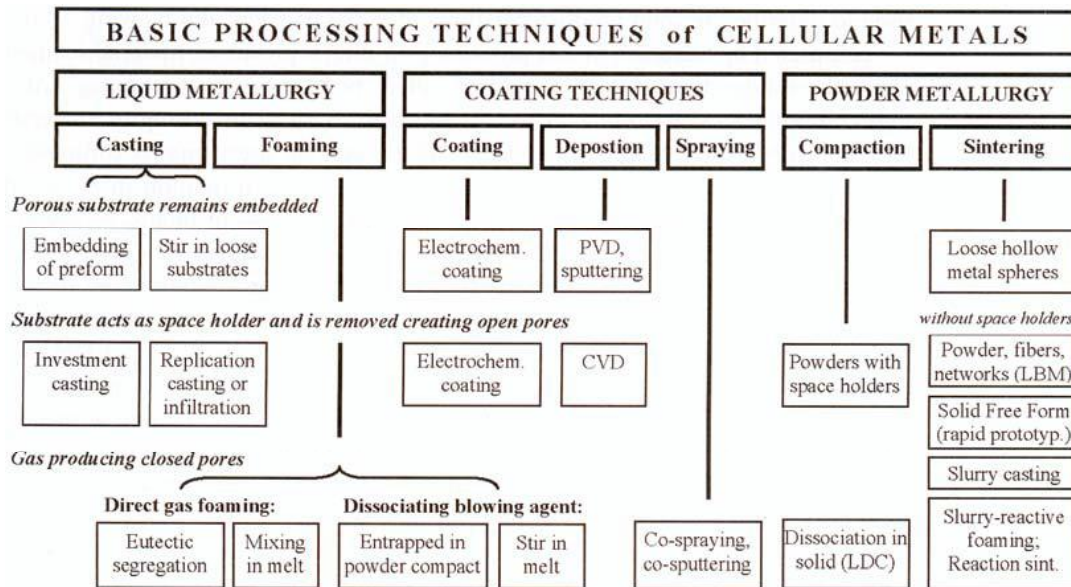


Figure 2-1. Processing techniques for cellular metals classified according to the state of the metal, the formation of the cellular architecture, and the pore-forming ingredients.

Σχ. 3.2 Τεχνικές παραγωγής για πορώδη μέταλλα, ταξινομημένες με βάση την φάση του μετάλλου, τη διαμόρφωση της αρχιτεκτονικής της κυψελίδας και τα στοιχεία δημιουργίας των πόρων.[2]

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχέδιο (σχ.3.2) τα κυψελοειδή μέταλλα ταξινομούνται με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

α)Την κατάσταση του μετάλλου κατά τη διάρκεια δημιουργίας του πορώδους: στερεό, υγρό, διάλυμα ή γαλάκτωμα.

β)Την διαδικασία μορφοποίησης που ακολουθείται: αφροποίηση(foaming),εναπόθεση ιζήματος(deposition), χύτευση σε καλούπι (casting), συμπύκνωση (sintering), με αρχικό διάλυμα (precursor slurry)

γ)Την μέθοδο δημιουργίας των πόρων: ενσωμάτωση κοίλων σωματιδίων, με μετακινούμενο υπόστρωμα, ή με αέριο(είτε απευθείας διαλυμένο, είτε μέσα από διάσπαση κάποιου στοιχείου)[2]

Παρακάτω δίνονται οι μέθοδοι παρασκευής.

### **3.1. Παραγωγή πορώδων μετάλλων από υγρό μέταλλο**

Αποτελεί μια από τις πιο βασικές μεθόδους παραγωγής μεταλλικών αφρών με χρήση υγρού μετάλλου.

#### **3.1.1 Απ' ευθείας αφροποίηση μετάλλων**

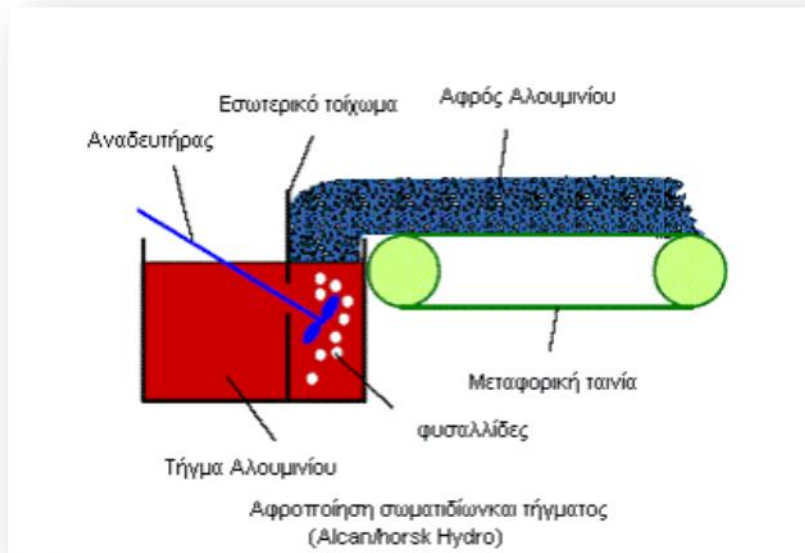
Αρκετές τεχνικές αναπτύχθηκαν στο παρελθόν για την παραγωγή μεταλλικών αφρών το τελικό προϊόν όμως δεν κατάφερε να βρει την πραγματική βιομηχανική εφαρμογή. Κατά τα τελευταία 10 χρόνια ένας νέος αριθμός εξελίξεων έλαβε χώρα ώστε σήμερα να είναι διαθέσιμες βελτιωμένες τεχνικές παραγωγής.

Σήμερα έχουν επικρατήσει δύο τεχνικές για απ' ευθείας αφροποίηση. Η πρώτη μέθοδος επιτυγχάνεται με εισαγωγή αερίου μέσα στο υγρό μέταλλο από μια εξωτερική πηγή φυσαλίδων ενώ η δεύτερη, με πρόσθεση στο υγρό ενός μέσου το οποίο διασπώμενο απελευθερώνει αέριο.[4]

Τα μεταλλικά τήγματα μπορούν να αφροποιηθούν απ' ευθείας κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες δημιουργώντας αέριες φυσαλίδες στο υγρό. Οι φυσαλίδες που βρίσκονται στο τήγμα τείνουν να ανέβουν στην επιφάνεια, λόγω των δυνάμεων άνωσης εξαιτίας της υψηλής πυκνότητας του υγρού.

Το γεγονός αυτό επιβραδύνεται με τη χρήση κεραμικών υλικών σε σκόνη, τα οποία αυξάνουν το ιζώδες του τήματος ή με τη χρήση κραματικών παραγόντων οι οποίοι σταθεροποιούν τα σωματίδια στο τήγμα.[4]

### 3.1.1.1 Αφροποίηση με εισαγωγή αερίου(Τεχνολογία παραγωγής Alcan/Norsk Hydro)



Σχ.3.3

Στο πιο πάνω σχήμα 3.3 φαίνεται η μέθοδος παραγωγής Alcan/ Norsk Hydro, η οποία εισάγει αέρια άμεσα στο υγρό μέταλλο.[1]

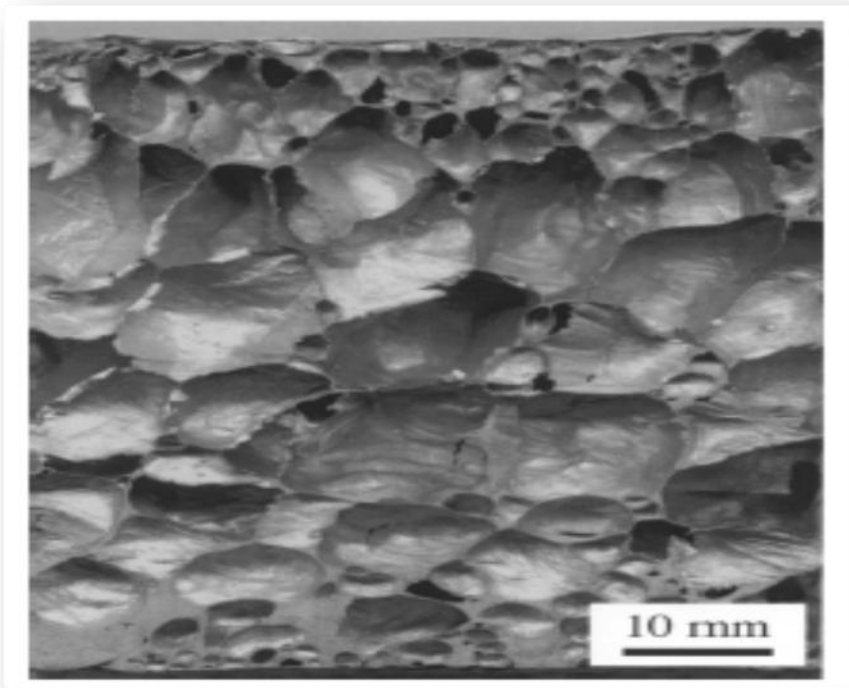
Σύμφωνα με την συγκεκριμένη μέθοδο σχ. 3.3, σωματίδια από καρβίδιο του πυριτίου ή οξείδιο του αλουμινίου ή μαγνησίου, χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν το ιξώδες του τήγματος. Στην περίπτωση αυτή το πρόβλημα μετατίθεται στον τρόπο εισαγωγής των σωματιδίων στο τήγμα και στην επίτευξη ομοιόμορφης κατανομής των σωματιδίων ενίσχυσης.

Στο δεύτερο βήμα γίνεται η αφροποίηση του τήγματος με εισαγωγή αερίου (αέρα, άζωτο, αργό), με χρήση ειδικών σχεδιασμένων περιστρεφόμενων αναδευτήρων ή ταλαντούμενων ακροφυσίων. Η χρησιμότητα των αναδευτήρων ή των ακροφυσίων είναι για την παραγωγή ομοιόμορφων φυσαλίδων στο τήγμα καθώς και για την ομοιόμορφη κατανομή τους.

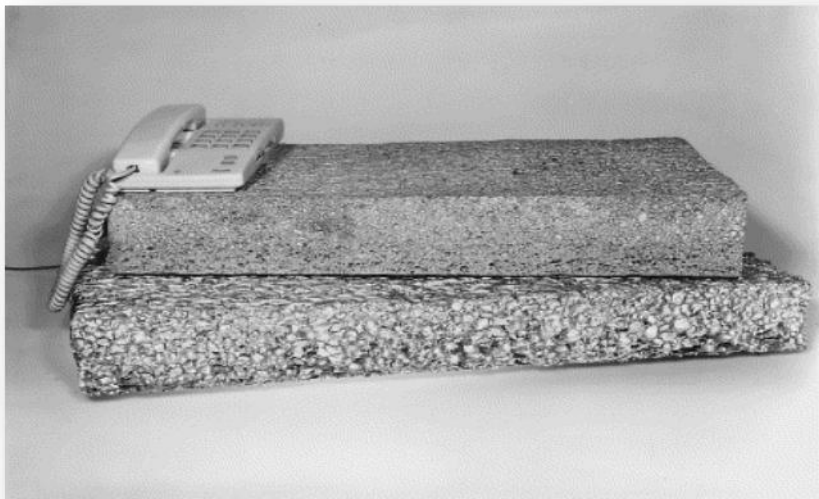
Το μέγεθος των φυσαλίδων μπορεί να ελεγχθεί ρυθμίζοντας τη ροή του αέρα, το σχεδιασμό του στροφείου (αριθμός και σχήμα ακροφυσίων), και την ταχύτητα περιστροφής του. Είναι απαραίτητη η χρήση κεραμικών σωματιδίων, τα οποία αυξάνουν την πυκνότητα του χυτού και παγιδεύουν τις ανερχόμενες φυσαλίδες.

Επίσης, σταθεροποιούν τα τοιχώματα των κυψελίδων και αποτρέπουν συνενώσεις κελιών. Ο μεταλλικός αφρός απομακρύνεται με μία ταινία μεταφοράς, όπου στερεοποιείται και κρύνει. Η σχετική πυκνότητα

ελέγχεται βασικά από παραμέτρους της διαδικασίας, όπως η ροή του αερίου, το ποσοστό των σωματιδίων και οι συνθήκες στερεοποίησης. Με τη διαδικασία αυτή παράγονται panels αφρού με ρυθμό 900kg/h, με 1,5m πλάτος και 25-150mm πάχος. Έχουν σχετική συχνότητα 2-20% (0.05-0.55 g/cm<sup>3</sup>). Ο μέσος όρος των διαστάσεων του κελιού είναι αντίστροφος με τη σχετική συχνότητα και είναι της τάξης 2,5-30mm.[4] Δύο τέτοια δείγματα αφρών φαίνονται στο παρακάτω σχ. 3.4,3.5



σχ.3.4 Πλάκες αφρού με διαφορετικό πορώδες

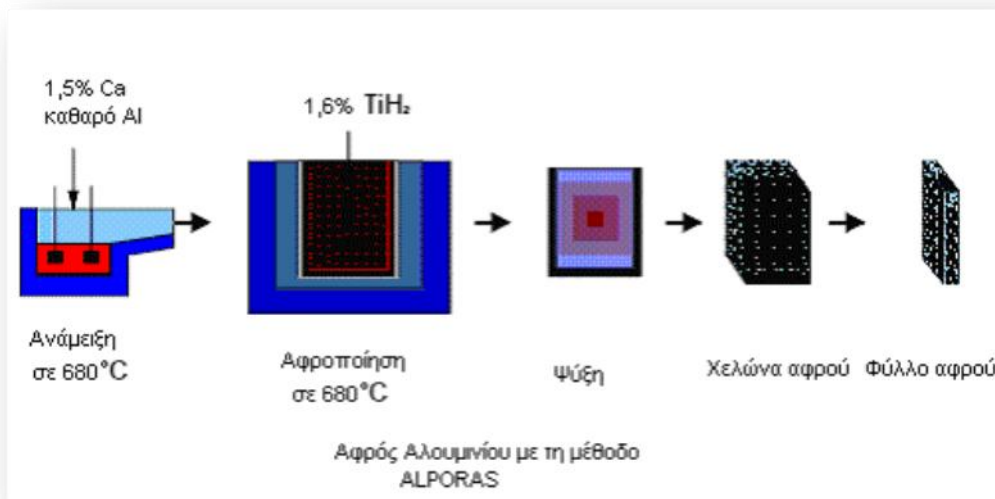


σχ.3.5 Τομή αφρού αλουμινίου[4]

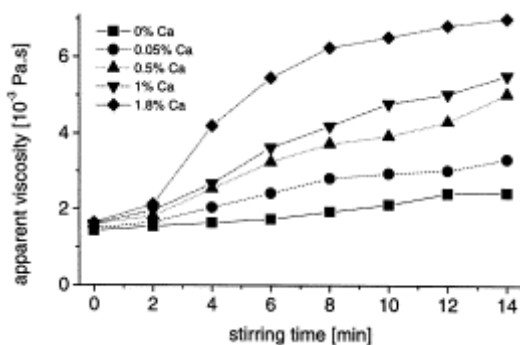
Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι το χαμηλό κόστος των αρχικών υλικών και της διεργασίας, επίσης η δυνατότητα παραγωγής μεγάλου αριθμού κομματιών και ελέγχου της σχετικής πυκνότητας.

Η συγκεκριμένη μέθοδος όμως αντιμετωπίζει δυσκολία στην κατεργασία εξαιτίας ύπαρξης του SiC , προβλήματα καθίζησης του μετάλλου και συχνά δημιουργείται ένας σχετικά μικρός αριθμός μεγάλων φυσαλίδων, που οδηγεί σε μάλλον άτεχνη και μη κανονική κατανομή πόρων. [4]

### 3.1.1.2 Αφροποίηση με μέσα που δημιουργούν φυσαλίδες (Alporas)



Σχ.3.6 Αφροποίηση με εσωτερική δημιουργία αερίου[1]



Σχ 3.7 Επίδραση του χρόνου ανάδευσης στην πυκνότητα του τήγματος αλουμινίου μετά την προσθήκη ασβεστίου.[4]

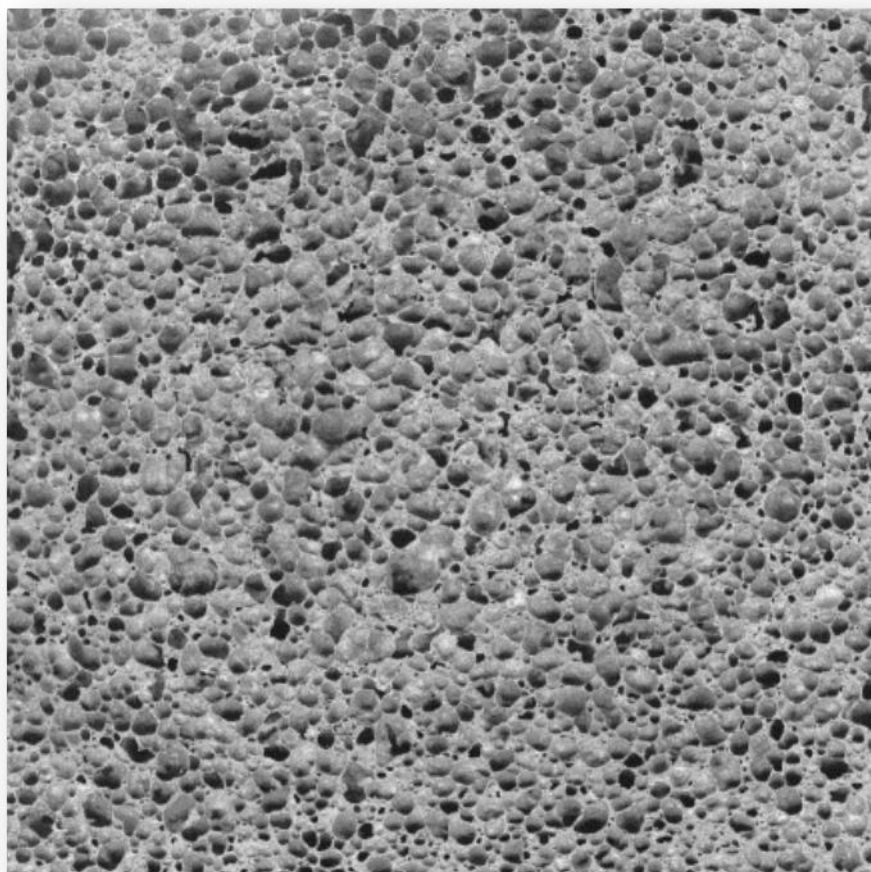
Η διαδικασία αυτή έχει αναπτυχθεί από την ομώνυμη εταιρία Shinko Wire Co Ltd (Osaka Japan) γνωστή ως μέθοδος Alporas.[1]

Ο σχεδιασμός είναι για παραγωγή μεγάλων μπλοκ αφρού.

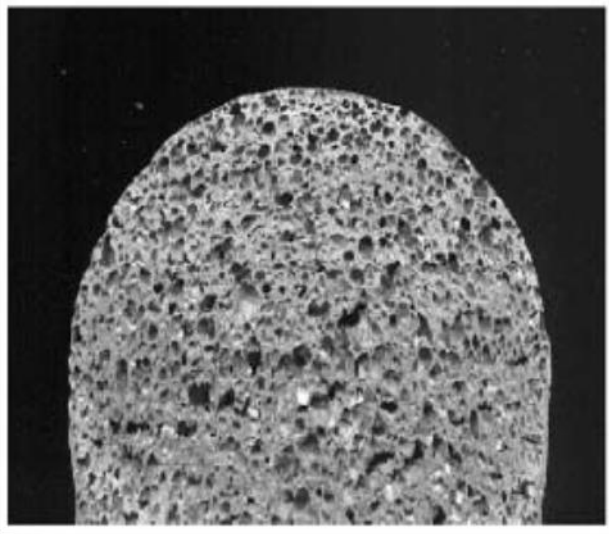
Για ρύθμιση του ιξώδους του λιωμένου Al προστίθεται 1,5% Ca στους 680<sup>0</sup>C και ανακατεύεται για πάνω από 5 λεπτά.

Μετά προσθέτουμε ένα στοιχείο που περιέχει O<sub>2</sub> για να διευκολυνθεί η οξείδωση και να αυξηθεί το ιξώδες με παραγωγή οξειδίων: CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaAlO<sub>4</sub>. Το διογκωμένο Al μεταφέρεται σε ένα καλούπι, προστίθεται 1,6% TiH<sub>2</sub> και αναδεύεται έντονα. Το TiH<sub>2</sub> διασπάται και οι φυσαλίδες H<sub>2</sub> διαστέλλουν το χυτό και γεμίζει το καλούπι. Το τελικό τεμάχιο με 2050mm μήκος, 650mm ύψος και 450mm πλάτος κόβεται σε πλάκες. Πευχαίνονται πυκνότητες 0.18-0.24 g/cm<sup>3</sup> και το μέσο μέγεθος του κελιού είναι 4,5mm.[4]

Έχει αποδειχθεί ότι προσεκτικές ρυθμίσεις στις παραμέτρους της διαδικασίας οδηγούν σε πολύ ομογενείς αφρούς. Στην πραγματικότητα οι αφροί που παράγονται με την διαδικασία αυτή –με το εμπορικό όνομα “Alporas”- φαίνεται να είναι οι πιο ομογενής αφροί που έχουν παρασκευαστεί. Τέτοιου είδους μορφολογία φαίνεται στο σχήμα 3.8[4]



Σχ. 3.8 Δομή των πόρων αφρού αλουμινίου από την προσθήκη TiH<sub>2</sub>.  
(πηγή: Southeast University Nanjing, China).[4]



*Σχ 3.9 Δοκίμιο μεταλλικού αφρού υδριδίου με τη μέθοδο παρασκευής αφρών τύπου Alporas TM*

Οι αντιπροσωπευτικές τιμές πυκνότητας που προκύπτουν με την παραπάνω διαδικασία είναι μεταξύ 0.18 και 0.24 g/m<sup>3</sup> και μέσο όρο διάμετρο πόρων από 2 μέχρι 10mm. Οι αφροί τύπου Alporas TM είναι πιο ακριβοί από τους αφρούς με ενισχυτική φάση.

Στην παραπάνω διαδικασία, αντί να χρησιμοποιηθεί ασβέστιο για την αύξηση του ιξώδους του τήγματος του αλουμινίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αλουμίνα σε σκόνη, καρβίδιο του πυριτίου, οξείδια του αλουμινίου.

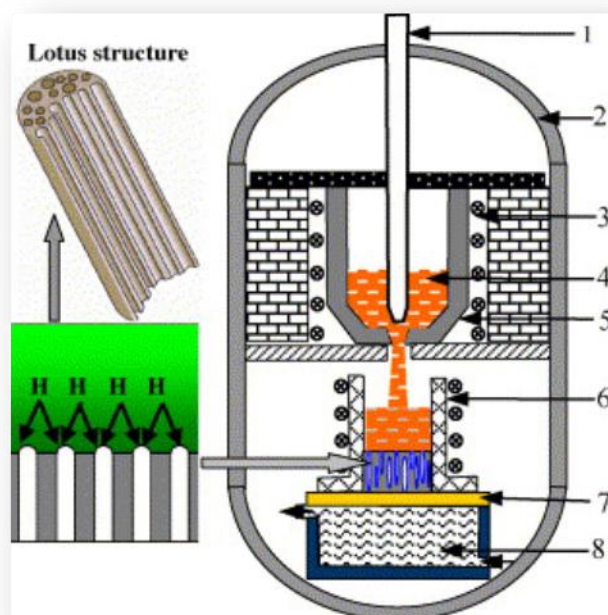
Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι απλότητα της μεθόδου, κατασκευή πολύπλοκων σχημάτων και ιδιαίτερα ομοιογενής δομή.

Τα μειονεκτήματα είναι υψηλό κόστος, δυσκολία στον έλεγχο της πυκνότητας και του μεγέθους των πόρων και εισαγωγή ξένων στοιχείων, όπως ΑσβέστιοCa και Τιτάνιο Ti



### 3.1.2 Ευτηκτική στερεοποίηση στερεού- αερίου (“gasars”).

Η διαδικασία GASAR βασίζεται στην σχέση της διαλυτότητας του υδρογόνου με την πίεση.



**Σχήμα 3.10** Απεικόνιση της διαδικασίας ανάπτυξης αφρού gasar (lotus-type):(1) πόμα από γραφίτη (2) δοχείο υψηλής πίεσης (3) ηλεκτρική αντίσταση (4) υγρόμέταλλο (5) κάμιнос τήξης (6) κεραμικός τύπος(7) πλάκα ψύξεως χαλκού (8) νερό ψύξεως

Η μέθοδος αυτή στηρίχθηκε στην παρατήρηση ότι μερικά υγρά μέταλλα σχηματίζουν ευτηκτικά συστήματα με υδρογονωμένο αέριο.

Τήκοντας ένα από αυτά τα μέταλλα σε υδρογονωμένη ατμόσφαιρα, υπό υψηλή πίεση ( πάνω από 50 atm) ,λαμβάνουμε ένα ομοιογενές τήγμα που γεμίζει με υδρογόνο.

Εάν τότε χαμηλώσουμε τη θερμοκρασία το τήγμα τελικά υφίσταται μια μετάβαση σε ετερογενές διφασικό σύστημα «στερεό + αέριο».

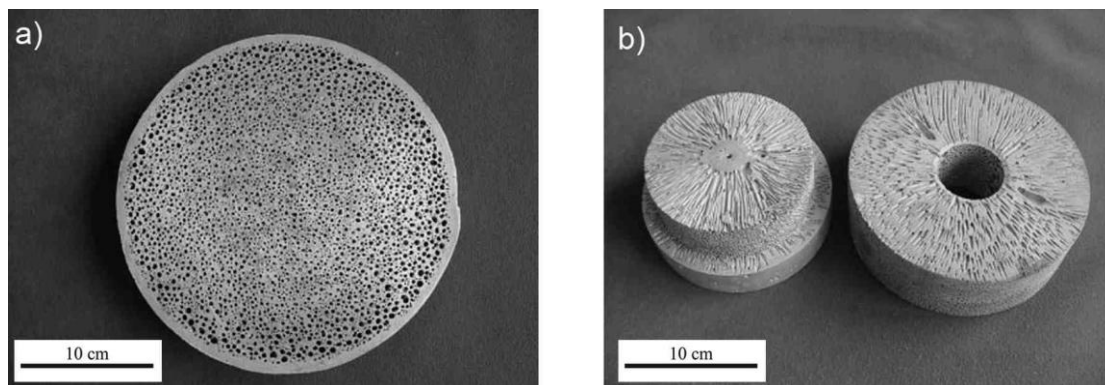
Ψύχοντας το τήγμα προκαλείται κατευθυνόμενη στερεοποίηση, το υδρογόνο κοντά στην περιοχή της στερεοποίησης αυξάνεται και σχηματίζονται οι φυσαλίδες.

Οι παράμετροι της διαδικασίας πρέπει να επιλεγούν με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε οι φυσαλίδες να μην μεταφερθούν στην υγρή περιοχή και στη συνέχεια ξεφύγουν αλλά να είναι κοντά στη ζώνη στερεοποίησης και να παγιδευτούν στο στερεό.

Η μορφολογία των πόρων εξαρτάται από το περιεχόμενο υδρογόνο, την εξωτερική πίεση, την κατεύθυνση και τον ρυθμό απομάκρυνσης της θερμότητας και τη χημική σύσταση του τήγματος.

Γενικά ο προσανατολισμός των πόρων εξαρτάται από την στερεοποίηση που εφαρμόζεται.

Η διάμετρος των πόρων κυμαίνεται από 10μm μέχρι 10 mm, το μήκος των πόρων από 100 μm έως 300 μm.[4,5]

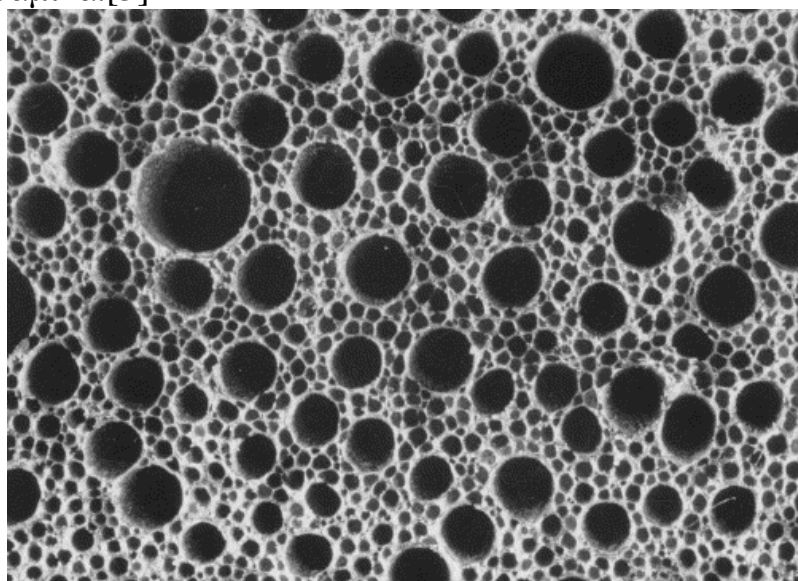


*Αφροί Μαγνησίου με τη μέθοδο Gasar α) αξονικοί και β) ακτινικά ευθυγραμμισμένοι πόροι (Materials and Electrochemical research corp Arizon and Wiley[3])*

Η μορφολογία των πόρων εξαρτάται από την μερική πίεση του αερίου πάνω από το τήγμα, την κατεύθυνση και τον ρυθμό απομάκρυνσης της θερμότητας και τη χημική σύσταση του τήγματος.

Ο προσανατολισμός των πόρων μπορεί να είναι ακτινικός, αξονικός ή συνδυασμός τους και εξαρτάται από την διαδικασία στερεοποίησης που εφαρμόζεται

Η τεχνική gasars έχει εφαρμογή στο νικέλιο, στον χαλκό, στο αλουμίνιο και στο μαγνήσιο . Εκτός από αυτά τα μέταλλα, έχει επίσης εφαρμογή και σε μια ποικιλία μετάλλων, κοβαλτίου, χρωμίου, μολυβδαίνιου ακόμη και σε κεραμικά.[3]



*Δομή των πόρων αφρού "gasar"*

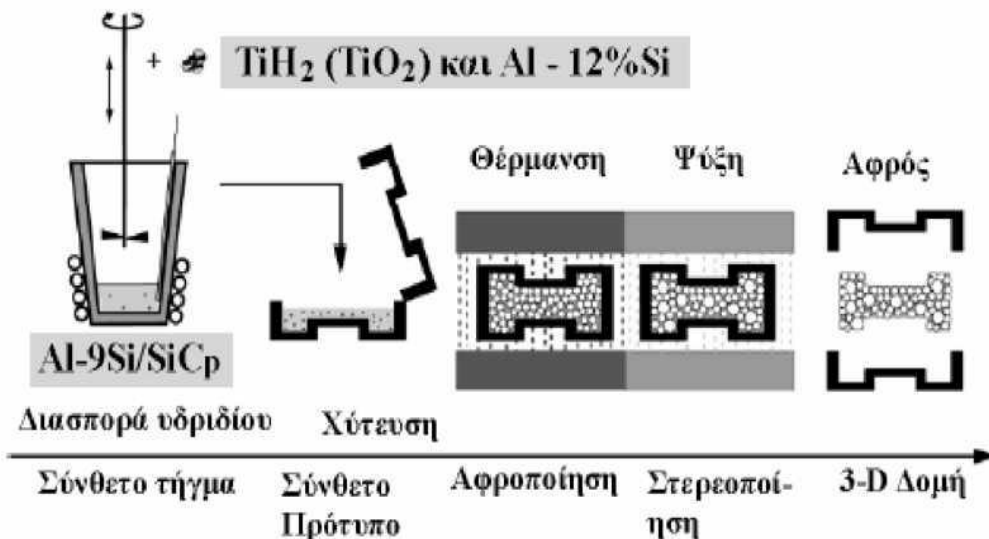
### 3.2 Τήξη απο σκόνη μετάλλου

Αφροποίηση των μετάλλων μπορούμε επίσης να επιτύχουμε με τήξη από σκόνες όπου θα περιέχεται ένα μέσο το οποίο διασπώμενο θα απελευθερώσει αέριο.

Μεταξύ των σπουδαιότερων μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί στην κατηγορία αυτή είναι, μια τεχνική συμπίεσης των κόκκων που έχει παρουσιασθεί από το πανεπιστήμιο του Fraunhofer της Βέρμης στη Γερμανία καθώς και μια παραλλαγή της μεθόδου αυτής, η οποία ονομάζεται μέθοδος Formgrip ή αλλιώς ετεροχρονισμένη αφροποίηση προτύπων σε μήτρες.[6]

Οι συγκεκριμένες μέθοδοι περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

#### 3.2.1. Διαδικασία FORMGRIP



*Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου FORMGRIP για βιομηχανική παραγωγή αφρού τρισδιάστατης μορφής σχ.3.11[6]*

Η μέθοδος FORMGRIP (Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors) συνδυάζει μερικά από τα πλεονεκτήματα των προηγούμενων μεθόδων (melt, powder route).

Η τεχνική αυτή προβλέπει την ανάμιξη της σκόνης υβριδίου του μετάλλου με σκόνη αλουμινίου και τη θέρμανση της για ορισμένο χρονικό διάστημα. Η θερμική αυτή διεργασία προκαλεί το σχηματισμό οξειδίου γύρω από τους κόκκους του υβριδίου. Η παρουσία του οξειδίου αυτού καθυστερεί την άμεση έκλυση του υδρογόνου όταν η σκόνη

εισαχθεί στο τηγμένο μέταλλο. Έτσι δίνεται η δυνατότητα να ναμιχθεί η σκόνη ομοιόμορφα στην μάζα του μετάλλου.

Μετά τη χύτευση σε κατάλληλα διαμορφωμένο καλούπι από γραφίτη, ακολουθεί επαναθέρμανση και έκλυση υδρογόνου, αφροποίηση και σταθεροποίηση της δομής μέσω ελεγχόμενης ψύξης. Η όλη διαδικασία φαίνεται παραστατικά στο σχ. 3.11[6]

Βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την καθυστέρηση της διάσπασης υδρογόνου αποτελούν, το βάθος της ζώνης διάχυσης του οξειδίου του μετάλλου ( $TiO_2$ ), η συγκέντρωση υδρογόνου στη σκόνη, η αρχική θερμοκρασία τήξης και ο ρυθμός ψύξης του προτύπου. Η παρουσία αλουμινίου στη φάση οξειδωσίας της σκόνης δεν είναι απαραίτητη, αν και διευκολύνει το σχηματισμό  $TiO_2$ . Καθοριστικό όμως ρόλο στην προεργασία αυτή παίζει η θερμοκρασία και η χρονική διάρκεια.

Έχει διαπιστωθεί ότι η βέλτιστη θερμική επεξεργασία της σκόνης πρέπει να περιλαμβάνει δύο στάδια.

Στο πρώτο στάδιο, η θερμοκρασία διατηρείται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα ( $400^{\circ}C$ ) για να αποφευχθεί η διάσπαση του υδριδίου.

Η χρονική διάρκεια αυτού του σταδίου αγγίζει τις 24 ώρες έτσι ώστε να σχηματιστεί ένα πρώτο στρώμα οξειδίου.

Επειδή το πάχος του στρώματος αυτού είναι σχετικά μικρό ακολουθεί και δεύτερο στάδιο θέρμανσης σε υψηλότερη θερμοκρασία ( $500-530^{\circ}C$ ). Το στάδιο αυτό διαρκεί λιγότερο (1 - 3 ώρες περίπου) αλλά ευνοεί το σχηματισμό μεγαλύτερου στρώματος οξειδίου, έτσι ώστε να αντέχει στην υψηλή θερμοκρασία του λιωμένου μετάλλου. Ωστόσο ένα μικρό ποσοστό υδρογόνου πάντα εκλύεται κατά το στάδιο της επεξεργασίας της σκόνης.

Η τελική μορφή της δομής του μεταλλικού αφρού είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης τριών μηχανισμών : της πυρηνοποίησης των πόρων, της ανάπτυξής τους, με την απελευθέρωση υδρογόνου και της αναδιάταξής τους με το μέταλλο κατά τη φάση διαστολής του αφρού.

Επιπλέον οι μηχανισμοί αυτοί καθορίζονται άμεσα από τις εξής παραμέτρους: την περιεκτικότητα του μετάλλου σε κραματικές ενώσεις, την πορεία θέρμανσης σε σχέση με το χρόνο (θερμοκρασιακό προφίλ) και κυρίως από 1) το ρυθμό και την ποσότητα έκλυσης υδρογόνου 2) το ιξώδες του υγρού κράματος και 3) το κρίσιμο πάχος τοιχώματος κελιού σε θραύση.

Όπως εφαρμόζεται και στις μεθόδους άμεσης αφροποίησης τήγματος, έτσι και εδώ η αύξηση της τιμής του ιξώδους επιτυγχάνεται με προσθήκη κατάλληλων χημικών ενώσεων.

Συνήθως χρησιμοποιείται το καρβίδιο του πυριτίου  $SiC$ . Σκοπός αυτής της αύξησης του ιξώδους είναι ο περιορισμός του διαχωρισμού των σωματιδίων  $TiH_2$  από το σώμα του μετάλλου (καθίζηση) έτσι ώστε κατά την αφροποίηση να επιτευχθεί ομοιογενής δομή. Επίσης το ιξώδες ρυθμίζει και το ρυθμό ανάπτυξης των πόρων μέσα στο καλούπι.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι : καλύτερος έλεγχος της διεργασίας αφροποίησης, δυνατότητα δημιουργίας τρισδιάστατων σχημάτων και καλής ποιότητας πορώδους. Ενώ τα μειονεκτήματα : Η προσθήκη ξένων ουσιών στο τελικό προϊόν( $SiC,Ti$ ), μεγάλη χρονική

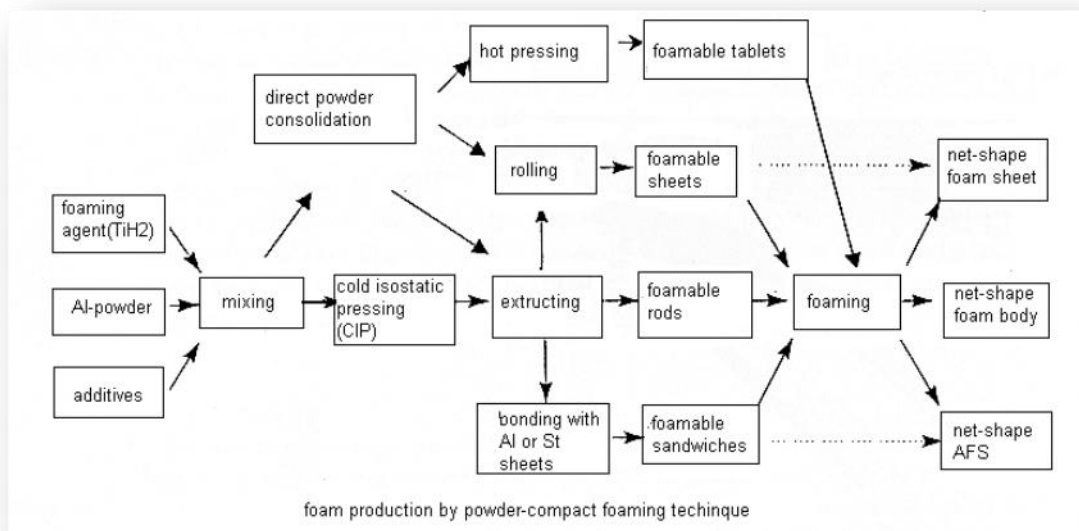
διάρκεια του σταδίου προπαρασκευής και ύπαρξη πολλών σταδίων επεξεργασίας[6]

### 3.2.2 Τεχνική συμπίεσης τήγματος κόνεων

Τα αφρώδη μέταλλα μπορούν να παραχθούν με μια μέθοδο που αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Fraunhofer της Βέρμης στη Γερμανία. Αν και η ιδέα της παρασκευής είναι σχετικά παλαιά, τα τελευταία μόλις χρόνια αναπτύχθηκε η μεθοδολογία που να κατασκευάζει αφρούς με σταθερή ποιότητα.

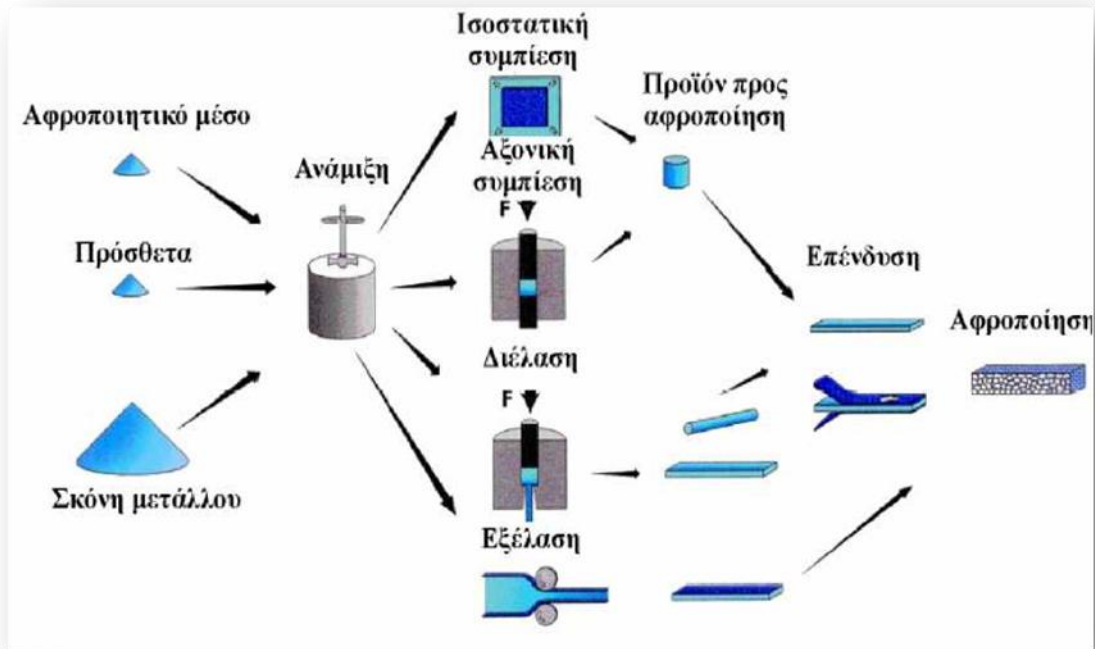
Η μέθοδος αυτή ονομάζεται και μεταλλουργία κόνεων, επειδή οι πρώτες ύλες είναι μεταλλικές σκόρες, αν και η αεροποίηση συντελείται στην υγρή κατάσταση. Σχ.3.12

### Κονιομεταλλουργία



Σχ. 3.12 Παραγωγή αφρού με κονιομεταλλουργία[2]

### Διαστολή με ένα αέριο που εκλύεται από έναν αφριστικό παράγοντα (IF AM, MEPURA)

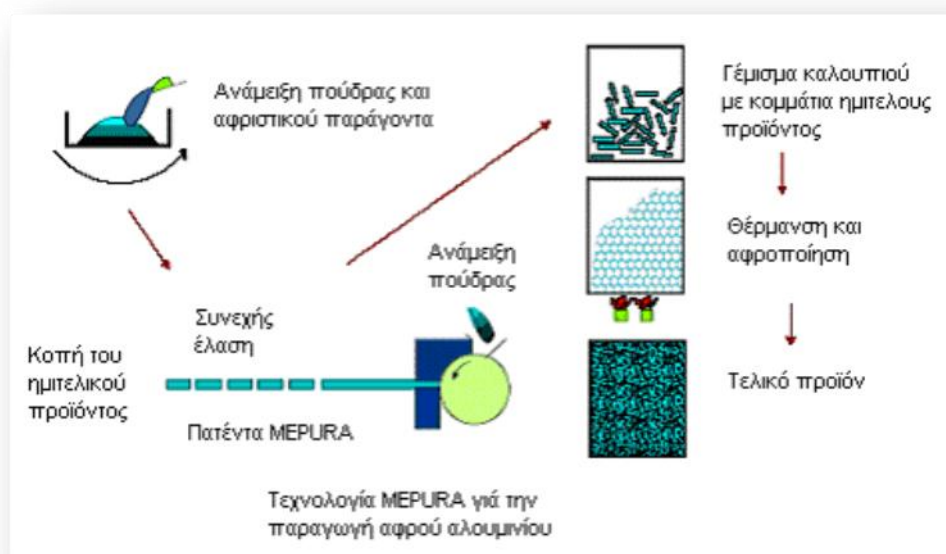


Σχ 3.13 Διαδικασία παραγωγής συμπίεσης τήγματος κόνεων[1]

Η μέθοδος αυτή (IF AM) στηρίζεται στη χρήση αφριστικού παράγοντα , σύμφωνα με το σχ. 3.13 και την μίξη μιας μεταλλικής σκόνης. Συνήθως χρησιμοποιούμε κράματα (για την κατασκευή των αφρών) Al-Cu, Al-Mg-Si, AlSi7 , AlSi12. Τα τελευταία τελευταία έχουν εξαιρετική αφριστικότητα λόγω του χαμηλού σημείου τήξης και των εξαιρετικών ιδιοτήτων αφροποίησης. Το μείγμα αυτό συμπιέζεται σε ένα ημιτελικό προϊόν. Στη διαδικασία-IF AM το υλικό συμπιέζεται με μονοαξονική συμπίεση, χρησιμοποιώντας έλαση ή διέλαση ανάλογα με το απαιτούμενο σχήμα. Η διαδικασία MEPURA χρησιμοποιεί μια τεχνολογία συνεχούς διέλασης για την συμπίεση του μίγματος. Το επόμενο βήμα είναι μια θερμική κατεργασία κοντά στο σημείο τήξης της μεταλλικής μήτρας και πάνω από την θερμοκρασία αποσύνθεσης του αφριστικού παράγοντα. Σε αυτή την θερμοκρασία ο παράγοντας αφροποίησης αποσυντίθεται και εκλύει αέριο υδρογόνο. Το αέριο οδηγεί στην διόγκωση του υλικού με αποτέλεσμα μια δομή με υψηλό πορώδες και κλειστούς πόρους. Η διαδικασία της αφροποίησης σταματάει με ψύξη αρκετά κάτω από το σημείο τήξης. Το πορώδες κυμαίνεται από 60% έως 85%.

Η ποιότητα του τελικού αφρού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες π.χ. συνθήκες συμπίεσης (τεχνολογία, βαθμός παραμόρφωσης, θερμοκρασία, πίεση, χρόνος), ποιότητα της πούδρας (τύπος και μέγεθος κόκκων, κράμα, συνθήκες μίξης), παράμετροι αεροποίησης (θερμοκρασία, ρυθμός θέρμανσης, χρόνο ψύξης, ατμόσφαιρα) και την γεωμετρία του ημιτελούς προϊόντος. Η πυκνότητα του αφρού ελέγχεται με την μεταβολή της περιεκτικότητας σε αφριστικό παράγοντα, της θερμοκρασίας και του ρυθμού θέρμανσης.[1]

### 3.2.2.2 Παραγωγή αφρού αλουμινίου με την τεχνολογία MEPURA

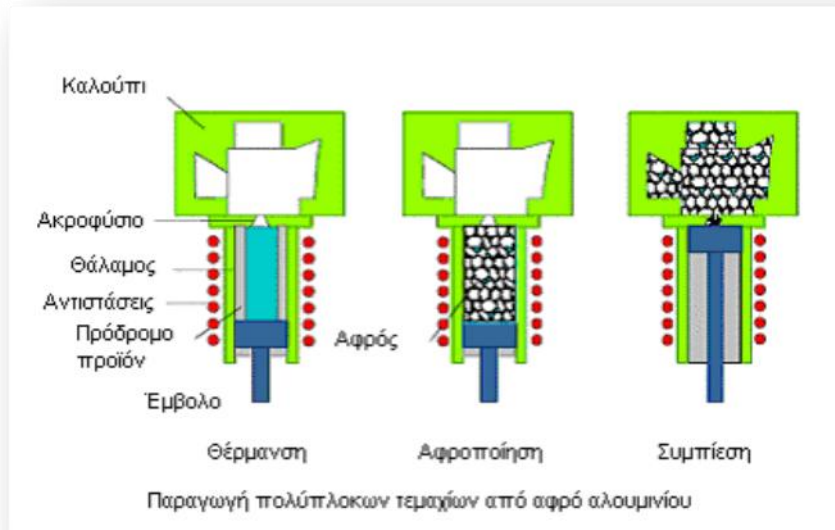


Σχ.3.14 Τεχνολογία MEPURA για την παραγωγή αφρού αλουμινίου[1]

Για να επιτύχουμε το επιθυμητό σχήμα του αφρού είναι απαραίτητο να εισάγουμε το πρόδρομο (ημιτελικό) υλικό μέσα σε ένα καλούπι. Διαφορετικά το αποτέλεσμα θα ήταν ένα κομμάτι μεταλλικού αφρού με ακαθόριστο σχήμα. Κάνοντας την αεροποίηση μέσα σε κλειστά καλούπια μπορούμε να πάρουμε σχεδόν όλα τα σχήματα. Κατά την διαδικασία της αεροποίησης μπορούν να ενωθούν κομμάτια αφρού με κομμάτια μετάλλου. Π.χ. μπορούμε να γεμίσουμε σωλήνες με αφρό αλουμινίου με διάφορους τρόπους.

### 3.2.2.3 Παραγωγή αφρού αλουμινίου με αρκετά πολύπλοκο σχήμα.



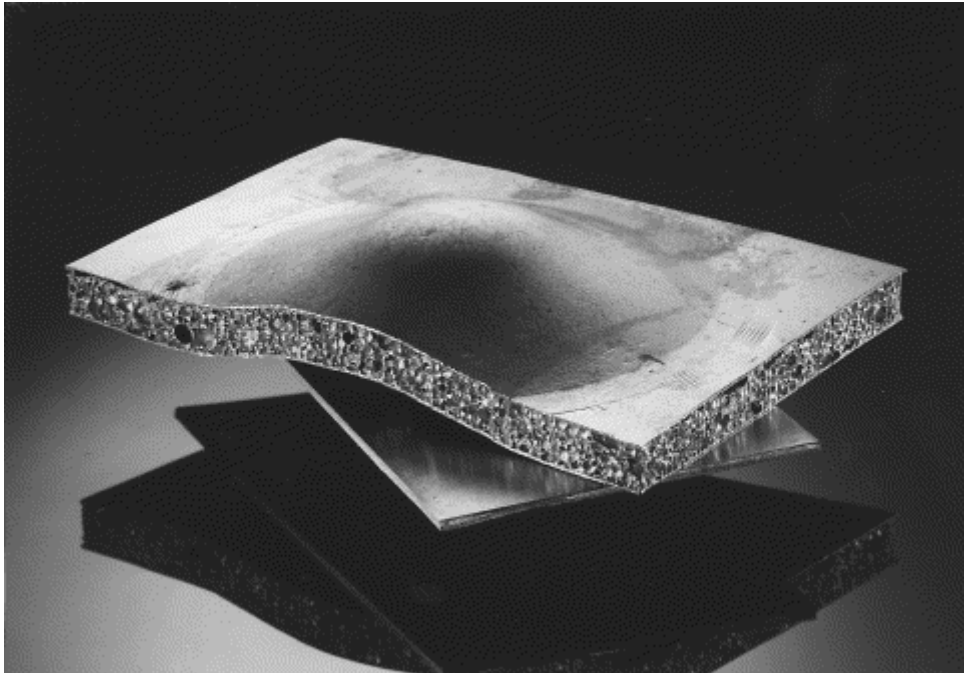


Σχ.3.16 -Κατασκευή αντικειμένου περίπλοκης γεωμετρίας από αφρό[1]

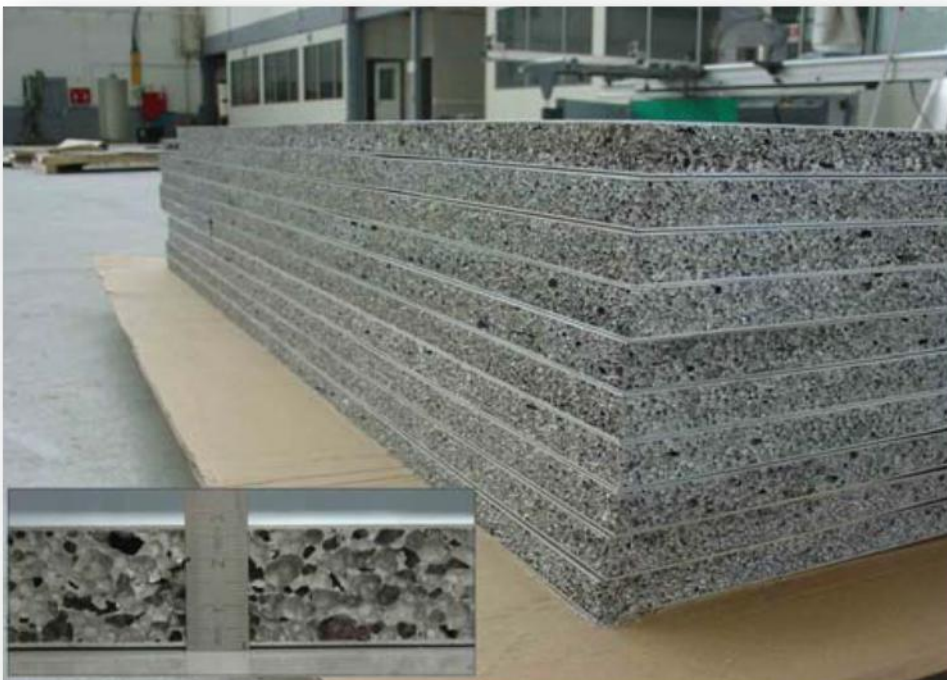
Αρκετά πολύπλοκα σχήματα μπορούν να παραχθούν αν εισάγουμε ένα διογκωμένο, υγρό αφρό σε ένα κατάλληλο καλούπι και κάνουμε εκεί τη τελική διόγκωση. Το πρώτο βήμα αυτής της τεχνολογίας μπορεί να συγκριθεί με αυτό της διαδικασίας MEPURA π.χ. μίξη πούδρας αλουμινίου με τον αφριστικό παράγοντα και συνεχής διέλαση σε ένα συμπαγές αφροποιημένο πρόδρομο υλικό. Μόνο που σε αυτή την περίπτωση το πρόδρομο υλικό θερμαίνεται σε ένα θάλαμο αφροποίησης έως το σημείο τήξης του κράματος. Αυτό οδηγεί στην δημιουργία υγρού αφρού, ο οποίος χυτεύεται με ένα ελεγχόμενο τρόπο σε ένα μεταλλικό καλούπι ή σε ένα καλούπι άμμου. Αυτό επιτρέπει την παραγωγή σε μεγάλη ή σε μικρή κλίμακα και την δημιουργία πρωτοτύπων σε ικανοποιητικό κόστος. Τέτοια κομμάτια αφρού μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν πυρήνες στην χύτευση υπό πίεση του αλουμινίου.[1]

Πάνελ τύπου sandwich μπορούν να κατασκευασθούν με τη μέθοδο αυτή ενώνοντας τον πυρήνα ο οποίος είναι ο μεταλλικός αφρός με δύο μεταλλικά φύλλα (αλουμινίου ή χάλυβα). Εναλλακτικά, εάν απαιτείται καθαρός μεταλλικός δεσμός, τα παραδοσιακά φύλλα μετάλλου-αλουμινίου ή χάλυβα - εξελάσσονται σε φύλλα του αφροποιημένου πρόδρομου υλικού. Το τελικό προϊόν μπορεί να πάρει επιθυμητές μορφές σε παραπέρα βήμα π.χ. βαθιά κοίλανση. Η τελική θερμική κατεργασία κατά την οποία μόνο ο αφρώδης μεταλλικός πυρήνας διαστέλλεται, χωρίς παραμόρφωση των εξωτερικών φύλλων, οδηγεί σε επιθυμητές διατομές όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικ.3.15 [4]





Εικ. 3.15 Πλαίσιο τύπου sandwich με πυρήνα από αφρό αλουμινίου (πάχους 12 mm) και δύο επιφανειακά φύλλα χάλυβα (πηγή: Fraunhofer and Studiengesellschaft Stahlanwendungen).



Εικ.3.16 Παραγωγή σάντουιτς αλουμινίου στην almGmbH, Saarbrücken (Courtesy: H.-W. Seeliger).

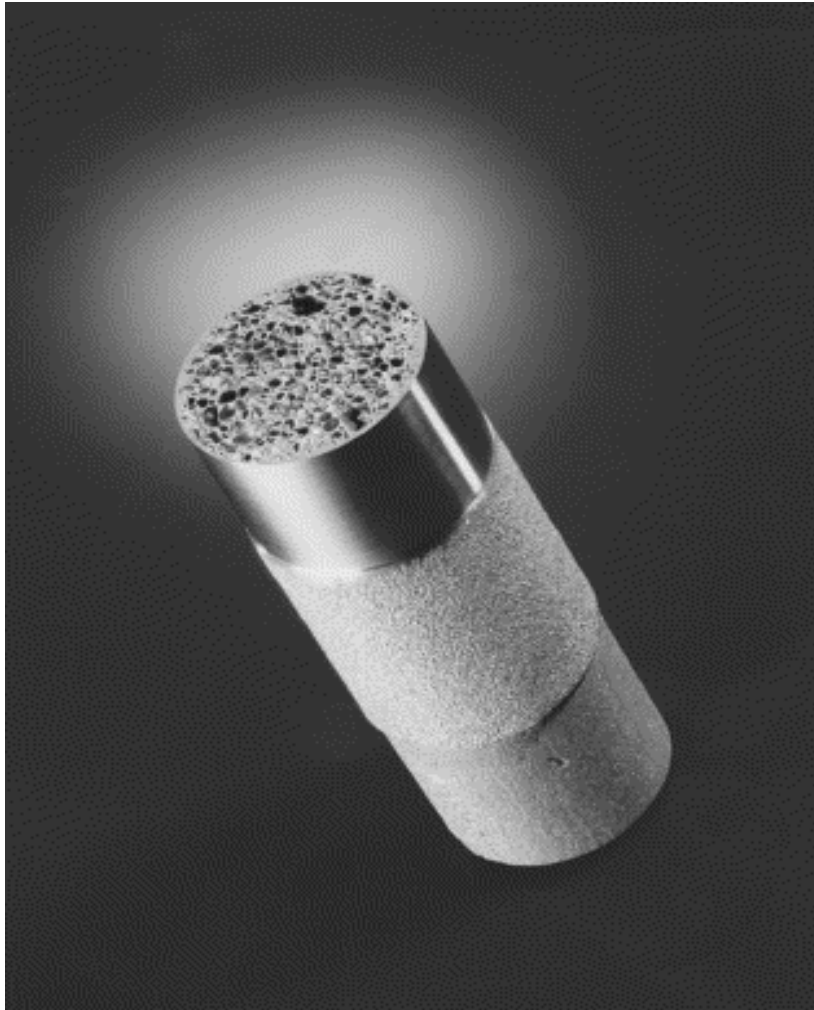
Κυλινδρικά ή οποιοσδήποτε μορφής σχήματα μπορούν να γεμίσουν με αφρό αλουμινίου με διάφορους τρόπους. Ο πιο εύκολος τρόπος είναι να

εισάγουμε με ένα βάκτρο το υπό αφροποίηση υλικό μέσα στο χώρο που θα αναπτυχθεί και στη συνέχεια να τα τοποθετήσουμε μέσα στο φούρνο. [4]. Το υπό αφροποίηση υλικό θα αρχίσει να διαστέλλεται και να συμπληρώσει το κενό χώρο που προβλέφθηκε. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι το υλικό που περιβάλλει τον μεταλλικό αφρό πρέπει να έχει σημείο τήξεως υψηλότερο του υλικού που αφροποιείται (π.χ. εάν αφροποιούμε αλουμίνιο θα πρέπει να έχουμε φύλλα από χάλυβα).[4]

Εναλλακτικά μπορούμε να εισάγουμε ένα αφροποιήσιμο κοίλο τμήμα προσαρτίζοντας το στο τμήμα που θα γεμίσει με αφρό, αντί να χρησιμοποιήσουμε βάκτρο. Τότε ο αφρός μπορεί να διασταλεί και να καταλάβει τον κενό χώρο (κατευθυνόμενος προς το κέντρο βάρους), προσδίδοντας μια σίγουρη μηχανική υποστήριξη κατά τη διάρκεια της αφροποίησης. Επίσης, η θερμική αγωγιμότητα μεταξύ του περιβλήματος και του αφρού προστατεύει το περίβλημα από την υπερθέρμανση κατά την διάρκεια της αφροποίησης.[4]

Τρίτη περίπτωση αποτελεί η μέθοδος κατά την οποία δύο σωλήνες προσαρμόζονται ομοαξονικά και αποτελούνται από υλικά που έχουν μεταξύ τους μεταλλουργική συνάφεια. Το υλικό του εσωτερικού σωλήνα θα αποτελέσει το παράγοντα αφροποίησης ενώ ο εξωτερικός σωλήνας αποτελείται από ένα κοινό κράμα αλουμινίου. Το επόμενο βήμα είναι το εσωτερικό υλικό θερμαινόμενο να διασταλεί και να κατευθυνθεί προς τη νοητή αξονομετρική γραμμή γεμίζοντας το χώρο.

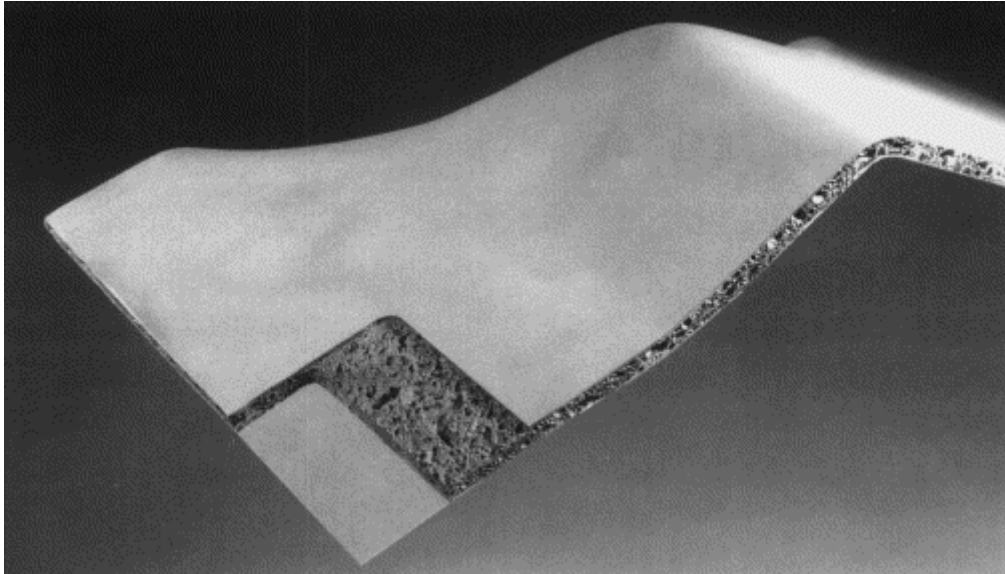
Άλλη μέθοδος είναι η παραγωγή αφρού αλουμινίου με πυκνό εξωτερικό περίβλημα, με θερμικό ψεκασμό αλουμινίου επάνω σε προμορφοποιημένο κορμό αφρού αλουμινίου, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.17[4]



*Εικ. 3.17 Αφρός αλουμινίου με επικάλυψη από αλουμίνιο (πηγή: Fraunhofer and RWTH Aachen, το μήκος του τεμαχίου είναι περίπου 60 mm ). Το κάτω μέρος του δείγματος είναι πριν από την επικάλυψη, το μεσαίο τμήμα μετά τον θερμικό ψεκασμό και το πάνω μέρος είναι η τελική μορφή.*

Τέλος αφροί από αλουμίνιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν πυρήνες στον παραδοσιακό τρόπο της χύτευσης (sand casting), κατά τον οποίο δημιουργούνται υλικά στα οποία ο μεταλλικός αφρός περικλείεται από το υλικό της χύτευσης .[4]

Ο αφρός αλουμινίου μπορεί να συνδυαστεί με επιφανειακά φύλλα από χάλυβα ή τιτάνιο. Πρόσφατα έχει ληφθεί μέριμνα να μην τήκονται τα επιφανειακά φύλλα κατά την διάρκεια της αφοροποίησης με την επιλογή κραμάτων με διαφορετικό σημείο τήξεως μεταξύ των υλικού αυτού και του πυρήνα. Τέτοιο είδος υλικού φαίνεται στην εικόνα 3.18.



*Εικ. 3.18 Αφρός αλουμινίου/αλουμινίου (aluminium/aluminium) τύπου sandwich που περιέχει  $TiH_2$  σαν παράγοντα δημιουργίας φυσαλίδων (πηγή: Karmann and Fraunhofer). Το πάχος είναι περίπου 10 mm.*

Με βιομηχανικό τρόπο μπορούν να κατασκευασθούν επίσης κεραμικά με μεταλλικό αφρό. Αφρός αλουμινίου (AlSi12) μπορεί να μεταφερθεί διαχυτικά σε ελάσματα αλουμινίου σε θερμοκρασία 500 οC με πίεση 100 kPa σε κενό. Άλλος τρόπος κατασκευής είναι αφρός αλουμινίου από κράμα 6061, ο οποίος τοποθετείται σε ελάσματα αλουμινίου με αυτόκαταλυτική μέθοδο και αφήνεται να διασταλείμεταξύ δύο κεραμικών επικαλύψεων προκαθορισμένης απόστασης.[4]

Τα περισσότερα κομμάτια των μεταλλικών αφρών μπορούν να κατασκευασθούν σε απλούς φούρνους που βρίσκουμε στο εμπόριο, στους οποίους υπάρχει σχετικά ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας. Για μεγάλη και συμφέρουσα όμως παρασκευή είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούμε συνεχείς φούρνους, στους οποίους το πρόδρομο υλικό που προορίζεται για αφροποίηση είναι σε κατάλληλα καλούπια ή σε προκαθορισμένη μορφή φύλλων χωρίς καλούπια, να μεταφέρεται διαμέσου διαφόρων ζωνών θερμότητας, όπου και θα αφροποιείται και τελικά θα ψύχεται.

Η παραπάνω μέθοδος μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας καλούπια που γεμίζουν και αδειάζουν αυτόματα. Έτσι με αυτό τον τρόπο μπορούμε να αποφύγουμε την ψύξη των καλουπιών στην επιθυμητή θερμοκρασία μετά από κάθε κύκλο αφροποίησης.

Το καλούπι μπορεί να χρησιμοποιείται μεταξύ της θερμοκρασίας αφροποίησης και στην ελάχιστη θερμοκρασία κατά την οποία ο αφρός

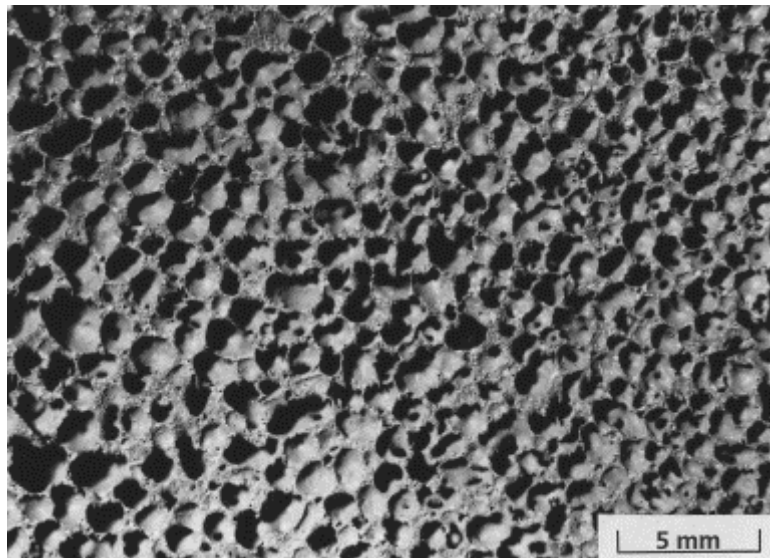
αρχίζει να γίνεται στερεό. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να εξοικονομήσουμε ενέργεια, να μειώσουμε δραματικά το χρόνο αφροποίησης ενός τεμαχίου και να ελαχιστοποιήσουμε το κόστος λειτουργίας του εργαστηρίου.[4]

### **Ψευδάργυρος (Zn)**

Ο ψευδάργυρος μπορεί να αφροποιηθεί με την τεχνική της κονιομεταλλουργίας. Οι διαδικασίες ανάμιξης και οι ιδιότητες της σκόνης είναι ανάλογες με αυτές του αλουμινίου. Μόνο η πίεση και η θερμοκρασία αφροποίησης πρέπει να επιλεγθούν σε πιο χαμηλά επίπεδα, καθώς η θερμοκρασία τήξης του Zinc είναι 419 0C. Ο συγκεκριμένος αφρός εμφανίζει πολύ ομοιόμορφη δομή.. [2]

### **Μόλυβδος (Pb)**

Ο μόλυβδος και τα κράματά του, όπως Pb-Sn και Pb-Sb αφροπιούνται με μια άλλη διαδικασία. Το  $TiH_2$  δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πηγή αερίου εξαιτίας της χαμηλής θερμοκρασία τήξης του καθαρού Pb (327 0C) και της ακόμη χαμηλότερης των κραμάτων του. Καλά αποτελέσματα επιτυγχάνονται με χρήση καρβιδίων του μόλυβδου.[2]εικ.3.19



*Εικ. 3.19 Τομή δείγματος αφρού μολύβδου*

## Τιτάνιο(Ti)

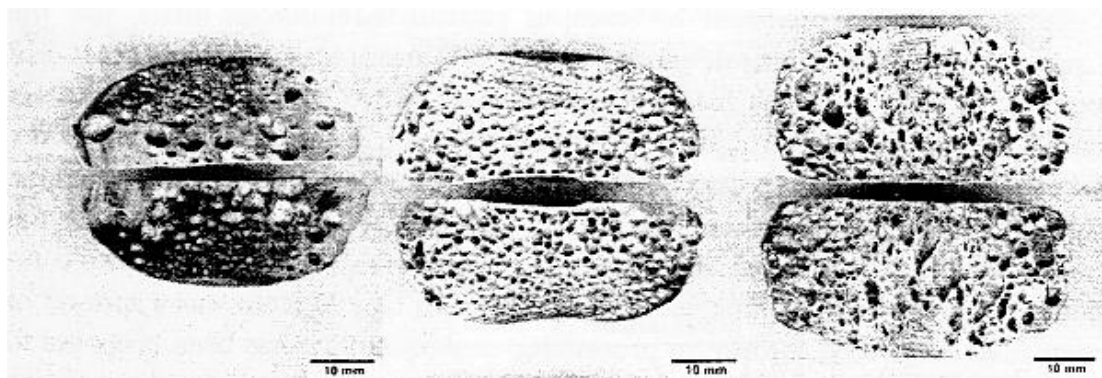
Εξαιτίας του υψηλού σημείου τήξης και της σχετικά χαμηλής πυκνότητας, το τιτάνιο και τα κράματά του είναι εξαιρετικά υλικά για ελαφριές κατασκευές σε υψηλές θερμοκρασίες και χρησιμοποιούνται ευρέως στην αεροναυπηγική. Οι αφροί του τιτανίου έχουν το θετικό του επιπλέον μειωμένου βάρους, ενώ είναι κατάλληλοι και για εφαρμογές όπου χρειάζεται ανοιχτών πόρων δομή.

Μια από τις πιο υποσχόμενες μεθόδους για παραγωγή ανοιχτών κυψελίδων δομής είναι η συμπύκνωση ενός πεπιεσμένου μίγματος σκόνης τιτανίου και σωματιδίων, τα οποία όταν απομακρυνθούν δημιουργούν κενό στη θέση που προϋπήρχαν.

## Χάλυβας (steel)

Μία από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται σε αυτή την κατηγορία είναι η Powder-Compact Foaming Technique. Προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή κατάλληλων στοιχείων που προκαλούν την αφροποίηση, στην ανάπτυξη κραμάτων ικανά για αυτήν τη διαδικασία, στην εκτίμηση των διαφόρων μεθόδων συμπίεσης και, τέλος, στην προσαρμογή της μεθόδου αφροποίησης. Καλές ιδιότητες έχει βρεθεί ότι έχουν μεταλλικά νιτρίδια και ανθρακικά άλατα.

Μια άλλη μέθοδος είναι η παραγωγή από μίγματα σκόνης-πληρωτικού υλικού. Αφού ετοιμαστεί το κατάλληλο μίγμα, συμπιέζεται, ενώ συχνά προστίθενται πρόσθετα υλικά για καλύτερη αντοχή. Προαιρετικά μπορεί να γίνει ξήρανση. Μετά, το πληρωτικό υλικό απομακρύνεται με θερμικές ή χημικές διαδικασίες. Τέλος, ακολουθεί συμπύκνωση (sintering). [2] Εικ. 3.20



Εικ 3.20 Αφροί βασισμένοι σε χάλυβα, με διαφορετικό ποσοστό  $SrCO_3$ , 0%-0.25%-0.5%

### 3.3 Μέθοδοι Χύτευσης

#### 3.3.1 Χύτευση δύο σταδίων με χρήση πολυμερικού προτύπου.

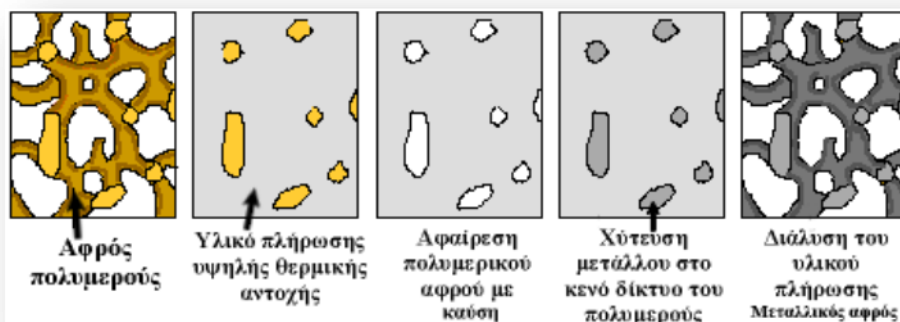
Μια νέα μέθοδος εφαρμόστηκε το 1968 από την εταιρεία ERG(Energy Research and Generation) με έδρα την Καλιφόρνια , με την ονομασία Duocel, σύμφωνα με την οποία μπορούμε να παρασκευάσουμε κυψελοειδή μέταλλα ανοιχτής δομής.

Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελείται από πέντε στάδια.

Στο πρώτο στάδιο έχουμε τη δημιουργία αφρού από πολυμερές , την μορφή του οποίου θα έχει το τελικό προϊόν.

Στο δεύτερο στάδιο χυτεύουμε ένα μίγμα κεραμικών υλικών , όπως ανθρακικό ασβέστιο ,φαινολική ρητίνη, μουλίτη ή απλά γύψο, στο κενό χώρο του αφρού το οποίο αποτελεί και το υλικό πλήρωσης.

Μετά τη στερεοποίηση του κεραμικού αφαιρείται ο πολυμερικός αφρός με θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία. Στο κενό χώρο που δημιουργείται με την καύση του πολυμερικού αφρού προστίθεται το μέταλλο με χύτευση. Το τελικό στάδιο περιλαμβάνει την απομάκρυνση του υλικού πλήρωσης με νερό υπό πίεση ή μηχανικά εικ. 3.21[7]



Εικ. 3.21 Παραγωγή κυψελοειδών μετάλλων με χύτευση με εσωτερική επένδυση πολυμερικού αφρού

Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στο τρόπο χύτευσης του μετάλλου, αλλά και στον τρόπο αφαίρεσης του υλικού πλήρωσης.

Η χύτευση περιλαμβάνει : την τήξη του μετάλλου σε πολύ υψηλή πίεση , ώστε να μειωθεί το ιζώδες, την εφαρμογή χύτευσης με υψηλή πίεση, την αναρρόφηση του μετάλλου με χρήση αντλίας κενού και την κατευθυνόμενη στερεοποίηση .

Εξασφαλίζεται έτσι, με την εφαρμογή των παραπάνω, η εισροή του υγρού μετάλλου σε όλο το δίκτυο του κενού χώρου που άφησε ο πολυμερικός αφρός μετά την απομάκρυνση του.

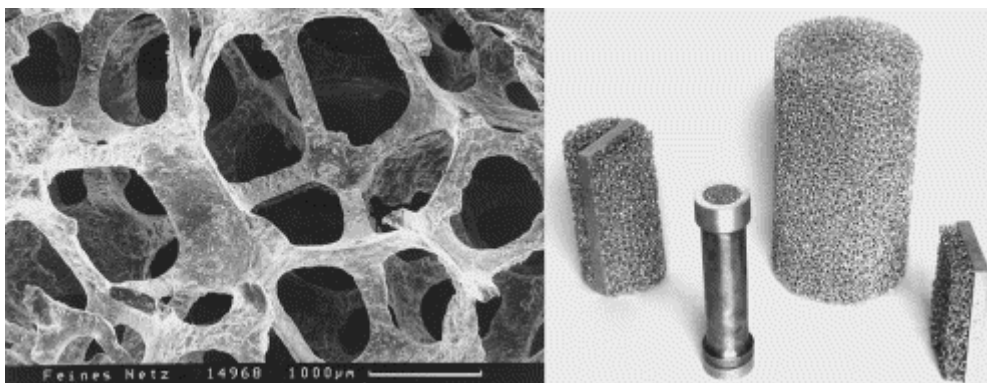


Το υλικό πληρώσεως πρέπει να αφαιρείται κατά τέτοιο τρόπο , ώστε να αποφεύγεται η θραύση των ιδιαίτερα λεπτών στελεχών του κυψελοειδούς μετάλλου και η καταστροφή της δομής του.

Η δομή των συγκεκριμένων αφρών είναι καθαρά κυψελοειδής και το κάθε κελί έχει μορφή δωδεκαέδρου ή δεκατετραέδρου. Επίσης χαρακτηρίζεται από ομοιογένεια και στιβαρότητα.[7]

Η παρακάτω εικόνα 3.21 δείχνει αριστερά μικρογραφία ενός τέτοιου αφρού που πωλείται από την ERG με την ονομασία Duocel. Διάφορες ποιότητες είναι διαθέσιμες και κυμαίνονται από 2,5 έως 16 πόρους ανά cm (10 έως 40 ppi). Οι τιμές βέβαια είναι αρκετά υψηλές.

Δεξιά φαίνονται μερικά υλικά που έγιναν με χύτευση με εσωτερική επένδυση πολυμερικού αφρού (ο μεγάλος κύλινδρος έχει διάμετρο 40 mm).



Εικ 3.21 Αφρός από την ERG με την ονομασία Duocel

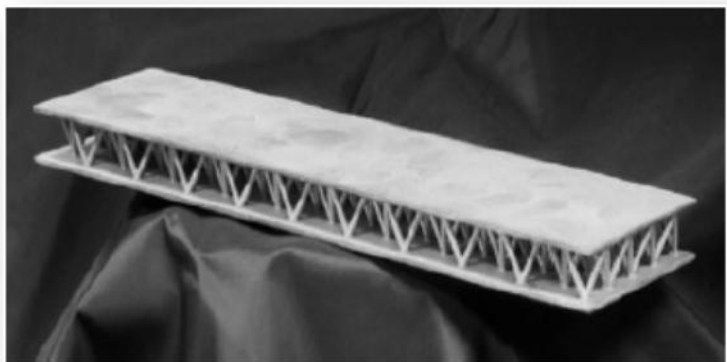
### 3.3.2 Χύτευση με πολυμερικό πρότυπο Lattice Block Materials(LBM).

Τα πρώτα υλικά με τα χαρακτηριστικά κυψελοειδών μετάλλων και με δομή τρισδιάστατου πλέγματος παρασκευάστηκαν από την εταιρεία Jamcor και είναι γνωστά ως υλικά δικτυωτής δομής.

Τα υλικά αυτά συγκαταλέγονται σε εκείνα με δομή συντακτική ή περιοδική.

Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν όλα τα κυψελοειδή υλικά , των οποίων η δομή συνίσταται στην παράθεση στοιχειωδών συμμετρικών μοτίβων στο επίπεδο ή στο χώρο.





*Εικ. 3.22 Τετραεδρικού πλέγματος δικτυωτή δομή.*

Ο τρόπος παρασκευής περιλαμβάνει πρώτα τη δημιουργία πολυμερικού προτύπου δικτυωτής δομής.

Στη συνέχεια ακολουθεί χύτευση του μετάλλου, το οποίο και αντικαθιστά τον πολυμερικό αφρό, ο οποίος εξαερώνεται.

Η μορφή του αρχικού προτύπου διευκολύνει την εισροή του υγρού μετάλλου παρέχοντας ένα συμμετρικό και γεωμετρικά απλό δίκτυο καναλιών σε σχέση με τα πρότυπα στοχαστικής δομής.

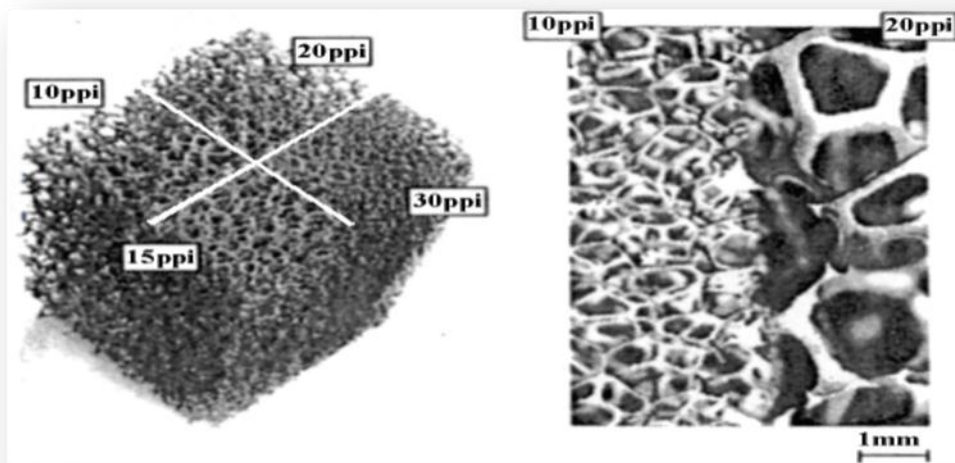
Όλα τα χυτεύσιμα μέταλλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συγκεκριμένη διαδικασία . Τα μέταλλα όμως με ικανοποιητική ρευστότητα προτιμώνται γιατί η χύτευση είναι αρκετά απαιτητική κι έτσι αποφεύγονται οι ατέλειες στο τελικό προϊόν[7].

### **3.3.3 Χύτευση σε πρότυπο για τη δημιουργία μεταλλικών σπόγγων μεταβλητού πορώδους**

Περιλαμβάνει πρώτα τη δημιουργία αναλώσιμων προτύπων από πολυμερικό αφρό, διαφορετικού πορώδους . Στη συνέχεια τη συνένωσή τους με ρητίνες έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα ενιαίο πρότυπο. Το πρότυπο αυτό επικαλύπτεται από μίγμα κεραμικών

ουσιών και στη συνέχεια θερμαίνεται. Στο στάδιο της θέρμανσης αφαιρείται η ρητίνη και στερεοποιείται το κεραμικό περίβλημα δημιουργώντας τη μήτρα χύτευσης που θα δώσει την τελική μορφή στο μεταλλικό σπόγγο.

Η παρασκευή ενός τέτοιου σπόγγου σχ 3.24 έχει το πλεονέκτημα του μεταβλητού πορώδους σε ειδικές εφαρμογές όπου απαιτείται ομαλή μετάβαση από τη μια περιοχή στην άλλη (ρυθμιστές ροής ρευστών).



Σχήμα 3.24: Δεξιά: δείγμα κυβικού σπόγγου που περιλαμβάνει τέσσερις διαφορετικές περιοχές πορώδους. Αριστερά: διεπιφάνεια δύο γειτονικών περιοχών Διαφορετικού πορώδους

### 3.4 Μέθοδος “Osprey” Αφροποίηση με ψεκασμό

Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμογή σε μια μεγάλη ποικιλία μετάλλων και κραμάτων.

Δημιουργείται νέφος μεταλλικών σταγονιδίων και ενός αφροποιητικού μέσου και στη συνέχεια την εναπόθεση τους σε κατάλληλα διαμορφωμένη βάση.

Το αφροποιητικό μέσο μετά την τοποθέτηση του στη βάση και την επαφή του με το υγρό μέταλλο διασπάται αποδίδοντας την κατάλληλη ποσότητα αερίου για το σχηματισμό πόρων.

Στη βάση που αποτελεί και το υπόστρωμα ανάπτυξης του μεταλλικού αφρού μπορεί να δοθεί οποιοδήποτε γεωμετρικό σχήμα νάλαγα με την εφαρμογή του π.χ. φύλλα, ράβδοι, σωλήνες κ.λ.π.

Μας παρέχεται με τη συγκεκριμένη μέθοδο η δυνατότητα δημιουργίας μεταλλικών αφρών με την προσθήκη οξειδίων ή καρβιδίων στο νέφος ψεκασμού).

Η αφροποίηση με ψεκασμό έχει εφαρμοστεί για την παρασκευή μεταλλικών αφρών από κράμα  $\text{CuSn6}$  με χρήση σκόνης  $\text{BaCO}_3$  ως αφροποιητικού μέσου.

Επίσης μεταλλικοί αφροί από Χάλυβα είναι δυνατόν να δημιουργηθούν με την προσθήκη άνθρακα και σκόνης οξειδίου του πυριτίου.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η δημιουργία μεταλλικών αφρών διαφόρων σχημάτων και πάχους. Η ανομοιογένεια του πορώδους αντίθετα είναι ένα μειονέκτημα [4].

#### **4. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ – ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ**

Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι οι μεταλλικοί αφροί λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους είναι ιδιαίτερα ελκυστικοί , απαιτείται όμως κατάλληλα αναπτυγμένη τεχνολογία για την μηχανουργική τους κατεργασία, την μορφοποίηση τους , τη συγκόλληση τους.

Τα χαρακτηριστικά των μεταλλικών αφρών είναι:

- α) Αντοχή σε κρούσεις (δύσκολη μορφοποίηση και κατεργασία)
- β) Υψηλή ευαισθησία σε αξονικές καταπονήσεις (δύσκολη μορφοποίηση)
- γ) Ατέλειες σε κυτταρικά τοιχώματα και στην επιφάνεια (δύσκολη επικάλυψη)
- δ) Παρουσία οξειδίων στην επιφάνεια(δύσκολη επικάλυψη και συγκόλληση)
- ε) Παρουσία των στερεοποιητικών κεραμικών (δύσκολη κατεργασία)[5].

#### **Μηχανουργικές κατεργασίες**

Ενας τρόπος για να αποφύγουμε τις μηχανουργικές κατεργασίες είναι να έχουμε λάβει τα μέτρα μας στο στάδιο του σχεδιασμού.

Ομως και οι καλά σχεδιασμένοι αφροί χρειάζεται να κοπούν. Οι κοινές κατεργασίες προκαλούν λύγισμα των λεπτότοιχων πόρων των κραμάτων. Τα τοιχώματα των πόρων κάμπτονται ή θραύονται στο λεπτότερο σημείο τους. Αυτό μας οδηγεί σε μιας χαμηλής ποιότητας επιφάνεια κοπής και χαμηλή ακρίβεια.

Αν χρειαζόμαστε μια καλή μηχανική επιφάνεια οι παραδοσιακοί τρόποι κατεργασίας δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Η κατεργασία με ηλεκτρική εκκένωση φαίνεται να είναι η πιο κατάλληλη γιατί έτσι αποφεύγονται μηχανικές ατέλειες στα τοιχώματα.

Για επιφανειακές επικαλύψεις εφαρμόζονται οι ίδιες αρχές που εφαρμόζονται και στα άλλα κυψελοειδή υλικά, όμως πρέπει να ληφθεί υπ' όψη η σπογγώδης συμπεριφορά της πορώδους δομής τους , γιατί περιορίζει σημαντικά αυτές τις επιφανειακές κατεργασίες.

Τεχνικές συνδέσεων είναι επίσης απαραίτητες για πρακτικές εφαρμογές σε κυψελωτά μέταλλα. Κόλληση με κόλα ή ηλεκτροσυγκόλληση ή κασσιτεροκόλληση ή laser μπορεί επίσης να εφαρμοστεί.

Οι μεταλλικοί αφροί μπορούν γενικά να συγκολληθούν, αρκεί να έχουμε ένα σωστό αποτέλεσμα. Το κόστος όμως για τέτοιες εφαρμογές είναι αρκετά υψηλό.[4,5]

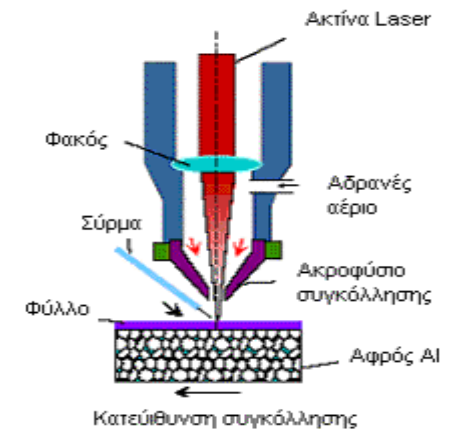
## **Τεχνολογίες ένωσης των κατασκευών που περιέχουν μεταλλικούς αφρούς:**

### **Συγκόλληση με laser ή με TIG/MIG**

Με τη συγκόλληση μόνο τα εξωτερικά φύλλα ενώνονται ενώ τα εσωτερικά στρώματα παραμένουν ανέπαφα, έτσι η κυψελωτή δομή παραμένει ίδια. Επίσης οι ταχύτητες της συγκόλλησης που μπορούν να επιτευχθούν είναι αρκετά μεγάλες, περιορίζονται όμως εάν πρέπει να συγκολληθούν και τα δύο φύλλα.

Αυτή η τεχνολογία είναι συμφέρουσα γιατί εισάγει χαμηλό ποσοστό ενέργειας στον αφρό, με άμεση συνέπεια η δομή του αφρού να είναι σταθερή. Το πληρωτικό υλικό τοποθετείται μπροστά από την κεφαλή του λέιζερ κατά μήκος της διεύθυνσης της συγκόλλησης. Ειδικά για τις συγκολλήσεις αφρών έχουμε καλύτερα αποτελέσματα όταν δουλεύουμε με παλμικό λέιζερ και με λέιζερ συνεχόμενης ακτινοβολίας. Τα πειράματα δείχνουν ότι αυτή η συγκόλληση έχει καλά αποτελέσματα για την συνένωση αφρών αλουμινίου με φύλλα μετάλλου. Σχ. 4.1 [1]

Εάν χρησιμοποιούμε τις τεχνικές TIG/MIG μπορούμε να έχουμε εξαιρετικά αποτελέσματα τόσο για συγκόλληση μεταξύ σάντουιτς αλουμινίου όσο και για συγκόλληση μεταξύ σάντουιτς με άλλο αλουμινένιο τεμάχιο. Τα πλεονεκτήματά τους είναι οι ευέλικτες δυνατότητες των εφαρμογών τους και τα χαμηλά κόστη των απαιτούμενων επενδύσεων. Όπως και στην προηγούμενη μέθοδο συγκόλλησης έτσι και εδώ κολλάμε μόνο το κέλυφος, μην παραμορφώνοντας την εσωτερική δομή.



Σχηματική απεικόνιση συγκόλλησης με Laser

Σχ. 4.1

### **Flow drilling**

Με αυτήν την τεχνική πιέζουμε αξονικά και περιστρέφουμε με μεγάλη ταχύτητα ένα πολυγωνικό περικόχλιο, δημιουργώντας μια μεγάλη θερμότητα λόγω τριβής. Το υλικό μαλακώνει και παίρνει πολύ πιο εύκολα σχήμα. Σε κάποιο σημείο θα γίνει μια καθορισμένη διανοιγμένη τρύπα και το υλικό του εξωτερικού φύλλου θα ρεύσει μέσα στην καρδιά. Το μήκος της τρύπας είναι 3 με 5 φορές το πάχος του εξωτερικού φύλλου.

### **Κόβοντας τα πάνελ που έχουν αφρούς αλουμινίου**

Το να κόψουμε τέτοιου είδους τεμάχια μπορεί να αποτελέσει μια πολύ δύσκολη υπόθεση καθώς οι κοινές τεχνικές που διαθέτουμε δεν μπορούν να εφαρμοστούν εδώ αφού υπάρχει ο κίνδυνος της μη ελέγξιμης παραμόρφωσης του υλικού. Έτσι έχουν αναπτυχθεί οι εξής δύο τεχνικές :

#### ***Κόψιμο με ακτίνες laser***

Το να κόψουμε αφρούς απαιτείται να τροποποιήσουμε τις παραμέτρους της διαδικασίας και να λάβουμε υπόψη την ειδική φύση των τεμαχίων μας. Και οι δύο εξωτερικές όψεις πρέπει να κοπούν ταυτόχρονα. Επίσης η χαμηλή πυκνότητα των αφρών οδηγεί στο να λιώσει περισσότερο ο πυρήνας από τα εξωτερικά φύλλα προκαλώντας την κατάρρευση και εκχείλιση μετάλλου ρίχνοντας την ποιότητα της κομμένης επιφάνειας.

#### ***Κόψιμο με νερό***

Το να κόψουμε με jet νερού σάντουιτς που δεν έχουν περάσει στην διαδικασία της αεροποίησης μπορεί να γίνει χωρίς κανένα πρόβλημα.

Όμως από τη φύση τους και μόνο αυτού του είδους τα τεμάχια επιβάλλουν το πρόβλημα ότι έχουν παραμείνει μετά την κοπή μικροαντικείμενα μέσα στους πόρους που δεν μπορούμε να τα διώξουμε έστω και μετά την πλύση τους με γυαλιστικά. Τέτοια υπολείμματα δεν μπορούν να γίνουν αποδεκτά ειδικά σε περιπτώσεις όπου τα πάνελ πρέπει να βερνικωθούν και γενικότερα να έχουμε μια καλή επιφάνεια.

## **5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Τα κυψελοειδή μέταλλα και τα κράματα μπορούν να χαρακτηρισθούν (να τους αποδοθούν ιδιότητες) με πολλούς τρόπους. Ο αντικειμενικός σκοπός είναι η απόκτηση μηχανικών ή φυσικών δεδομένων, ερευνώντας τα χαρακτηριστικά των κυψελοειδών υλικών, ή η μεταφορά τεχνολογικών χαρακτηριστικών της σύνθεσης των κυψελοειδών υλικών.

Η εξέταση ενός κυψελοειδούς υλικού είναι μια διαδικασία ισοδύναμη με την εξέταση ενός οποιουδήποτε μηχανολογικού εξαρτήματος.

Γενικά, μπορούμε να διακρίνουμε δύο μεθόδους χαρακτηρισμού:

Καταστροφικές και μη καταστροφικές, ανάλογα με το αν ο αφρός παραμορφώνεται μη αναστρέψιμα ή μεταβάλλεται διαφορετικά ή παραμένει αμετάβλητος ή ελάχιστα μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του χαρακτηρισμού.

### **5.1. Μη καταστροφικός έλεγχος**

Ένα μεγάλο εύρος μη καταστροφικών μεθόδων είναι διαθέσιμο για το χαρακτηρισμό υλικών και εξαρτημάτων. Παρακάτω θα αναπτύξουμε μόνο τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την έρευνα των κυψελοειδών υλικών.

#### ***Μετρήσεις πυκνότητας***

Μπορούμε να καθορίσουμε την πυκνότητα ενός πορώδους υλικού ζυγίζοντάς το και μετρώντας τον όγκο, χρησιμοποιώντας την αρχή του Αρχιμήδη.

Εάν το προς εξέταση δείγμα δεν έχει κλειστή εξωτερική επιφάνεια, για να εμποδίσουμε την εισχώρηση του υγρού στους πόρους, το επικαλύπτουμε με ένα υλικό, π.χ. με ένα λεπτό στρώμα πολυμερούς. [4]

### ***Μετρήσεις εμποτισμού με χρώμα***

Στην πράξη συμβαίνουν διάφορες ατέλειες κατά τη διάρκεια της παραγωγής αφρών, όπως για παράδειγμα στο στάδιο της ψύξης μετά την αεροποίηση.

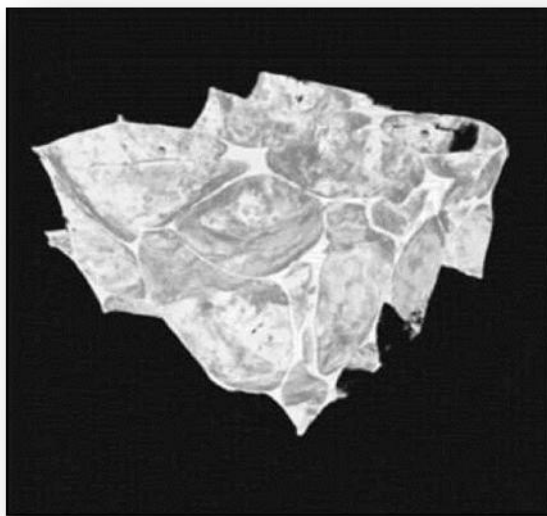
Τέτοιες ατέλειες μπορούν να περιλαμβάνουν κάποιες τρύπες ή ρωγμές στα τειχία των κελιών ή στην εξωτερική επιφάνεια. Έτσι, με τη βοήθεια αυτής της διαδικασίας θα πρέπει να γίνει επάλειψη με ένα χημικό υγρό στην επιφάνεια του αφρού που εξετάζουμε. Το υγρό τελικά απορροφάται από τις οπές και τις ρωγμές.

Μετά και αφού στεγνώσουμε την υπό εξέταση επιφάνεια, επαλείφουμε ένα κατάλληλο βάμμα, το οποίο χρωματίζει την παραμένουσα χημική επίστρωση, η οποία βεβαίως δεν απορροφήθηκε. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να δημιουργηθούν αποτυπώσεις των ατελειών, οι οποίες είναι άμεσα ορατές. [4]

### ***Ραδιογραφία και ραδιοσκοπία με ακτίνες-X***

Τα κυψελοειδή υλικά μπορούν να αποτυπωθούν και με τεχνικές απορρόφησης ακτινών-X. Μια δέσμη ακτινών-X οδηγείται στο δείγμα και στη συνέχεια μετρούμε την εξασθένησή της

Επιλέγουμε μια συγκεκριμένη εγκάρσια επιφάνεια και μετρούμε στις δύο διαστάσεις, διαμορφώνοντας μια δισδιάσταση αποτύπωση του αφρού.[4]



*Υψηλής ανάλυσης εικόνα αφρού ψευδαργύρου με τη βοήθεια της τομογραφίας.*

### ***Τομογραφία με ακτίνες-Χ***

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

Η επιλογή του μεγέθους των δοκιμίων εξαρτάται από τις πληροφορίες που επιθυμούμε να καταγράψουμε.[4]

### ***Αισθητήρες ρεύματος δίνης***

Οι αφροί μπορούν να χαρακτηρισθούν από τη σχετική τους πυκνότητα και από το μέγεθος των πόρων, με την πραγματοποίηση μετρήσεων ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρησιμοποίηση ενός πηνίου διέγερσης, το οποίο δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από το δείγμα του αφρού, το οποίο μπορεί με τη σειρά του να συλλεχθεί από ένα δευτερεύον πηνίο.

Τα ρεύματα δίνης όχι μόνο επηρεάζονται από γεωμετρικούς παράγοντες και τη συχνότητα, αλλά επίσης και από τις ιδιότητες των αφρών.[4]

### ***Ακουστικές μετρήσεις***

Οι ιδιότητες της απορρόφησης του ήχου από μέσης διαμέτρου πόρους συνήθως μετρώνται με το σωλήνα αντίστασης, με τον οποίο πετυχαίνουμε γρήγορες και ακριβείς μετρήσεις.

Συνήθως, η μέτρηση της εξασθένησης είναι συνάρτηση της συχνότητας.

Εάν το δείγμα έχει ανοικτό πορώδες, οι καμπύλες της απόσβεσης είναι μετατοπισμένες προς τις χαμηλότερες συχνότητες όταν το κενό αυξάνει.

Ωστόσο, συμπαγή δείγματα και πορώδη δείγματα με κλειστούς πόρους έχουν την ίδια καμπύλη απόσβεσης, εξαρτώμενη από το διάκενο, επειδή ο ήχος δεν μπορεί να διαπεράσει το δείγμα και η απορρόφηση γίνεται στην επιφάνεια.[4]

### ***Ανάλυση με ταλάντωση***

Το μέτρο του Young και ο παράγοντας της απώλειας του υλικού μπορεί να καταγραφεί με τη βοήθεια της ανάλυσης με ταλάντωση.

Στην πιο απλή τεχνική, ένα μακρύ ορθογωνικό δοκίμιο ή ένα λεπτό τετράγωνο φύλλο από το υπό εξέταση υλικό εξαναγκάζεται σε



ταλάντωση. Μπορούν να δημιουργηθούν διαμήκεις, εγκάρσιες ή στρεπτικές διεγέρσεις.

Οι απορρέουσες ταλαντώσεις συλλέγονται από ένα επαγωγικό πηνίο. Το εύρος των ταλαντώσεων ως συνάρτηση της συχνότητας διεγέρσεως μας δείχνει τις χαρακτηριστικές αιχμές συντονισμού. Οι θέσεις αυτές των αιχμών επιτρέπουν τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας  $E$  από τις διαστάσεις και τη μάζα του δείγματος.[4]

## 5.2. Καταστροφικοί Έλεγχοι

Η μορφολογία του κελιού και η μικροδομή των κυψελοειδών υλικών μπορεί να αναλυθεί με οπτικές παρατηρήσεις σε διάφορες μεγεθύνσεις. Αν και η διαδικασία της ανάλυσης είναι μη καταστροφική, η προετοιμασία του δείγματος συνήθως επιβάλλει την κοπή και το γυάλισμα του δείγματος και για το λόγο αυτό αποτελεί μια μέθοδο καταστροφικού ελέγχου.

Μπορούμε να καθορίσουμε τα κελιά ή το μέγεθος της κατανομής των πόρων, χρησιμοποιώντας εμπορικά προγράμματα επεξεργασίας εικόνας. Αυτά τα προγράμματα αναγνωρίζουν τα χαρακτηριστικά κελιά στο επίπεδο της προετοιμασίας. Σημαντικά αποτελέσματα, ωστόσο, είναι αρκετά δύσκολο να αποκτηθούν. Τα τοιχώματα των κελιών και το εσωτερικό των κελιών πρέπει να εμφανίζονται με διαφορετική φωτεινότητα.

Μια διαδικασία παραμόρφωσης των μεταλλικών αφρών έχει ερευνηθεί με μια μέθοδο που καλείται «ανάλυση επιφανειακής παραμόρφωσης». Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ένα δείγμα αφρού παραμορφώνεται, ενώ συγχρόνως η εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου παρατηρείται συνεχώς με μια κάμερα. Συσχετίζοντας τις αναλύσεις μεταξύ δύο διαδοχικών φωτογραφιών, λαμβάνουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα.[4]

## Μηχανικοί Έλεγχοι

Οι μηχανικοί έλεγχοι των κυψελοειδών υλικών είναι προαπαιτήση για κάθε κατασκευή. Τα μηχανικά δεδομένα είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη καθορισμένων εφαρμογών ή γενικότερα για τη δημιουργία βάσεων δεδομένων, που χρειάζονται για τη δημιουργία επίλυσης μοντέλων με τα υπολογιστικά συστήματα.[4]

## Έλεγχος σε διάβρωση

Μέχρι σήμερα, δεν υπάρχουν καθιερωμένοι έλεγχοι σε διάβρωση. Συνήθως, εφαρμόζουμε μεθόδους ελέγχου από άλλες διαδικασίες, όπως είναι, για παράδειγμα, οι έλεγχοι στην αυτοκινητοβιομηχανία. Επίπεδα δείγματα με πυρήνα από αφρό αλουμινίου χαρακτηρίζονται από ελέγχους κατά τους οποίους τα δείγματα δοκιμάζονται σε 10 κύκλους των επτά ημερών με 24ώρη έκθεση σε αλατώδες ψεκασμό, 4x24 ώρες σε διάφορα περιβάλλοντα υγρασίας και 48ώρη έκθεση σε θερμοκρασία δωματίου με κανονική υγρασία (23°0-50%).[4]

## 6. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ

**6.1 Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες** των αφρών διαφέρουν από αυτές των “πυκνών” μετάλλων.

Η βασικότερη ιδιότητα των μεταλλικών αφρών αφορά το ειδικό βάρος τους. Όλα τα αφρώδη μεταλλικά υλικά είναι πολύ ελαφριά.

Ορισμένοι μεταλλικοί αφροί δε, έχουν πυκνότητα πολύ μικρότερη της μονάδας συνεπώς μπορούν να επιπλέουν στο νερό.

**α) Αγωγιμότητα.** Η ηλεκτρική και η θερμική αγωγιμότητα των αφρών είναι γενικά χαμηλότερη από αυτή των “πυκνών” μετάλλων.

Ο λόγος είναι ότι το μεταλλικό κομμάτι του αφρού (τοιχώματα κελιών) καταλαμβάνει πολύ μικρότερο όγκο σε σύγκριση με τους γεμάτους αέρια πόρους.

Επίσης τα τοιχώματα των κελιών είναι επικαλυμμένα με ένα στρώμα οξειδίου, το οποίο όπως είναι γνωστό δεν είναι αγωγίμο.

Είναι λογικό λοιπόν η αγωγιμότητα να αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας του αφρού.

Η θερμική αγωγιμότητα εκτιμάται ότι είναι δέκα φορές μικρότερη στους αφρούς απ' ότι στα “πυκνά” μέταλλα.

Επίσης με μια κατεργασία οξείδωσης η θερμική αγωγιμότητα μπορεί να μειωθεί κι άλλο.

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι ίδιος για τους αφρούς όπως και για τα “πυκνά” μέταλλα, δηλαδή οι αφροί σε υψηλές θερμοκρασίες δεν χάνουν το σχήμα τους απλά διογκώνονται ελάχιστα.

Εξαιτίας της χαμηλής θερμικής τους αγωγιμότητας οι αφροί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μονωτικά υλικά. [1]

**β) Ηχομονωτικές ιδιότητες** Ένα άλλο πλεονέκτημα των αφρών είναι η εξαιρετική ικανότητά τους να απορροφούν τον ήχο.

Στους αφρούς τα ηχητικά κύματα ανακλώνται από την ακανόνιστη δομή των πόρων.

Η κυματική τους ενέργεια προκαλεί κάποιες μικρές παραμορφώσεις στα τοιχώματα των κελιών και μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια.

Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η ένταση των ανακλώμενων ηχητικών κυμάτων.

Τα αποτελέσματα διάφορων ερευνών έχουν δείξει ότι η απορρόφηση (ηχομονωτική ικανότητα) αυξάνεται όταν έχουμε ομογενείς πόρους. Επίσης βελτίωση παρατηρείται όσο αυξάνουν οι συνδέσεις μεταξύ των πόρων.

Φαίνεται ότι οι αφροί με ανοιχτούς πόρους είναι πιο αποτελεσματικοί στην απορρόφηση των ήχων.[1]

Οι μελέτες του συντελεστή απορρόφησης ήχου του Alporas δείχνουν ότι το Alporas που έχει γίνει με έλαση έχει ένα υψηλό συντελεστή απορρόφησης ήχου, ισοδύναμο με αυτό του γυαλιού ή του ξύλου. [1]

**γ)Θερμικές ιδιότητες** Οι βασικές θερμικές ιδιότητες μεγάλης πρακτικής σημασίας των πορωδών μετάλλων είναι: το σημείο τήξης, η ειδική θερμότητα, η θερμική αγωγιμότητα, η θερμική διαχυτότητα, ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας της επιφανείας και οι αντιστάσεις σε θερμότητα και θερμικά σοκ.

Όλες οι ιδιότητες των μεταλλικών αφρών καθορίζονται από τρεις θεμελιώδεις παραμέτρους :

(1) Τις ιδιότητες του μητρικού υλικού και την επίδραση των φάσεων που προκύπτουν εξαιτίας των στερεών σωματιδίων σταθεροποίησης που εισάγονται σε αυτό.

(2) Την μορφολογία των κελιών σε συνδυασμό με την διαστασιολόγησή τους.

(3) Την σχετική πυκνότητα  $\rho^*/\rho_s$  και την βάρθρωση του κλάσματος του όγκου του μετάλλου  $\phi$  που βρίσκεται στις πλευρές των κελιών.

## 6.2 Μηχανικές Ιδιότητες Αφρών

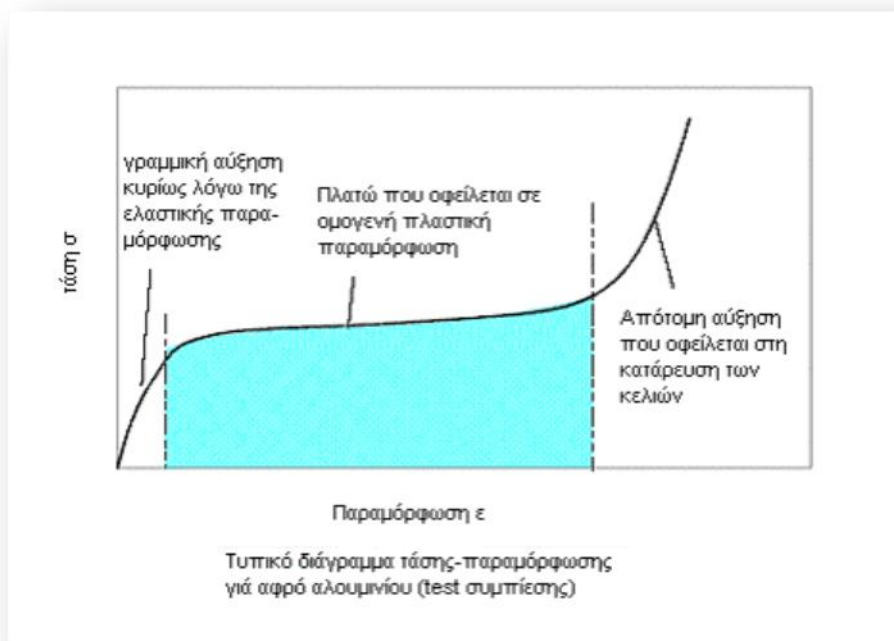
Οι μηχανικές ιδιότητες των πορωδών υλικών ομαδοποιήθηκαν και μελετήθηκαν αρχικά από τους Gibson και Ashby .

Εξαιτίας της κυψελωτής δομής οι αφροί έχουν διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με τα μέταλλα. Αυτό έχει σαν άμεση συνέπεια να μην μπορούν να ελεγχθούν με τα γνωστά συμβατικά τεστ, π.χ. τεστ εφελκυσμού.

Τα πιο σημαντικά αποτελέσματα τα δίνει η δοκιμή θλίψης που μας δίνει ένα τυπικό διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης που χωρίζεται σε 3 μέρη.

Έχει βρεθεί ότι αυτή η συμπεριφορά είναι τυπική για τους αφρούς με ανοιχτούς ή κλειστούς πόρους.

Το σχ. 6.1 δείχνει μια γραμμική αύξηση της παραμόρφωσης στην αρχή της επιβολής της τάσης και ένα κομμάτι σχεδόν αμετάβλητης τάσης στην μέση, που ακολουθείται από μια απότομη αύξηση της τάσης παραμόρφωσης.



Σχ. 6.1[1]

Το πρώτο στάδιο δεν είναι συνέπεια μόνο της ελαστικής παραμόρφωσης, όπως στην περίπτωση των μετάλλων, αλλά και της πλαστικής παραμόρφωσης. Στους αφρούς μη αντιστρεπτή παραμόρφωση μπορεί να συμβεί και σε χαμηλή τάση.

Το σχεδόν ευθύγραμμο κομμάτι εμφανίζεται λόγω μιας ομογενούς πλαστικής παραμόρφωσης.

Το τρίτο στάδιο οφείλεται στην κατάρρευση των κελιών. Οι απέναντι τοίχοι των κελιών αρχίζουν να αγγίζουν ο ένας τον άλλο. Η τάση που οι αφροί με ανοιχτούς και με κλειστούς πόρους εμφανίζουν "πλατό" είναι περίπου η ίδια όταν συγκρίνουμε αφρούς με την ίδια πυκνότητα και με την ίδια μήτρα.[1]

Οι ιδιότητες των αφρών επηρεάζονται επίσης και από την επιφάνειά τους. Οι αφροί που δοκιμάζονται χωρίς την πιο πυκνή εξωτερική επιφάνεια (π.χ, έχει αφαιρεθεί με κοπή) έχουν χαμηλότερη αντοχή.

Η εξήγηση για αυτή την συμπεριφορά είναι ότι η εξωτερική επιφάνεια λειτουργεί σαν μέσο σκλήρυνσης όπως και στην δομή του σάντουιτς.

Η ίδια συμπεριφορά χαρακτηρίζει και τους σωλήνες που στο εσωτερικό τους έχουν αφρό αλουμινίου.

Η κατεύθυνση του αφρού δεν παίζει κάποιο ρόλο, γιατί ουσιαστικά οι αφροί είναι ισοτροπικά υλικά. Στους μεταλλικούς αφρούς μπορούμε να κάνουμε θερμικές κατεργασίες αλλά είναι δύσκολο και υπάρχουν αρκετά προβλήματα με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να αυξήσουμε σημαντικά την αντοχή. Μερικά προβλήματα είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και το ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί ο ίδιος ρυθμός ψύξης σε όλο το υλικό. Σαν μέσο ψύξης χρησιμοποιείται πεπιεσμένος αέρας που δίνει όμως αργούς ρυθμούς ψύξης σε σχέση με το νερό, το οποίο όμως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μέσο ψύξης γιατί καταστρέφει τα κελιά. [1]

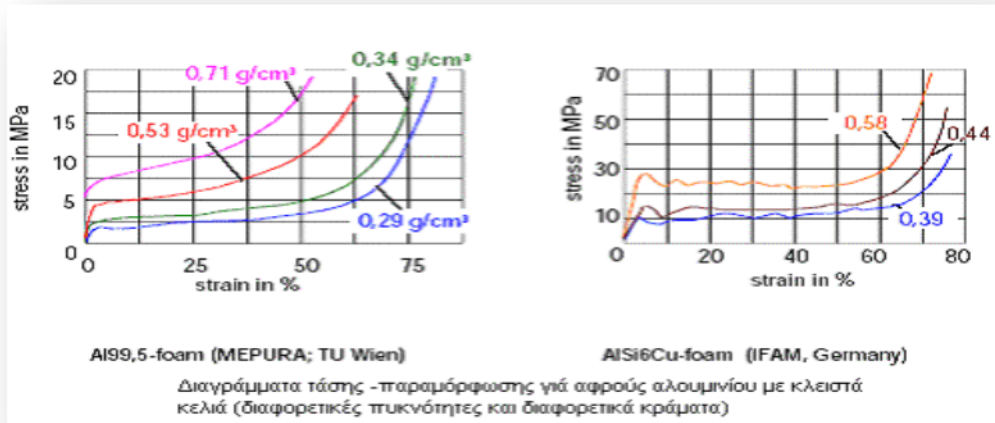
Για την ερμηνεία των μηχανικών ιδιοτήτων των μεταλλικών αφρών εκτός από τις κλασικές πειραματικές μεθόδους χαρακτηρισμού τους, χρησιμοποιήθηκαν και σύγχρονες που βασίζονται στην ταυτόχρονη παρατήρηση με ανάλυση εικόνας και την χρήση X-ray tomography.

### **6.3 Αντοχή των δομών Σάντουιτς – Απορρόφηση ενέργειας**

Όπως προαναφέρθηκε η εξωτερική επιφάνεια αυξάνει την αντοχή των αφρών.

Χρησιμοποιώντας μεταλλικά φύλλα σιδήρου ή αλουμινίου που περιβάλλουν τον αφρό μπορούμε να αυξήσουμε την αντοχή του αφρού δημιουργώντας μια δομή σάντουιτς.

Επίσης μπορούμε να επιτύχουμε μεγαλύτερη αντοχή και ακαμψία στους σωλήνες αν τους γεμίσουμε με αφρό αλουμινίου.[1]



Σχ.6.2



Σχ. 6.3

Στο προηγούμενο σχήμα (σχ. 6.2) φαίνονται τα αποτελέσματα της δοκιμής θλίψης σε διάφορους σωλήνες που περιέχουν ή δεν περιέχουν αφρό αλουμινίου στο εσωτερικό τους.

Στην περίπτωση των σωλήνων με τον αφρό αλουμινίου η τάση του “πλατό” είναι μεγαλύτερη, όπως επίσης και η περιοχή κάτω από το “πλατό”.

Αυτό σημαίνει ότι αυτοί οι σωλήνες είναι καλύτεροι για εφαρμογές που απαιτείται απορρόφηση ενέργειας κρούσης.

Μπορούν δηλαδή να χρησιμοποιηθούν σαν απορροφητές ενέργειας σύγκρουσης στα αυτοκίνητα.[1]

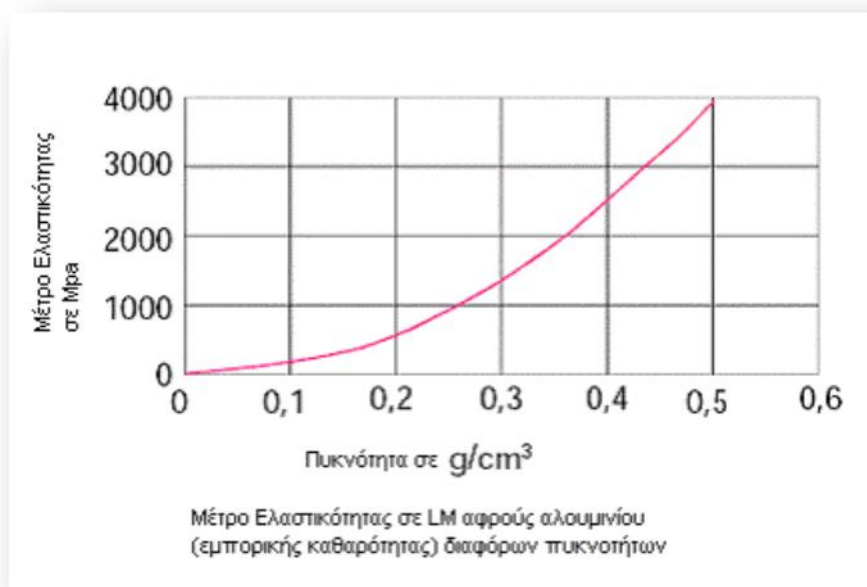
Γεμάτοι σωλήνες με μικρότερη διάμετρο μπορούν να απορροφήσουν την ίδια ενέργεια με σωλήνες με μεγαλύτερη διάμετρο, δηλαδή μπορούμε να έχουμε το ίδιο όφελος καταλαμβάνοντας λιγότερο χώρο.

Αυτό ενδιαφέρει ιδιαίτερα την αυτοκινητοβιομηχανία. Ο αφρός του αλουμινίου προστατεύει τον σωλήνα από μια πρόωρη κατάρρευση ή πλαστική παραμόρφωση.

Αν στην συνέχεια ο σωλήνας λυγίσει ή παραμορφωθεί με κάποιο τρόπο ο αφρός συμπιέζεται - με αποτέλεσμα να μετριάξει την περαιτέρω παραμόρφωση.

Μερικά παραδείγματα σωλήνων με γέμιση αφρού αλουμινίου φαίνονται στο παραπάνω σχήμα. σχ 6.3.

#### 6.4 Μέτρο Ελαστικότητας



Σχ. 6.4

Το μέτρο ελαστικότητας, σε συνδυασμό με την γεωμετρία είναι ένα σημαντικό μέσο χαρακτηρισμού ενός τελικού προϊόντος, από το οποίο μπορούμε να εκτιμήσουμε την αντοχή του.

Όπως φαίνεται στο πιο πάνω σχήμα(σχ. 6.4), το μέτρο ελαστικότητας των αφρών αυξάνει με την αύξηση της πυκνότητας.

Αυτό ισχύει για όλους τους αφρούς ανεξαρτήτως από το αν έχουμε ξεκινήσει από τήγμα ή πούδρα.

Άρα μπορούμε να προσαρμόσουμε το μέτρο ελαστικότητας ανάλογα με την εφαρμογή μεταβάλλοντας την πυκνότητα του αφρού. [1]

## 7. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ

Τα πορώδη μεταλλικά υλικά βρίσκουν ολοένα και περισσότερες εφαρμογές στη βιομηχανία χάρη στο μεγάλο εύρος των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων τους.

Στην αυτοκινητοβιομηχανία και στην αεροδιαστημική, αλλά και στους τομείς της μηχανικής και των κατασκευών.

Σε σύγκριση με τα συνθετικά υλικά (πλαστικά ) τα οποία είναι ελαφριού βάρους οι μεταλλικοί αφροί έχουν ειδικά πλεονεκτήματα : καλή αντοχή στη θερμότητα, μη αναφλεξιμότητα και δυνατότητα για εύκολη ανακύκλωση.

Η χρήση των μεταλλικών αφρών, όπως άλλωστε θα περίμενε κανείς, εξαρτάται από συγκεκριμένους παράγοντες οι οποίοι παραθέτονται συνοπτικά στη συνέχεια:

- Μορφολογία Τύπος του πορώδους (ανοικτός ή κλειστός), πυκνότητα του πορώδους, επιθυμητό μέγεθος πόρων, απαίτηση σε συνολική εσωτερική επιφάνεια του κυψελοειδούς υλικού.

- Κόστος παραγωγής, καταλληλότητα για κατασκευές μεγάλου όγκου

- Παραγωγική διαδικασία Δυνατότητα μορφοποίησης του αφρού για κατασκευή εξαρτημάτων μεταξύ του αφρού και των συμβατικών φύλλων ή των σύνθετων διατομών (prolls).

- Υλικό Μέταλλο, κράμα ή μικροδομή[4]

Είναι δύσκολο να απαριθμήσει κάποιος όλες τις υφιστάμενες και δυνητικές εφαρμογές των μεταλλικών αφρών.

Ωστόσο, είναι δυνατός ο εντοπισμός κάποιων, έτσι ώστε να υποδειχθεί το ευρύ φάσμα των συνθηκών υπό τις οποίες οι μεταλλικοί αφροί μπορούν να χρησιμοποιηθούν.



Ιδιαίτερα οι απαιτήσεις για τη μορφή του αφρού είναι καθοριστικές καθώς η μορφή του είναι το στοιχείο που καθορίζει και όλες τις ιδιότητές του.

Οι εφαρμογές μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, σε κατασκευαστικές και σε λειτουργικές.

Οι κατασκευαστικές εφαρμογές αφορούν φέρουσες κατασκευές, δηλαδή εφαρμογές-κατασκευές που θα φέρουν φορτία, ενώ οι λειτουργικές εφαρμογές έχουν ως στόχο την εκμετάλλευση ιδιαίτερων ιδιοτήτων (θερμικών, ηλεκτρικών, διαπερατότητα κλπ.).

### **Αποσβεστήρες**

Εφαρμογές σε συστήματα απόσβεσης κρούσεων προσφέρουν την μεγαλύτερη δυναμική για τη χρήση των μεταλλικών αφρών.

Οι δυνατότητες εφαρμογών ποικίλουν, από εφαρμογές σε προφυλακτήρες αυτοκινήτων, προστατευτικά περιβλήματα για εναέριες συσκευές (καταγραφείς συγκρούσεων) έως και κατασκευαστικά μέρη που χρησιμοποιούνται για προσγείωση σε διαστημικά οχήματα.

Σε πολλές περιπτώσεις, ο αφρός αλουμινίου έχει αποδειχθεί ένα καλό υλικό απορρόφησης ενέργειας.

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μπλόκ ασφαλείας σε συστήματα για ανύψωση και μεταφορά.

Σε υψηλής ταχύτητας μηχανές λείανσης η χρήση αφρού αλουμινίου ως αποσβεστήρα ενέργειας για τα προστατευτικά καλύμματα έχει δείξει εξαιρετικά αποτελέσματα.

### **Αυτοκινητοβιομηχανία – Μεταφορές**

Οι περιβαλλοντικές ανησυχίες και οι κοινωνικές πιέσεις που υποστηρίζονται από τις νομοθεσίες οδηγούν σε μείωση του βάρους, καθώς και του μεγέθους των αυτοκινήτων.

Επίσης οι αυξανόμενες απαιτήσεις για ενεργητική και παθητική ασφάλεια, οι οποίες επηρεάζονται από τις επιλογές των υλικών και τον σχεδιασμό των οχημάτων, οδηγεί στην χρησιμοποίηση νέων υλικών.

Τέλος, απαιτείται όλο και καλύτερη ακουστική μόνωση χωρίς να υπάρχει περιθώριο για επιπλέον στρώματα μόνωσης.

Οι μεταλλικοί αφροί, και κυρίως οι αφροί αλουμινίου, μπορούν να αντιμετωπίσουν αυτά τα ζητήματα.

Τρεις κύριες εφαρμογές των μεταλλικών αφρών μπορούν να είναι σημαντικές σε ένα αυτοκίνητο :

Απορρόφηση ενέργειας, χαμηλό βάρος και μόνωση.

Η μείωση του βάρους ξεκινά από τα υλικά κατασκευής. Η χρήση μεταλλικών αφρών σε δομές τύπου σάντουιτς (Εικ.2.6) μπορεί να επιτευχθεί το ελάχιστο βάρος για δεδομένη τιμή δυσκαμψίας.

Μέρη όπως τα καπό, οι πόρτες του επιβατικού αλλά και του αποθηκευτικού χώρου μπορούν να κατασκευαστούν από μεταλλικό αφρό μειώνοντας το συνολικό τους βάρος μέχρι και 50% και ταυτόχρονα αυξάνοντας τη δυσκαμψία τους ως και 10 φορές

Η επέκταση της χρήσης μεταλλικού αφρού και σε λοιπά σημεία του οχήματος θα βοηθούσε στη μείωση των συνολικών απαιτούμενων κομματιών άρα και του κόστους.

Παρόμοια, οι μεταλλικοί αφροί μπορούν να βρουν εφαρμογή και σε τρένα, είτε υπεραστικά είτε κυρίως στα αστικά (τραμ, μετρό) όπου το βάρος και το μέγεθος της κατασκευής παίζει μεγάλο ρόλο στην εμπορική της αξία

Επίσης είναι κατάλληλο για το σχηματισμό των παραμορφώσιμων ζωνών του αυτοκινήτου μπροστά και πίσω από τον χώρο των επιβατών έτσι ώστε να βελτιωθεί η ασφάλεια τους.

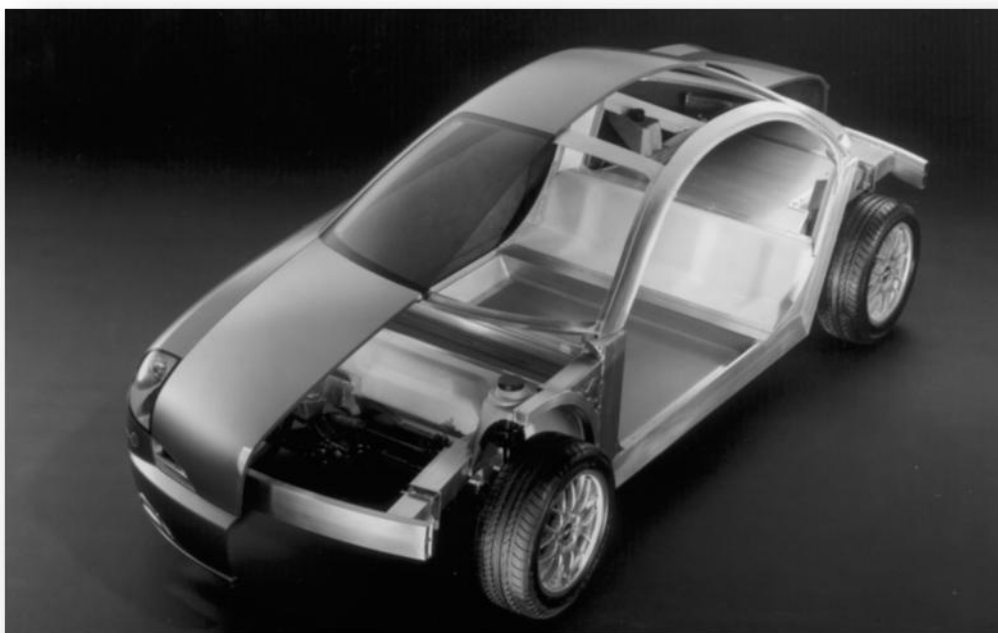
Ένας διαδεδομένος μηχανισμός παθητικής ασφάλειας είναι τα συστήματα απορρόφησης ενέργειας κατά τις συγκρούσεις, όπου γίνεται εκμετάλλευση της πλαστικής, μη αναστρέψιμης ζώνης παραμόρφωσης σωμάτων.

Εδώ, οι μεταλλικοί αφροί μπορούν να αποδώσουν καλύτερα από τους πολυμερικούς αφρούς χάρη στη μεγαλύτερη αντοχή τους σε θλίψη, άρα και στη μεγαλύτερη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας

Αφροί χαλκού πυκνότητας 5 έως 10% έχει παρατηρηθεί ότι έχουν καλύτερες επιδόσεις από το καουτσούκ ως βάσεις αποσβέσεων κρούσεων.

Όσο πιο μεγάλο είναι το πλατό της δεύτερης ζώνης στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης, τόσο περισσότερη ενέργεια δύναται να απορροφήσει ο μεταλλικός αφρός

Η μόνωση εξωτερικών θορύβων για την άνεση των επιβατών, όπως και η μείωση των θορύβων που παράγονται από τα ίδια τα οχήματα είναι ένα κομμάτι που θα μπορούσαν να συμβάλλουν οι μεταλλικοί αφροί. [1,4]



*Ένα σχέδιο ιδέα για ένα όχημα με χαμηλό βάρος. Το τείχος προστασίας και κορμός είναι κατασκευασμένα από τρισδιάστατα πάνελ αφρό αλουμινίου.[1]*

## **Ναυπηγική – Αεροναυπηγική**

Η μείωση βάρους είναι κύριος στόχος και στη ναυπηγική και στην αεροναυπηγική. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο λόγος βάρους προς δυσκαμψία των μεταλλικών αφρών δείχνει ότι σύντομα θα αποτελούν σημαντικό κομμάτι αυτών των βιομηχανιών.

Περαιτέρω εφαρμογή στην αεροναυπηγική μπορεί να βρεθεί στο χώρο της κατασκευής υπερσυμπιεστών, όπου η αυξημένη δυσκαμψία μαζί με την καλύτερη απόσβεση ταλαντώσεων κρίνεται πολύτιμη.

Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η ισοτροπία των ιδιοτήτων των πάνελ αλουμινίου και η απουσία κάθε είδους συγκολλήσεων.

Αυτό θα μπορούσε να βοηθήσει στη διατήρηση ακεραιότητας της δομής τους σε περίπτωση πυρκαγιάς. Ωστόσο ένα σημαντικό ζήτημα το οποίο απευθύνεται στις τρέχουσες έρευνες είναι η συμπεριφορά κόπωσης των αφρών αλουμινίου και πάνελ

Στα πλοία η ανάγκη για ελαφριά υλικά είναι επίσης σημαντική. Αλλά, σε σύγκριση με τα αυτοκίνητα, η υψηλή ευελιξία της επεξεργασίας υλικών είναι απαραίτητη, διότι τα πλοία δεν έχουν κατασκευαστεί με ιδιαίτερα τυποποιημένα μέρη.

Ως εκ τούτου, αφροί αλουμινίου ή πάνελ μπορεί να έχει σημαντικά πλεονεκτήματα. Προϋπόθεση για τη χρήση τους είναι η έρευνα της διάβρωσης των αφρών αλουμινίου σε αλμυρό νερό[1,4]

## **Φίλτρα**

Οι σημαντικότερες απαιτήσεις για την κατασκευή φίλτρων είναι η ικανότητα λεπτής διήθησης, δηλαδή ο διαχωρισμός πολύ λεπτών σωματιδίων, η κατακράτηση αυτών των σωματιδίων, η αντοχή σε διάβρωση και καλές μηχανικές ιδιότητες.

Οι μεταλλικοί αφροί, εφόσον παραχθούν με την κατάλληλη διεργασία, μπορούν να ικανοποιήσουν συνδυασμό αυτών των απαιτήσεων.

Τα πορώδη φίλτρα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες.

Τα φίλτρα κατακράτησης και διαχωρισμού στερεών σωματιδίων σε υγρό και τα φίλτρα κατακράτησης στερεών ή υγρών τεμαχίων διασκορπισμού σε αέριο.

Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μεταλλικά υλικά φίλτρων είναι πορώδης μπρούντζος και πορώδης ανοξείδωτος χάλυβας.

Παράδειγμα για την πρώτη κατηγορία είναι τα φίλτρα καθαρισμού ανακυκλωμένων πολυμερών τηγμάτων, ενώ για τη δεύτερη είναι τα φίλτρα καυσαερίων του πετρελαίου ή απομάκρυνσης νερού στις εναέριες γραμμές μεταφοράς.

## **Σιγαστήρες**

Οι ακουστικές ιδιότητες των μεταλλικού αφρού χρησιμοποιούνται για την μείωση του θορύβου.

Για παράδειγμα, η λειτουργία μείωσης της πίεσης ενός αερίου που μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις σε υψηλής πίεσης σωληνώσεις, προκειμένου να τροφοδοτήσει το αέριο σε τοπικά δίκτυα, παράγει πολύ υψηλής έντασης θόρυβο ο οποίος μπορεί να ταξιδέψει κατά μήκος των σωληνώσεων και να επανεμφανιστεί σε μεγάλες αποστάσεις. Κατάλληλες διατάξεις μεταλλικού αφρού έχουν σχεδιαστεί όπου και διαχέουν το αέριο ομαλά, εξαλείφοντας σχεδόν εντελώς το θόρυβο, χωρίς να υπάρχει σοβαρή παρεμβολή στη ροή του αερίου .

Μεταλλικοί αφροί έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί και σε άλλες περιπτώσεις μείωσης της πίεσης, όπως σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας από ατμό και σιγαστήρες εξάτμισης για εργαλεία που λειτουργούν με συμπιεσμένο αέρα αλλά και εξατμίσεις αυτοκινήτων.



*Διαφορετικοί τύποι σιγαστήρων (με διάμετρο μέχρι 10cm)*

## **Φλογοπαγίδες**

Οι φλογοπαγίδες είναι σημαντικές για τον εμποδισμό της μετάδοσης της φλόγας κατά μήκος σωληνώσεων αλλά και γενικότερα σε επικίνδυνες ατμόσφαιρες (εύφλεκτα αέρια).

Οι μεταλλικοί αφροί είναι εξαιρετικά υλικά για το σκοπό αυτό επειδή είναι πυρίμαχα και άκρως διαπερατά όπου και είναι ιδανικά για την παρεμπόδιση μετάδοσης της φλόγας.

Στον εφοδιασμό μιγμάτων φυσικού αερίου για καύση, ή σε μερικώς άδειες γραμμές τροφοδοσίας πετρελαίου, μια φλόγα μπορεί να δημιουργηθεί όπου και αυξάνει σε ταχύτητα καθώς κινείται.

Όταν επιτευχθεί η ταχύτητα του ήχου μια βίαιη έκρηξη μπορεί να επέλθει με αποτέλεσμα ανάπτυξης πιέσεων 150 atm ( $13,8 \text{ Nm}^{-2}$ ) ή και περισσότερο.

## Εναλλάκτες θερμότητας – Ψυκτικές μηχανές :

Οι μεταλλικοί αφροί είναι αποτελεσματικά υλικά για εναλλάκτες θερμότητας, λόγω της υψηλής εσωτερικής επιφάνειας που έχουν, αλλά και λόγω της υψηλής αγωγιμότητας που έχουν, κυρίως μεταλλικοί αφροί με βάση το νικέλιο, το χαλκό ή το αλουμίνιο.

Έχουν καλύτερη απόδοση στο ίδιο κόστος μάλιστα σε σχέση με συμβατικούς εναλλάκτες που χρησιμοποιούν πτυχωτές επιφάνειες .

Θερμότητα μπορεί να επαχθεί από ή να προσδοθεί στον αφρό με τη ροή υγρού ή αερίου μέσα από τους πόρους του, ψύχοντας ή θερμαίνοντας αντίστοιχα τον αφρό.

Επειδή η αγωγιμότητα ενός αφρού και διαπερατότητά του είναι αντιστρόφως ανάλογες, χρειάζεται να βρίσκεται ο συμβιβασμός ανάμεσα στις δύο.

Η απαγωγή θερμότητας, ψύκτες, για μικροηλεκτρονικές συσκευές είναι μία διαδεδομένη χρήση των μεταλλικών αφρών ανοικτού τύπου, ενώ έρευνες έχουν δείξει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές κατάλυτων.

Αξιοποιώντας την ηλεκτρική αγωγιμότητα των μεταλλικών αφρών και τη διαπερατότητά τους, έχει προταθεί και η χρήση αφρών για θερμομαντικά σώματα.

Η ιδέα περιλαμβάνει μεταλλικό αφρό που διαρρέεται από ρεύμα, οπότε όσο πιο μικρή πυκνότητα τόσο μεγαλύτερη αντίσταση, συνεπώς και μεγαλύτερη θερμοκρασία θα αναπτύσσει κατά τη ροή του ρεύματος.

Με κατάλληλη ροή αέρα μέσα από τον αφρό μπορεί να επαχθεί αυτή η θερμότητα για θέρμανση χώρων

Μεταλλικοί αφροί έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη ηλιακού συλλέκτη όπου και μπορεί να διατηρήσει της ενέργειας που πέφτει επάνω του.

Επίσης χρησιμοποιούνται και σε συσκευές ψύξεως των μικροηλεκτρονικών συσκευών με υψηλή πυκνότητα θερμοκρασίας, όπως τα chips των υπολογιστών.

## Μπαταρίες

Αφροί νικελίου (Ni) χρησιμοποιούνται ήδη ως υποστρώματα ηλεκτροδίων σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες νικελίου-καδμίου (NiCd), μειώνοντας το συνολικό βάρος και αυξάνοντας την πυκνότητα ενέργειας.

Η κοινή πρακτική ήταν η χρήση πλέγματος νικελίου, το οποίο είναι ακριβότερο στην κατασκευή του σε σχέση με τον αφρό νικελίου.

Κατ' επέκταση οι αφροί νικελίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί του πλέγματος νικελίου και στις αλκαλικές κυψέλες καυσίμων (AFC –

Alcaline Fuel Cell) , η πιο διαδεδομένη και ανεπτυγμένη τεχνολογία κυψελών καυσίμου.[4]

### **Καταλυτικές εφαρμογές**

Η αποτελεσματικότητα της κατάλυσης εξαρτάται από το μέγεθος της διεπιφάνειας μεταξύ του καταλύτη και του αερίου ή του υγρού που αντιδρά.

Για το λόγο αυτό οι καταλύτες δημιουργούνται με υψηλό πορώδες και, εάν αυτό είναι αδύνατο , εφαρμόζονται σε άλλα πορώδη συστήματα όπως ένα πορώδες υλικό.

Τα κυψελοειδή μέταλλα μπορούν να αντικαταστήσουν τέτοια κεραμικά, ακόμα και αν δεν μπορούν να τα συναγωνιστούν στην επιφανειακή περιοχή, εξαιτίας της ύπαρξης άλλων χρήσιμων ιδιοτήτων, όπως είναι η υψηλή ευπλαστότητα και η θερμική αγωγιμότητα. Μια εφαρμογή τέτοιου είδους κατάλυσης είναι η απομάκρυνση του οξειδίου του αζώτου από τις εξατμίσεις των ενεργειακών εγκαταστάσεων.[4]

### **Αποθήκευση και διακίνηση υγρών**

Μια από τις παλαιότερες εφαρμογές της κονιομεταλλουργίας στην τεχνολογία των πορώδων υλικών είναι η αυτολίπανση των εδράνων ολισθήσεως, στα οποία το λάδι αποθηκεύεται στα διάκενα μεταξύ των εξαρτημάτων και μπορεί να ρέει αργά, έτσι ώστε να αντικαθιστά το «δουλεμένο» λάδι. Οι εφαρμογές αυτές δεν περιορίζονται μόνο στο λάδι. Μπορεί να γίνει κατακράτηση νερού και σταδιακή απελευθέρωση του για ελεγχόμενη υγρασία.

Τα αρώματα επίσης μπορούν να αποθηκευτούν και να απελευθερώνονται σταδιακά.

Πορώδη ελάσματα μπορούν να συγκρατήσουν και να παροχετεύσουν νερό ή συναφή, σε επιφάνειες.

Καθώς επίσης ο μεταλλικός αφρός μπορεί να μειώσει τις ανεπιθύμητες μετακινήσεις υγρών μέσα σε δεξαμενές καυσίμου.

### **Κατασκευαστικά υλικά**

Ξανά, ο συνδυασμός χαμηλού βάρους και καλών μηχανικών ιδιοτήτων των μεταλλικών αφρών μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμος στις κατασκευές.

Οι δομές τύπου σάντουιτς και στύλοι γεμισμένοι με αφρό μπορούν να αντικαταστήσουν τις μέχρι τώρα πρακτικές.

Δοκοί, πλάκες και περιβλήματα μπορούν κάλλιστα να κατασκευάζονται από μεταλλικούς αφρούς.

Οι οικοδομικές απαιτήσεις σε αντοχή, κόπωση και λειτουργικότητα μπορούν να καλυφθούν άνετα και να συνδυαστούν με χαμηλό βάρος, αυξημένη απορρόφηση ενέργειας αλλά και μερικές μη κατασκευαστικές ιδιότητες όπως η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και η απορρόφηση κραδασμών.

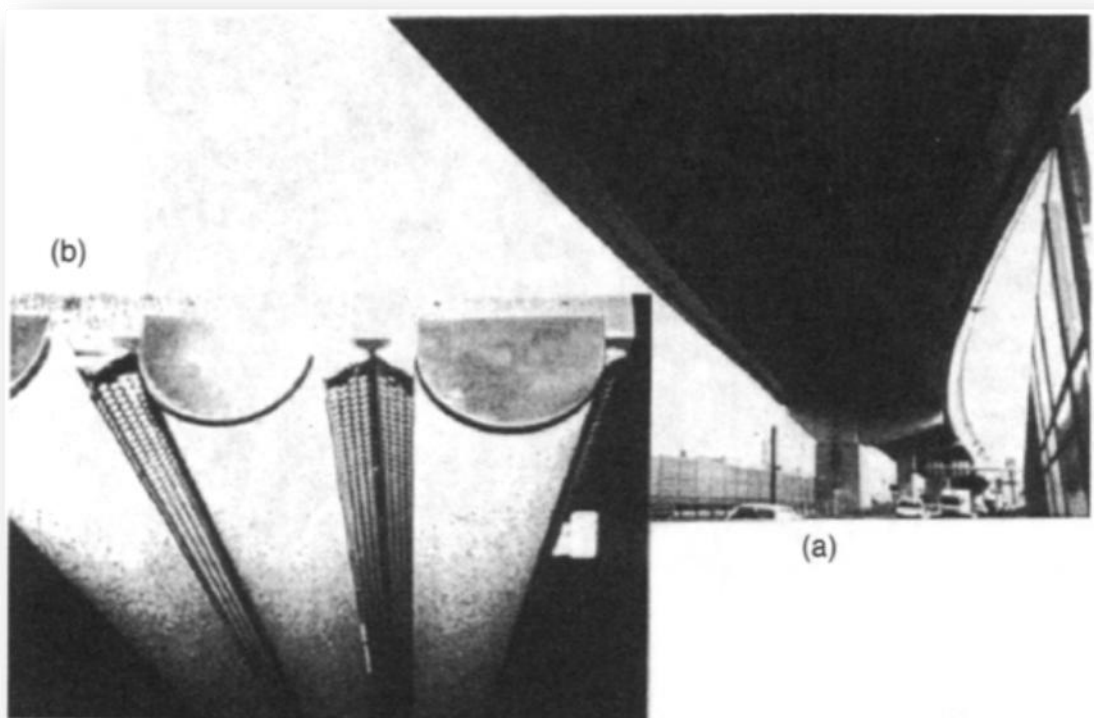
Ιδανικό υλικό για αυτές τις εφαρμογές είναι ο αφρός χάλυβα.

Επίσης αφροί Νικελίου έχουν χρησιμοποιηθεί σε πλακίδια θέρμανσης δαπέδου.

Μια άλλη χρήσιμη ιδιότητα για τα κτίρια είναι η άριστη ηχομόνωση.

Πλάκες από αφρό αλουμινίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ηχοαπορροφητικά υλικά σε σιδηροδρομικές σήραγγες ή κάτω από γέφυρες αυτοκινητόδρομου.

Αφροί αλουμινίου ή φύλλα αφρού θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση κατανάλωσης ενέργειας των ανελκυστήρων από μια ελαφριά κατασκευή πεδίο εφαρμογής λόγω του ελαφρού βάρους είναι οι ανελκυστήρες από μια ελαφριά κατασκευή[1,4].



α) Ηχομονωτική επένδυση στην κάτω πλευρά ενός αυτοκινητόδρομου, γέφυρα  
β) τα ηχοαπορροφητικά στοιχεία διαμορφώνονται σαν ημικυκλικούς σωλήνες[1]



## **Μεταλλικοί αφροί στο νοικοκυριό και στη βιομηχανία επίπλων**

Αφροί αλουμινίου μπορούν αν χρησιμοποιηθούν σε λάμπες, τραπέζια ή οικιακά σκεύη και αξεσουάρ.

Έπιπλα φτιαγμένα από αφρώδη υλικά είναι ελαφρύτερα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε γραφεία και εκθέσεις.[1]

## **Βιοϊατρική**

Αφροί τιτανίου ή κοβαλτίου-χρωμίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή προσθετικών μελών ή οδοντικών εμφυτευμάτων, χάρη στη βιοσυμβατότητά τους.

Η δυνατότητα κατασκευής αφρών με συγκεκριμένο μέτρο ελαστικότητας επιτρέπει την κατασκευή μελών ή εμφυτευμάτων που θα ταιριάζουν απόλυτα με τα οστά που θα συνεργάζονται..

Ιδιαίτερα ξεχωριστή είναι η κατασκευή τεχνητών βάσεων για ιστούς από αφρό τιτανίου με κατάλληλη διαπερατότητα και μηχανικές ιδιότητες .[4]

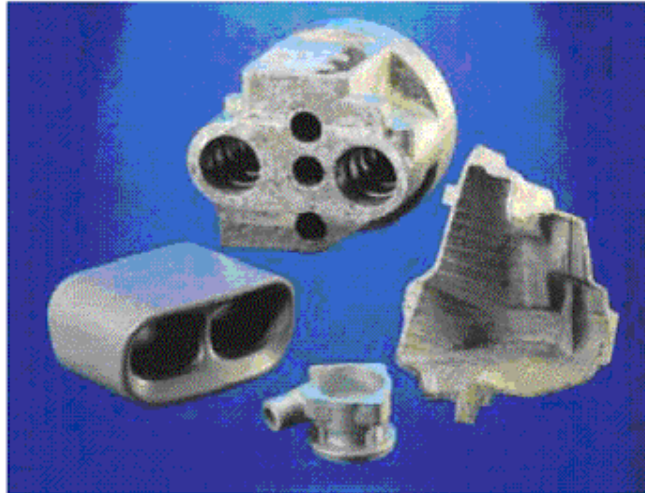
## **Καταλυτικές εφαρμογές**

Η αποτελεσματικότητα της κατάλυσης εξαρτάται από το μέγεθος της διεπιφάνειας μεταξύ του καταλύτη και του αερίου ή του υγρού που αντιδρά.

Για το λόγο αυτό, οι καταλύτες δημιουργούνται με υψηλό πορώδες και, εάν αυτό είναι αδύνατο, εφαρμόζονται σε άλλα πορώδη συστήματα όπως ένα πορώδες υλικό.

Τα κυψελοειδή μέταλλα μπορούν να αντικαταστήσουν τέτοια κεραμικά, ακόμα και αν δεν μπορούν να τα συναγωνιστούν στην επιφανειακή περιοχή, εξαιτίας της ύπαρξης άλλων χρήσιμων ιδιοτήτων, όπως είναι η υψηλή ευπλαστότητα και η θερμική αγωγιμότητα.

Μια εφαρμογή τέτοιου είδους κατάλυσης είναι η απομάκρυνση του οξειδίου του αζώτου από τις εξατμίσεις των ενεργειακών εγκαταστάσεων.[4]



Πολύπλοκα εξαρτήματα από αφρό αλουμινίου

### **Ανακύκλωση**

Οι αφροί αλουμινίου ανακυκλώνονται με την ίδια ευκολία όπως και το “πυκνό” αλουμίνιο.

Σε κάποιες περιπτώσεις όταν έχουμε πολύ χαμηλή πυκνότητα ή πολύ μεγάλα κομμάτια είναι καλύτερα αυτά να συμπιεστούν πριν την τήξη.

Η ανακύκλωση γίνεται όχι μόνο για περιβαλλοντολογικούς λόγους αλλά και γιατί είναι μια επικερδής διαδικασία για την βιομηχανία του αλουμινίου.

## **8. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ**

Σημαντική πρόοδος έχει επιτευχθεί στην ανάπτυξη των μεταλλικών αφρών.

Ως νέα υλικά με πολλές μοναδικές ιδιότητες, οι μεταλλικοί αφροί μπορούν να έχουν πολλές μελλοντικές χρήσεις.

Νέες εφαρμογές αναμένονται να βρεθούν στις οποίες οι μεταλλικοί αφροί θα αποτελέσουν το βασικό στοιχείο που θα επιτρέπουν σε ειδικές συσκευές να κατασκευασθούν.

Ωστόσο, οι αφροί έχουν πολλούς ανταγωνιστές, πολλοί από τους οποίους έχουν χαμηλότερο κόστος.

Φαίνεται σημαντικό να βελτιωθούν οι κατασκευαστικές μέθοδοι, ώστε να είναι δυνατή μια ευρύτερη ποικιλία προϊόντων μεταλλικών αφρών με χαμηλότερο κόστος.

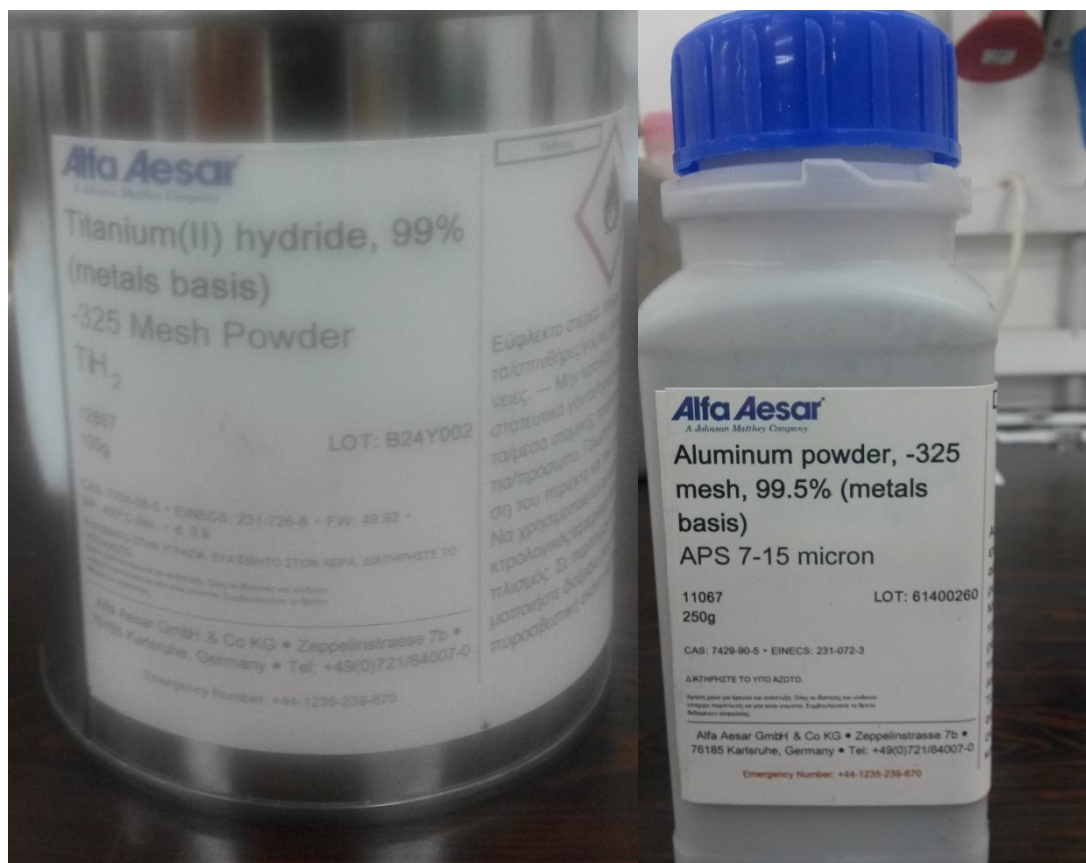
Αυτό θα επέτρεπε μια μεγαλύτερης κλίμακας βιομηχανική χρήση αυτών των υλικών.

## 9. ΠΡΩΤΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Ο μεταλλικός αφρός που αποτέλεσε θέμα αυτής της συγκεκριμένης πειραματικής διαδικασίας κατασκευάστηκε με την ανάμιξη σκόνης αλουμινίου με αφριστικό παράγοντα υβρίδιο τιτανίου.

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν είναι

1. Σκόνη αλουμινίου APS-77-IS micron απο την εταιρία Alpha Aeron με καθαρότητα 99,8% .
2. Σκόνη  $TiH_2$ (titanium(II)hydride)-325 mesh powder με καθαρότητα 99% από την εταιρία Alpha Aesor που χρησιμοποιείτε ως αφριστικός παραγοντας.



Το μείγμα μας προκύπτει από ανάμιξη σκόνης αλουμινίου και υβριδίου τιτανίου με περιεκτικότητα 0,6% w/w.

Στη συνέχεια το μείγμα τοποθετείται σε δοχείο, όπου με τη βοήθεια τόννου γίνεται η ανάδευση με σκοπό την ομοιόμορφη κατανομή του υβριδίου τιτανίου στο μείγμα. Η ανάδευση διαρκεί περίπου 30min.



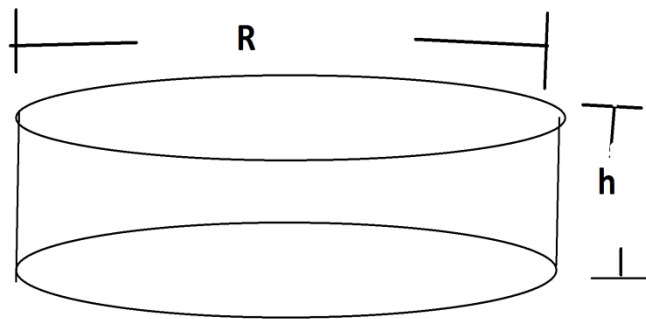
*Τόννος με τη βοήθεια του οποίου πραγματοποιείται η ανάδευση*

Στη συνέχεια μεταφέρουμε το μείγμα σε 8 δοχεία με τη βοήθεια σπάτουλας ενώ παράλληλα τα ζυγίζουμε σε ζυγαριά ακριβείας.

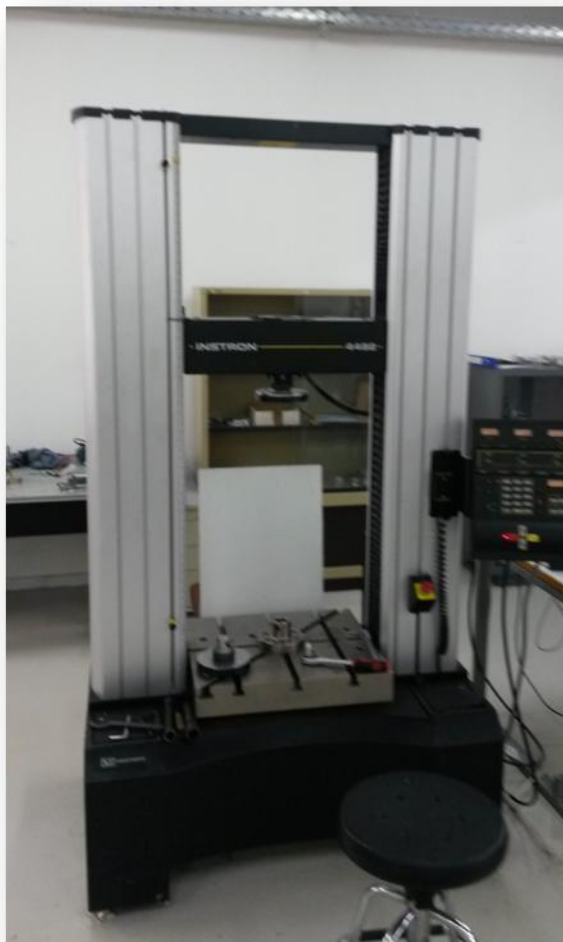
Αμέσως μετά μεταφέρουμε το περιεχόμενο του καθενός δοκιμίου σε πρέσα 10 τόνων και συμπιέζουμε, έτσι προκύπτουν 8 δοκίμια.



*Δείγμα δοκιμίου*



*Η διάμετρος είναι σταθερή για όλα τα δοκίμια  $R=25.01mm$*



*Πρέσα κονιομεταλλουργίας 10 τόνων*

Από τα 8 δοκίμια που παρασκευάσαμε απορρίπτουμε τα 4 διότι παρατηρήθηκαν μικρορωγμές στην επιφάνεια τους.

Τα υπόλοιπα 4 που τα επιλέξαμε τα μεταφέρουμε διαδοχικά σε πρέσα 100 τόνων και τα συμπιέζουμε σε διαφορετικές πιέσεις.

Το πρώτο το συμπιέζουμε μέχρι 420KN, το δεύτερο το συμπιέζουμε μέχρι 480KN, το τρίτο το συμπιέζουμε μέχρι 520KN και τέλος το τέταρτο πάλι 520KN.



*Πρέσα 100 τόνων*

Τέλος μεταφέρουμε τα πρόδρομα δοκίμια σε επαγωγικό φούρνο που τον έχουμε ρυθμίσει στους 755°C.





*Επαγωγικός φούρνος 1200°C*

Η παρατήρηση της διαδικασίας του ψησίματος γίνεται με κάμερα που έχουμε τοποθετήσει στη κεντρική οπή του φούρνου την οποία έχουμε καλύψει με πυρίμαχο γυαλί, έτσι ώστε να έχουμε την ελάχιστη απώλεια θερμοκρασίας.

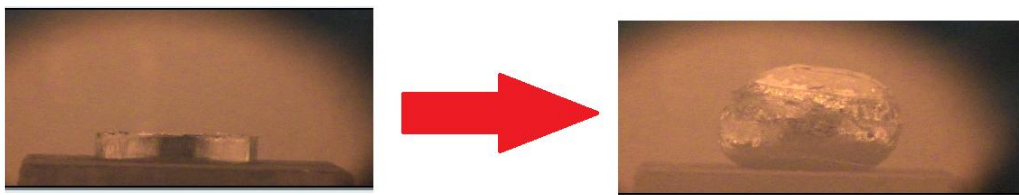


*Πυρίμαχο γυαλί τοποθετημένο στη κεντρική οπή του φούρνου*

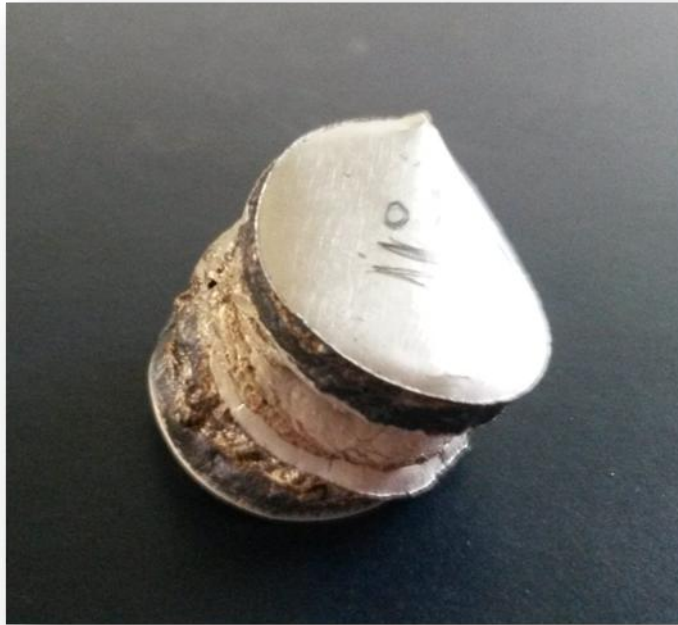


Το πρώτο δοκίμιο παραμένει στο φούρνο 7:03min, το δεύτερο δοκίμιο παραμένει στο φούρνο 6:35min, το τρίτο 7:33min ,τέλος το τέταρτο δοκίμιο καταστράφηκε.

Δοκίμιο	KN	Χρόνος εξόδου από τον φούρνο(minutes)
1	420	7:03
2	480	6:35
3	520	7:33
4	520	Έπεσε κατά την έξοδο



**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ:**



*Εικονικό αποτέλεσμα 1<sup>ου</sup> δοκιμίου.*



*Εικονικό αποτέλεσμα 2<sup>ου</sup> δοκιμίου.*



*Εικονικό αποτέλεσμα 3<sup>ου</sup> δοκιμίου.*



*Εικονικό αποτέλεσμα 4<sup>ου</sup> δοκιμίου, που καταστράφηκε.*

## 9.1 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ:

Για τη παρατήρηση της εσωτερικής μορφολογίας των δοκιμίων, τα κόβουμε εγκάρσια με δισκοτόμο



*Δισκοτόμος*

## ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΟΜΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ



*Εσωτερική δομή 1<sup>ο</sup> δοκιμίου*



*Εσωτερική δομή 2<sup>ο</sup> δοκιμίου*



*Αποτελέσματα 3<sup>ο</sup> δοκιμίου*

## **10. ΔΕΥΤΕΡΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ**

Επαναλαμβάνουμε την ίδια πειραματική διαδικασία, με σκοπό να φτιάξουμε 4 δοκίμια, με τη διαφορά ότι μεταφέρουμε τη σκόνη ( μείγμα αλουμίνιου με αφριστικό παράγοντα υβρίδιο τιτανίου) απευθείας στη πρέσα 100 τόνων.

Το πρώτο δοκίμιο το συμπιέζουμε στα 420KN, το δεύτερο το συμπιέζουμε στα 430KN, το τρίτο στα 470KN και το τέταρτο στα 520KN. Στη συνέχεια μεταφέρουμε τα δοκίμια διαδοχικά στο φούρνο.

Το πρώτο δοκίμιο το αφήνουμε 6:02min, το δεύτερο 7:06min , το τρίτο 7:04min και τέλος το τέταρτο 7:14min.



*Εικονικά αποτελέσματα 1<sup>ου</sup> δοκιμίου*





*Εικονικά αποτελέσματα 2<sup>ου</sup> δοκιμίου*



*Εικονικά αποτελέσματα 3<sup>ου</sup> δοκιμίου*



*Εικονικά αποτελέσματα 4<sup>ου</sup> δοκιμίου*

Για τη παρατήρηση της εσωτερικής μορφολογίας των δοκιμίων τα κόβουμε πάλι εγκάρσια με δισκοτόμο.  
Κατ'αυτόν τον τρόπο παρατηρούμε την εσωτερική δομή τους.



*Εσωτερική δομή 1<sup>ου</sup> δοκιμίου*





*Εσωτερική δομή 2<sup>ο</sup> δοκιμίου*



*Εσωτερική δομή 3<sup>ο</sup> δοκιμίου*



*Εσωτερική δομή 4<sup>ου</sup> δοκιμίου*

α.α.	ΠΕΙΡΑΜΑ (mm/KN/ ΔΟΚΙΜΙΟ)	FORCE - PRESSURE				ΠΡΟΔΡΟΜΟ ΔΟΚΙΜΙΟ			
		TON- FORCE	KN	MPa	DIAMETER (mm)	ΤΕΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΠΡΟΔΡΟΜΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (gr)	ΤΕΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΠΡΟΔΡΟΜΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (mm)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΠΡΟΔΡΟΜΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (g/ cm <sup>3</sup> )	ΣΧΕΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (%)
1	25/100/01	9.8354	98	199.4843	25.01	7.524	7.02	2.182	80.804
2	25/300/01	30.1083	300	610.6664	25.01	7.848	6.04	2.645	97.958
3	25/350/01	35.1264	350	712.4441	25.01	8.112	6.21	2.659	98.482
4	25/420/01	42.1517	420	854.9329	25.01	7.252	5.55	2.660	98.511
5	25/420/02	42.1517	420	854.9329	25.01	7.937	6.04	2.675	99.069
6	25/480/01	48.1733	480	977.0662	25.01	7.982	6.07	2.677	99.138
7	25/520/01	52.1878	520	1058.4883	25.01	8.01	6.06	2.691	99.650
8	25/520/02	52.1878	520	1058.4883	25.01	18.923	14.38	2.679	99.209
9	25/420/03	42.1517	420	854.9329	25.01	7.73	6.03	2.609	96.645
10	25/430/01	43.1553	430	875.2884	25.01	9.993	7.6	2.676	99.129
11	25/470/01	47.1697	470	956.7106	25.01	9.951	7.56	2.679	99.235
12	25/520/01	52.1878	520	1058.4883	25.01	9.962	7.55	2.686	99.476

<b>FURNACE TEMPERATURE (°C)</b>	<b>ΧΡΟΝΟΣ ΕΞΟΔΟΥ ΑΠΟ ΦΟΥΡΝΟ (min:sec)</b>	<b>ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΠΡΟΔΡΟΜΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ</b>	<b>ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΨΗΣΙΜΑΤΟΣ ΠΡΟΔΡΟΜΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ</b>
755	-	2/19/2015	2/25/2015
755	6:40	2/24/2015	2/25/2015
755	6:10	2/24/2015	2/25/2015
755	-	2/24/2015	2/25/2015
755	7:03	4/15/2015	4/16/2015
755	6:35	4/15/2015	4/16/2015
755	7:33	4/15/2015	4/16/2015
755	-	4/15/2015	4/16/2015
755	6:02	5/10/2015	6/5/2015
755	7:06	5/10/2015	6/5/2015
755	7:07	5/10/2015	6/5/2015
755	7:14	5/10/2015	6/5/2015

## 10.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### Παρατήρηση 1<sup>η</sup>

Από την μελέτη και ανάλυση των αποτελεσμάτων των παραπάνω δοκιμίων παρατηρούμε ότι : καθώς αυξάνεται η δύναμη συμπίεσης των πρόδρομων δοκιμίων , τόσο περισσότερο αυξάνεται ο τελικός όγκος των δοκιμίων μέσα στο φούρνο.

Το πρώτο δοκίμιο αφού το συμπίεσαμε στη πρέσα με δύναμη συμπίεσης 98 KN , στο φούρνο αυξήθηκε λίγο ο όγκος του και μετά διαλύθηκε.

Το επόμενο δοκίμιο , το οποίο συμπίεσαμε με δύναμη συμπίεσης 300 KN , πάλι αυξήθηκε ο όγκος του στο φούρνο, τα πρώτα λεπτά και στη συνέχεια σταθεροποιήθηκε.

Για τα δοκίμια που τα συμπίεσαμε με δύναμη συμπίεσης 420 και 470 KN, ο όγκος τους αυξανόταν συνεχώς σχεδόν σε όλη τη διάρκεια παραμονής τους στο φούρνο.

Τα βέλτιστα αποτελέσματα τα έχουμε για τα δοκίμια τα οποία τα συμπίεσαμε με δύναμη συμπίεσης 520 KN, όπου ο τελικός όγκος είναι περίπου τριπλάσιος του αρχικού ( πρόδρομου δοκιμίου).

Δεν χρησιμοποιήσαμε δύναμη συμπίεσης πάνω από 520 KN γιατί στην πρέσα δημιουργούνται προβλήματα.

### Παρατήρηση 2<sup>η</sup>

Παρατηρούμε ότι τα δοκίμια τα οποία συμπίεσαμε με δύναμη συμπίεσης 420 και 470 KN παρουσιάζουν ανομοιόμορφη κατανομή κυψελίδων, όπως και διαφορετικό σχήμα.

Βέλτιστα αποτελέσματα έχουμε πάλι στα δοκίμια τα οποία είχαμε συμπίεσει με δύναμη 520 KN , όπου οι κυψελίδες εμφανίζουν μια σχετική ομοιομορφία και έχουν περίπου το ίδιο σχήμα.

## 10.2 ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ

### ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ

Είναι η αντίσταση που εμφανίζει το υλικό στη διείσδυση ενός ξένου σώματος που πιέζεται στην επιφάνειά του υλικού με κάποια συγκεκριμένη δύναμη και για ορισμένη διάρκεια (στο πείραμά μας για 15sec).

### ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΟ

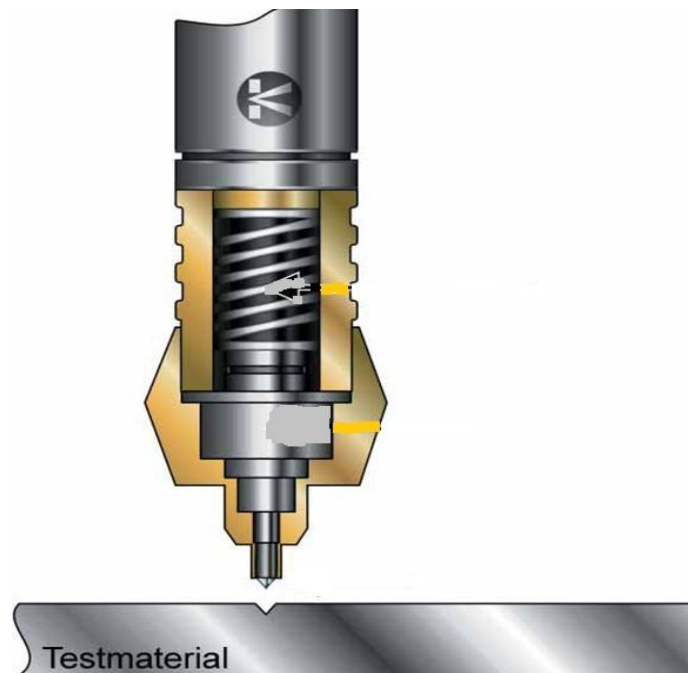
Το σκληρόμετρο με το οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις, προσομοιάζει τη σκληρομέτρηση κατά Vickers.

Μια χαλύβδινη πυραμίδα με πλευρά βάσης 5mm προσκρούει στην επιφάνεια του δοκιμίου που θέλουμε να μετρήσουμε την αντοχή με δύναμη 30KN.

Το αποτύπωμα που αφήνει μετράται με ακρίβεια δέκατου του χιλιοστού. Όσο βαθύτερο είναι το αποτύπωμα τόσο μικρότερη είναι η σκληρότητα του υλικού.



*Σκληρόμετρο*

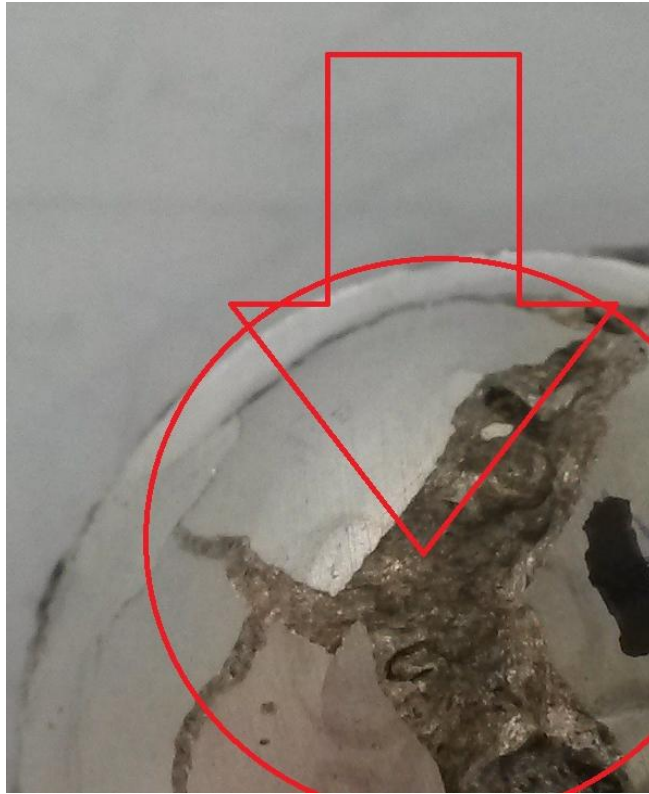


*Πυραμίδα πλευράς (στη βάση της) 5mm όπου προσκρούει στην επιφάνεια των δοκιμίων*

Αφού βγάλαμε τα δοκίμια από τον φούρνο παρατηρήσαμε την επιφανειακή μορφολογία τους.

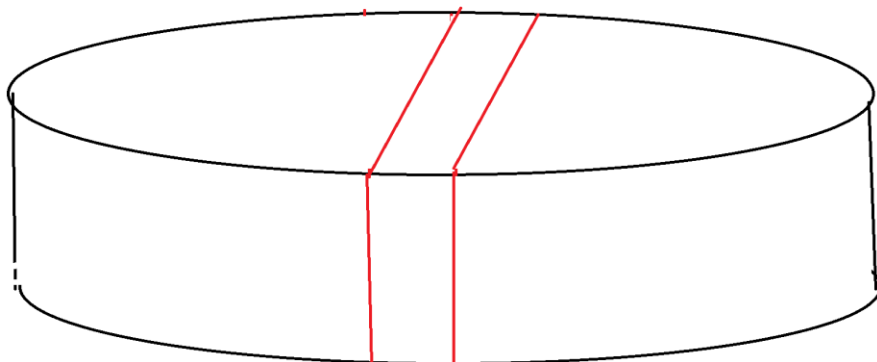
Υποθέσαμε ότι η σκληρότητα των πρόδρομων δοκιμίων στην πάνω και κάτω επιφάνεια τους να είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη σκληρότητα του εσωτερικού όγκου τους συνέπεια αυτού είναι ότι η ανω και κάτω επιφάνεια των δοκιμίων δεν επιτρέπει την ανάπτυξη του ογκου των δοκιμίων κατά τη διάρκεια παραμονής τους στο φούρνο.





**Επιφανειακή μορφολογία δοκιμίων**

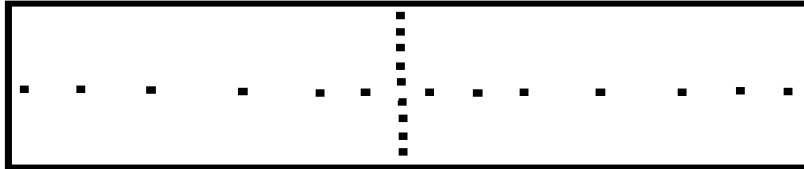
Έτσι καταστρέφουμε ένα δοκίμιο με τη δισκοτόμο με σκοπό να πάρουμε ένα δείγμα, στο οποίο έγιναν οι μετρήσεις με το σκληρόμετρο.



*Κοπή δείγματος που το έχουμε συμπιεσει με δύναμη 420KN*



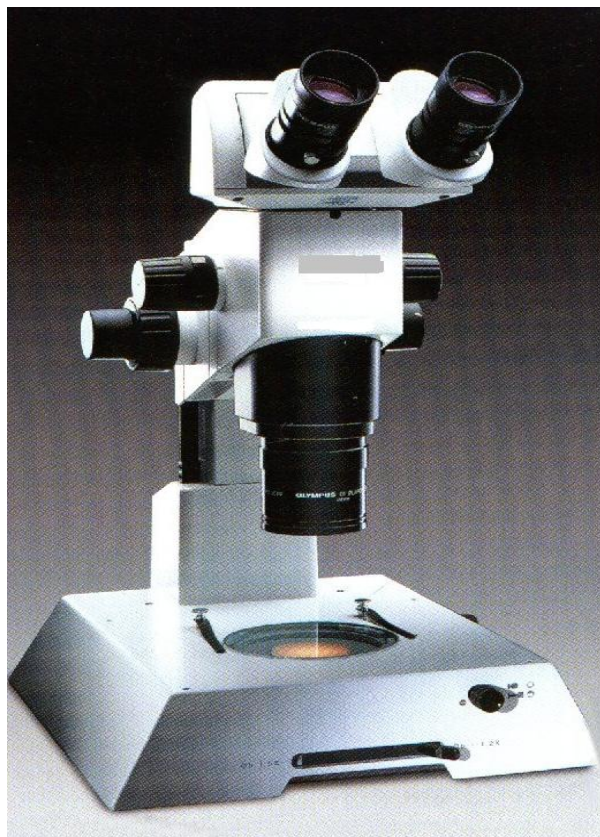
Κατ' αυτόν τον τρόπο παίρνουμε μετρήσεις με το σκληρόμετρο στο δείγμα μας, από τη κάτω έως τη πάνω επιφάνεια, παράλληλα της διαμέτρου καθώς επίσης και στην επιφάνεια του δείγματος. Η απόσταση των μετρήσεων είναι ένα χιλιοστό.



*Τρόπος με τον οποίο λαμβάνουμε μετρήσεις με το σκληρόμετρο.*

Παρατηρήσαμε ότι όλες οι μετρήσεις που πήραμε με το σκληρόμετρο σε όλες τις διαστάσεις (δηλαδή από τη κάτω έως τη πάνω επιφάνεια, παράλληλα της διαμέτρου καθώς και πάνω στην επιφάνεια) είναι ίδιες. **Συνεπώς η σκληρότητα του δοκιμίου είναι ίδια σε όλο τον όγκο του.**

### 10.3 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΟ



*Εργαστηριακό στερεοσκόπιο*

Το όργανο αυτό βρίσκει εφαρμογές εκεί που χρειαζόμαστε να παρατηρήσουμε σε μεγέθυνση την μορφολογία ενός αντικείμενου, ιστού κλπ, όταν χρησιμοποιείται προσπίπτων ή πλάγιος φωτισμός οργανισμού, ή και την εσωτερική μορφολογία διαφανών ή διαφανοποιημένων παρασκευασμάτων όταν αυτά φωτίζονται από κάτω.

Με αυτό το όργανο πετυχαίνουμε στερεοσκοπική τμήμα του δείγματος από διαφορετική γωνία.

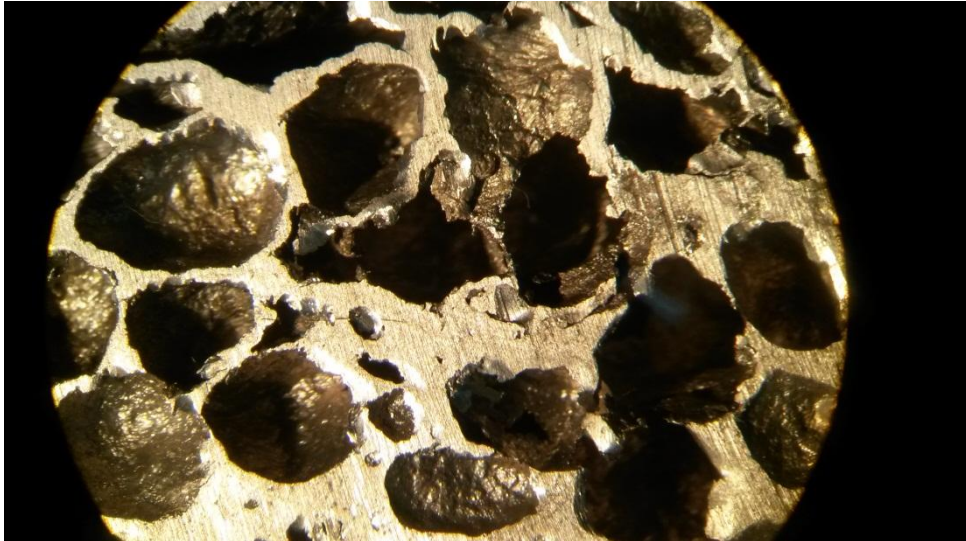
Τα στερεοσκόπια είτε έχουν αντικειμενικούς φακούς σταθερής εστιακής απόστασης (μεγέθυνσης) είτε μεταβαλλόμενης (zoom).

Συνήθως τα όργανα αυτά μπορούν να μεγεθύνουν μέχρι περίπου 80X γιατί μεγαλύτερες μεγεθύνσεις έχουν πολύ μικρό βάθος εστίασης και επομένως οι εικόνες δε μπορούν πλέον να θεωρηθούν στερεοσκοπικές.

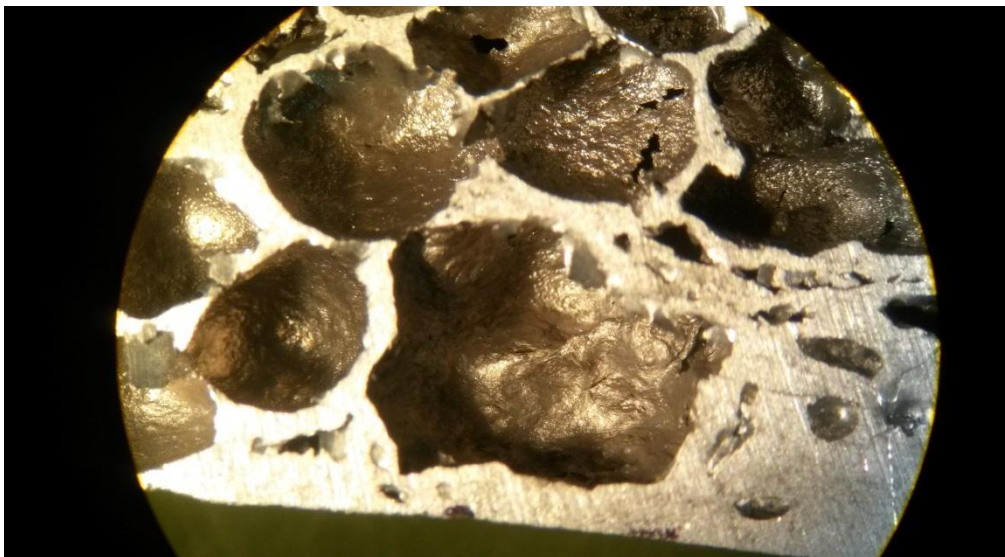
Το παρασκεύασμα συνήθως δε χρειάζεται καμία προετοιμασία και μπορεί να παρατηρηθεί αρκεί να μπορεί να τοποθετηθεί στο οπτικό πεδίο του μικροσκοπίου.

Για την ακριβή παρατήρηση της εσωτερικής δομής-μορφολογίας των κυψελών, μεταφέρουμε τα δοκίμια που έχουμε συμπιέσει με δύναμη 520KN και 470KN στο στερεοσκόπιο.

### ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

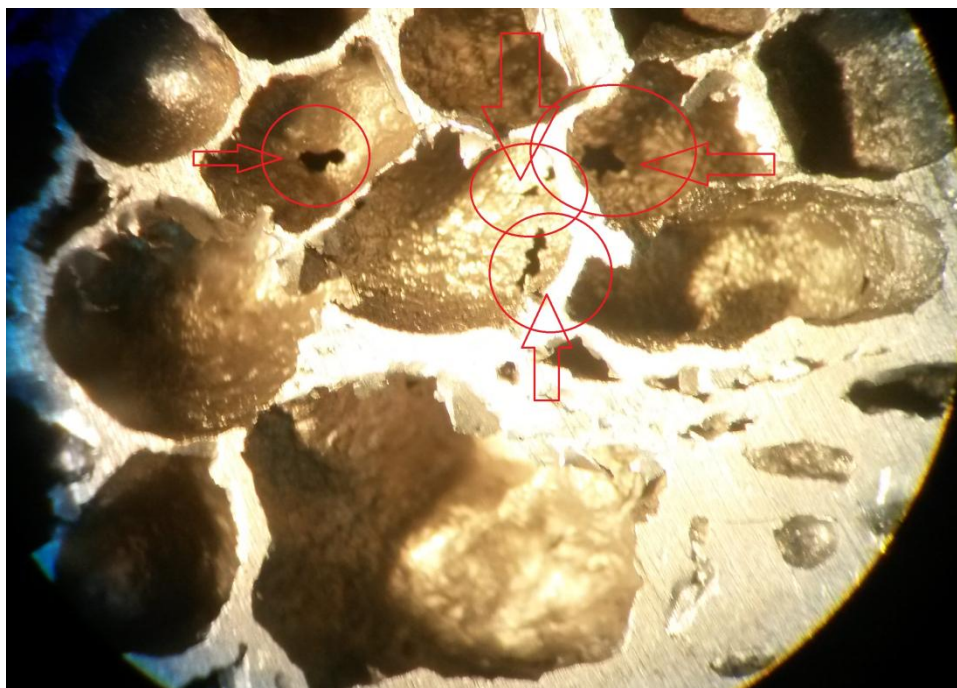


*Μορφολογία κυψελίδων 1<sup>ο</sup> δοκιμίου*



*Μορφολογία κυψελίδων 2<sup>ο</sup> δοκιμίου*

Παρατηρήσαμε μικρορωγμές στα τοιχώματα των κυψελίδων. Πιθανότατα αυτό να οφείλεται στη προσπάθειά του αερίου να διαφύγει μέσω των τοιχωμάτων, τα οποία είναι ευάλωτα σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες.



*Μικρορωγμές στα τοιχώματα των κυψελίδων*

Επίσης παρατηρούμε την ύπαρξη κυψελίδων με αρκετά μικρό όγκο και κυψελίδων με σχετικά μεγάλο όγκο. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στη συνένωση δύο ή παραπάνω κυψελίδων μεταξύ τους. Τον εργαστηριακό φούρνο τον έχουμε ρυθμίσει στους  $755^{\circ}\text{C}$ , θερμοκρασία αρκετά μεγαλύτερη από το σημείο τήξης του αλουμινίου (η θερμοκρασία τήξης του αλουμινίου κυμαίνεται από τους  $635^{\circ}\text{C}$  μέχρι  $660^{\circ}\text{C}$ ). Σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες είναι δυνατή η μετακίνηση κυψελίδων, εφόσον τα τοιχώματα είναι σε υγρή φάση.

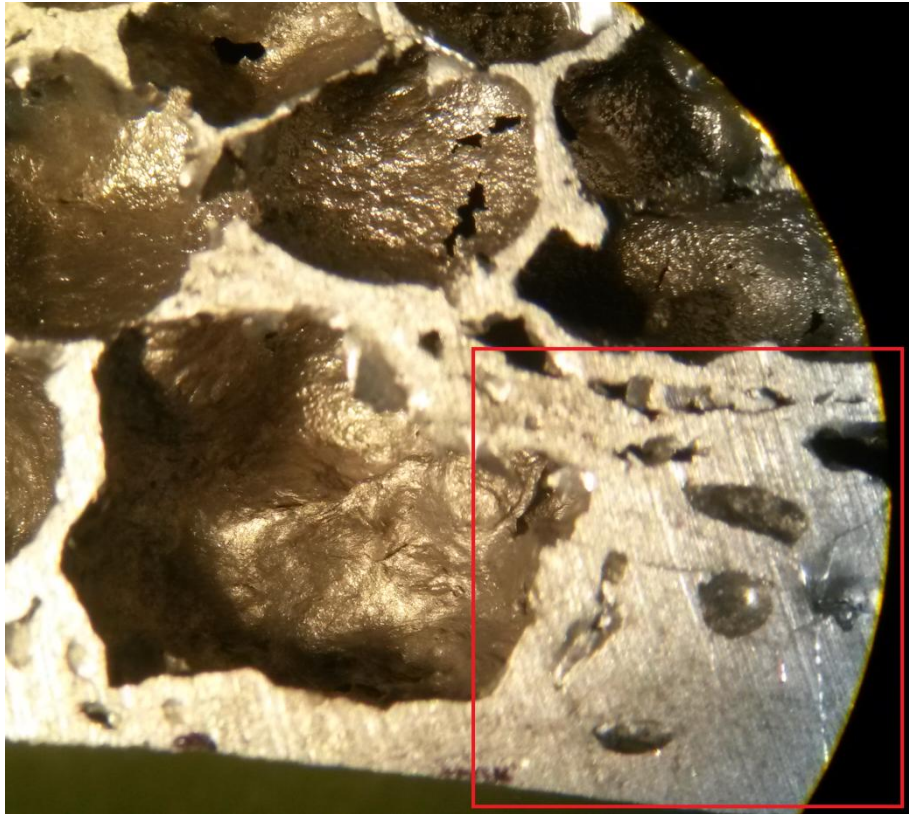




*Κυψελίδα με μεγαλύτερο όγκο σε σχέση με τις γειτονικές της κυψελίδες.*

Τέλος παρατηρούμε ένα μέρος του δοκιμίου δεν έχει κυψελίδες, η έχει πολύ μικρές κυψελίδες.

Πιθανόν αυτές οι μικρές κυψελίδες να αναπτύχθηκαν τα πρώτα λεπτά παραμονής του δοκιμίου στο φούρνο και στη συνέχεια να διέφυγε το αέριο με αποτέλεσμα τη συσσώρευση υλικού. Δηλαδή ο χρόνος ψησίματος του δοκιμίου ήταν πολύ μεγάλος.



*Μέρος του δείγματος με πολύ μικρές κοψελίδες*

## 10.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΙΝΤΕΟ

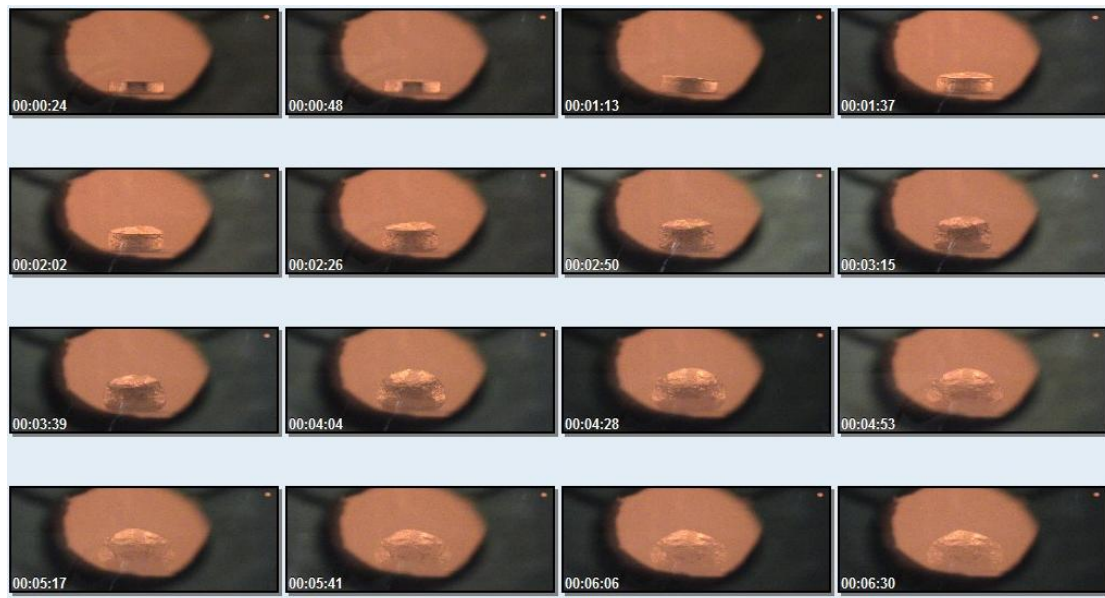
Στόχος μας είναι να βρούμε το ακριβές χρονικό διάστημα που πρέπει να βγάλουμε τα δοκίμια από τον φούρνο.

Έτσι παίρνουμε τα βίντεο από τη κάμερα μέσω της οποίας έγινε η παρακολούθηση των δοκιμίων κατά τη διάρκεια παραμονής τους στο φούρνο.

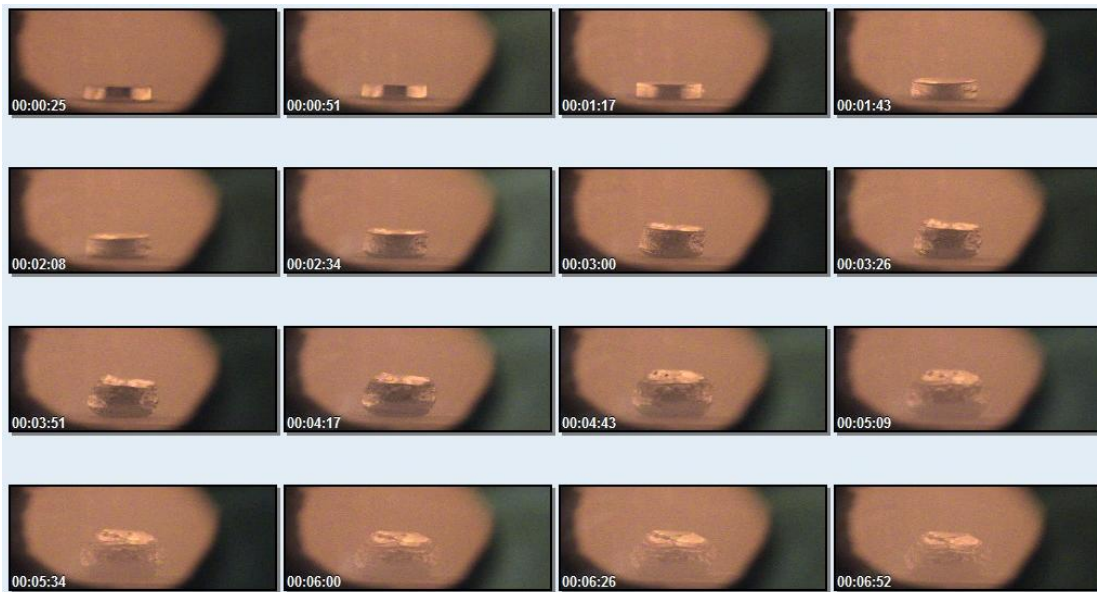
Με κατάλληλο πρόγραμμα γίνεται η επεξεργασία των βίντεο και η ανάλυση τους σε εικόνες.

Τη διαδικασία την επαναλαμβάνουμε για δύο δοκίμια . Το ένα έχει συμπιεστεί με δύναμη 470KN και το δεύτερο έχει συμπιεστεί με δύναμη 520KN.

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΙΝΤΕΟ:



*Ανάλυση βίντεο δοκιμίου που έχουμε συμπιέσει με δύναμη 470KN.*



*Ανάλυση βίντεο δοκιμίου που έχουμε συμπιέσει με δύναμη 520KN.*

Εν συνεχεία με χρήση προγράμματος επεξεργασίας εικόνας υπολογίζουμε το εμβαδόν του δοκιμίου σε κάθε χρονική στιγμή (αξίζει να σημειωθεί πως για να γίνουν οι υπολογισμοί στο πρόγραμμα δηλώνουμε μία γνωστή διάσταση, τη διάμετρο που είναι σταθερή για όλα τα δοκίμια και ίση με 25.01mm).

**Γιά το δοκίμιο που το έχουμε συμπιέσει με δύναμη 520KN:**

<b>Time(minutes)</b>	<b>A(mm<sup>2</sup>)</b>
<b>0:25</b>	<b>783</b>
<b>0:51</b>	<b>783</b>
<b>1:17</b>	<b>859</b>
<b>1:43</b>	<b>1151</b>
<b>2:08</b>	<b>1292</b>
<b>2:34</b>	<b>1353</b>
<b>3:00</b>	<b>1570</b>
<b>3:26</b>	<b>1872</b>



<b>3:51</b>	<b>2094</b>
<b>4:17</b>	<b>2307</b>
<b>4:43</b>	<b>2791</b>
<b>5:09</b>	<b>3231</b>
<b>5:34</b>	<b>3061</b>
<b>6:00</b>	<b>2812</b>
<b>6:26</b>	<b>2860</b>

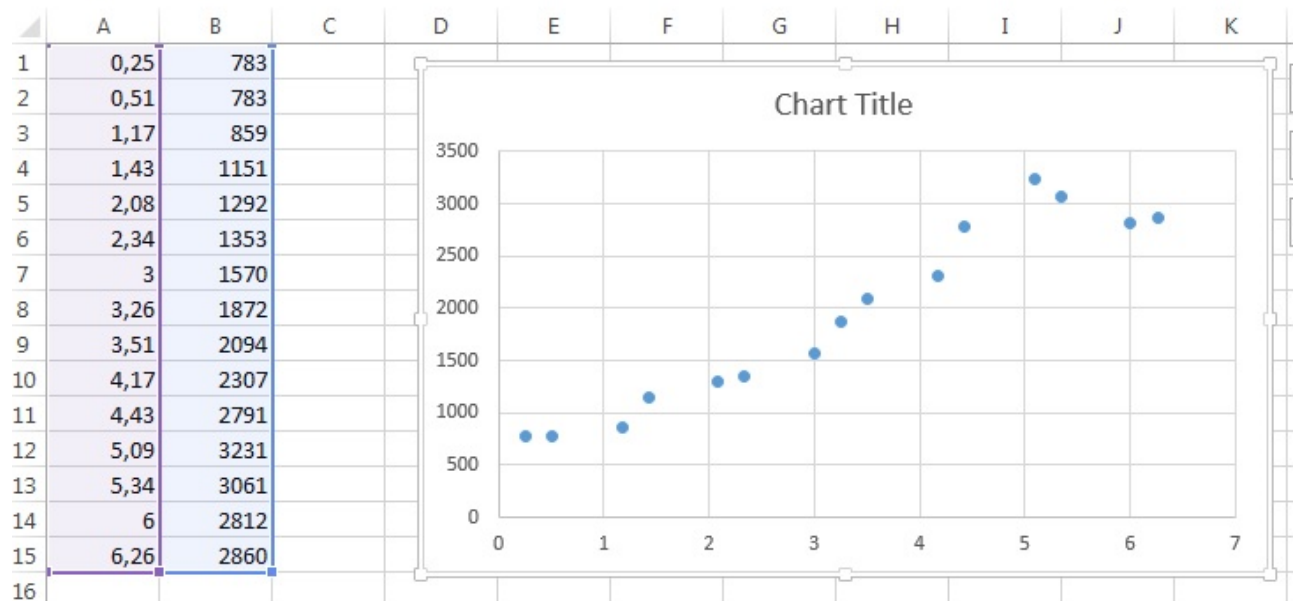
Οπότε ο χρόνος όπου το δοκίμιο αποκτά το μέγιστο όγκο είναι  $t_p = 5:09$  minutes.

Γιά το δοκίμιο που το έχουμε συμπιέσει με δύναμη 470KN:

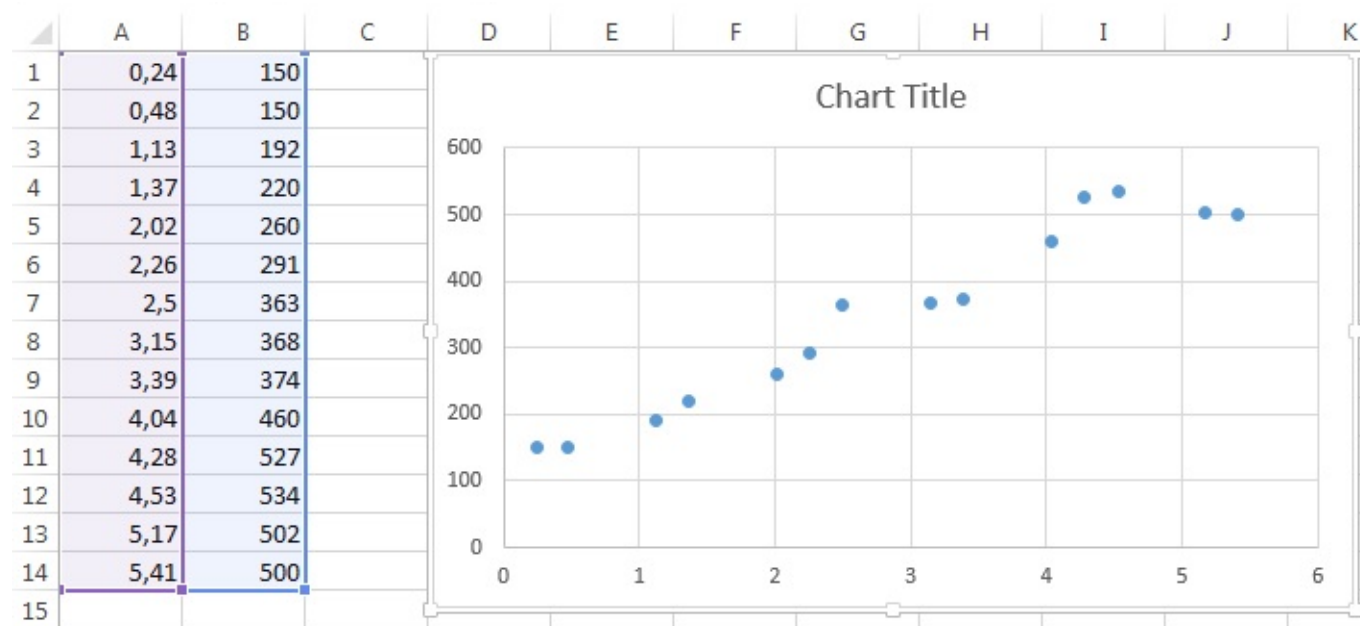
<b>Time(minutes)</b>	<b>A(mm<sup>2</sup>)</b>
<b>0:24</b>	<b>150</b>
<b>0:48</b>	<b>150</b>
<b>1:13</b>	<b>192</b>
<b>1:37</b>	<b>220</b>
<b>2:02</b>	<b>260</b>
<b>2:26</b>	<b>291</b>
<b>2:50</b>	<b>363</b>
<b>3:15</b>	<b>368</b>
<b>3:39</b>	<b>374</b>
<b>4:04</b>	<b>460</b>
<b>4:28</b>	<b>527</b>
<b>4:53</b>	<b>534</b>
<b>5:17</b>	<b>502</b>
<b>5:41</b>	<b>498</b>

Ο χρόνος όπου το δοκίμιο αποκτά το μέγιστο όγκο είναι  $t_p = 4:53$  minutes.

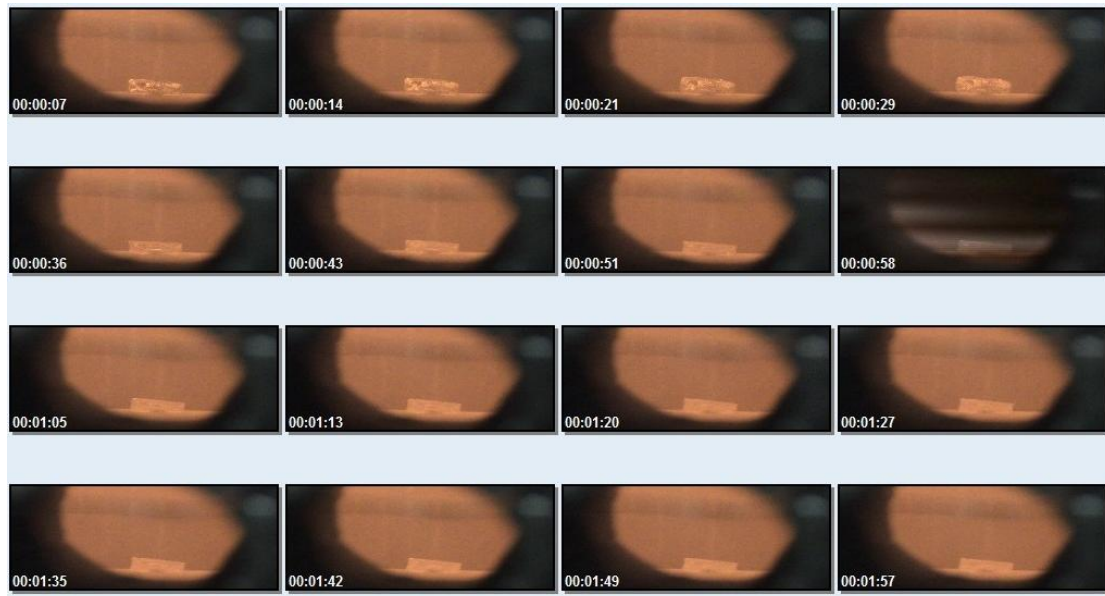
Διάγραμμα πρώτου δοκίμιου(520KN),η στήλη A δηλώνει τον χρόνο σε λεπτά και η στήλη B το εμβαδόν σε mm<sup>2</sup>



Διάγραμμα δεύτερου δοκίμιου(470KN),πάλι η στήλη A δηλώνει τον χρόνο σε λεπτά ενώ η στήλη B το εμβαδόν σε mm<sup>2</sup>



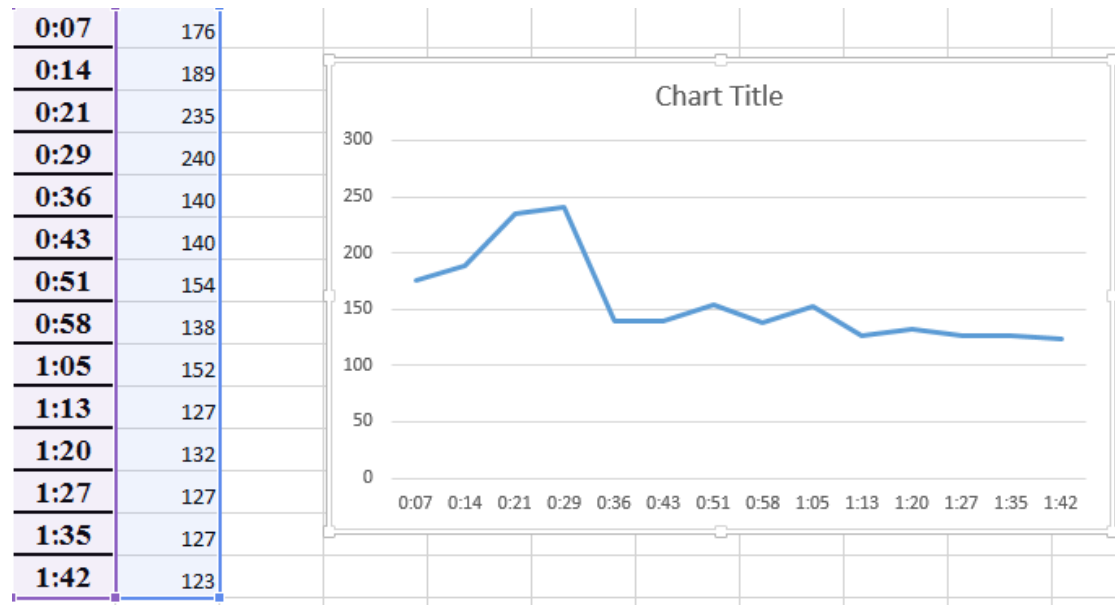
Επιπροσθέτως επεξεργαζόμαστε το βίντεο με το πρώτο δοκίμιο των πειραμάτων που το είχαμε συμπιέσει με δύναμη 100KN, καθώς επίσης και το βίντεο με το δοκίμιο που το συμπιέσαμε με δύναμη 420KN.

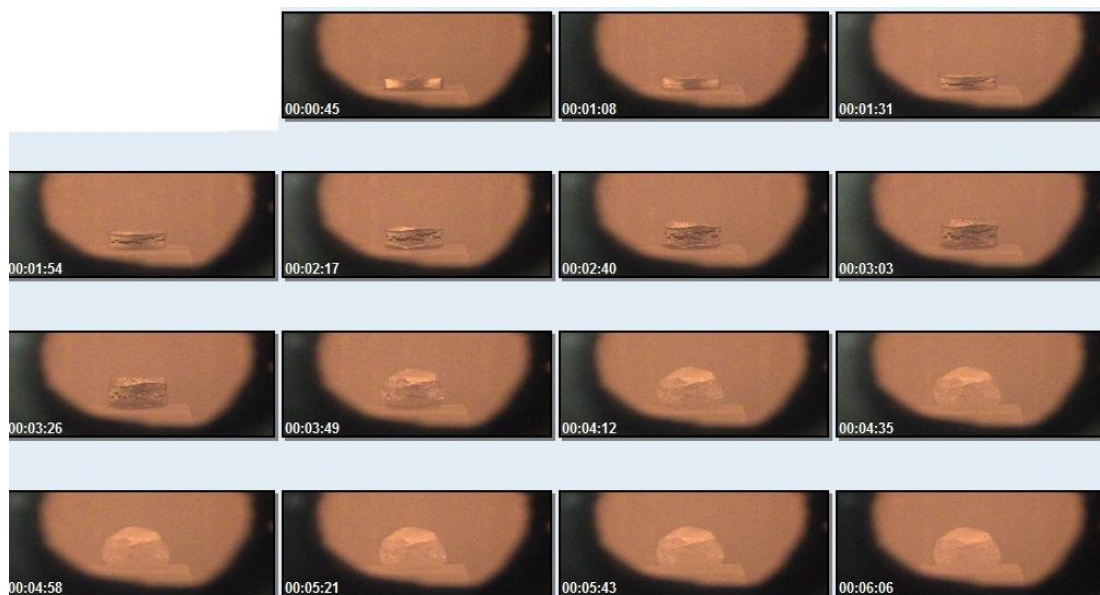


*Ανάλυση βίντεο δοκιμίου που έχουμε συμπιέσει με δύναμη 100KN*

<b>Time(minutes)</b>	<b>A(mm<sup>2</sup>)</b>
<b>0:07</b>	<b>176</b>
<b>0:14</b>	<b>189</b>
<b>0:21</b>	<b>235</b>
<b>0:29</b>	<b>240</b>
<b>0:36</b>	<b>140</b>
<b>0:43</b>	<b>140</b>
<b>0:51</b>	<b>154</b>
<b>0:58</b>	<b>138</b>
<b>1:05</b>	<b>152</b>
<b>1:13</b>	<b>127</b>
<b>1:20</b>	<b>132</b>
<b>1:27</b>	<b>127</b>
<b>1:35</b>	<b>127</b>
<b>1:42</b>	<b>123</b>

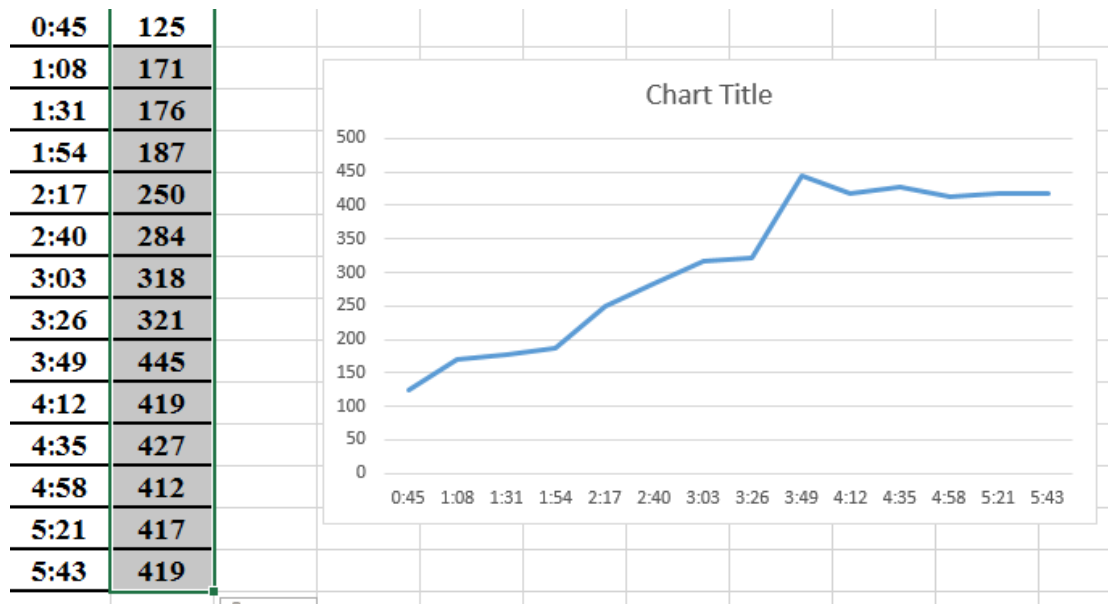
Παρατηρούμε ότι ο όγκος του δοκιμίου αυξάνεται το πρώτο λεπτό και στη συνέχεια μειώνεται.





*Ανάλυση βίντεο δοκιμίου που το έχουμε συμπιέσει με δύναμη 420KN.*

<b>Time(minutes)</b>	<b>A(mm<sup>2</sup>)</b>
<b>0:45</b>	<b>125</b>
<b>1:08</b>	<b>171</b>
<b>1:31</b>	<b>176</b>
<b>1:54</b>	<b>187</b>
<b>2:17</b>	<b>250</b>
<b>2:40</b>	<b>284</b>
<b>3:03</b>	<b>318</b>
<b>3:26</b>	<b>321</b>
<b>3:49</b>	<b>445</b>
<b>4:12</b>	<b>419</b>
<b>4:35</b>	<b>427</b>
<b>4:58</b>	<b>412</b>
<b>5:21</b>	<b>417</b>
<b>5:43</b>	<b>419</b>



*Διάγραμμα δοκιμίου που έχουμε συμπίεσει με δύναμη 420KN.*

Τέλος υπολογίζουμε το πηλίκο  $A/A_0$  δηλαδή τον τελικό προς τον αρχικό όγκο :

<b>ΔΟΚΙΜΙΑ</b>	<b><math>A/A_0</math></b>
<b>100KN</b>	<b>1.36</b>
<b>420KN</b>	<b>3.16</b>
<b>470KN</b>	<b>3.06</b>
<b>520KN</b>	<b>4.126</b>

## 10. 5 ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ

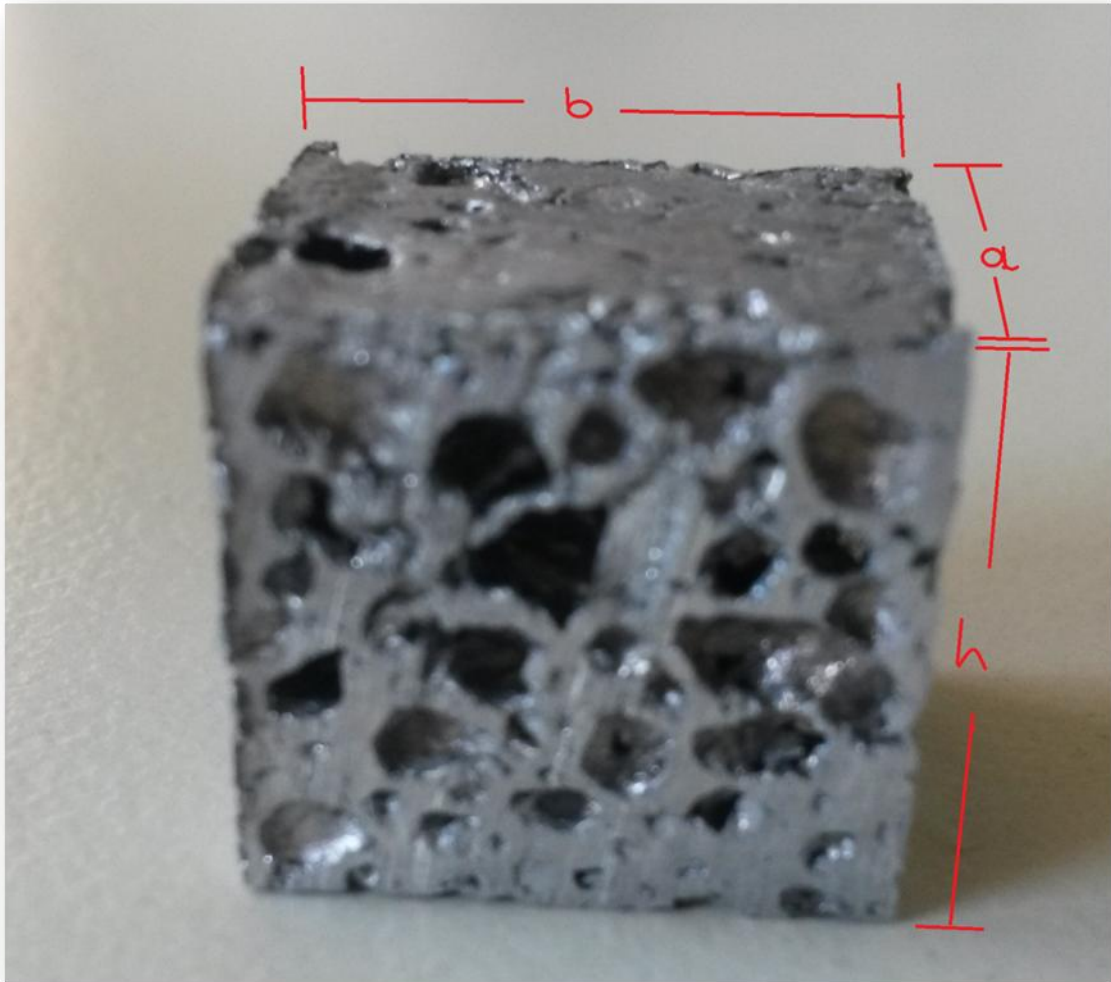
Αυτή τη φορά κατασκευάζουμε δύο δοκίμια το πρώτο δοκίμιο το συμπιέζουμε με δύναμη 520KN, η τελική μάζα του δοκιμίου είναι 11.2g η διάμετρος του  $d=25.1\text{mm}$  και το ύψος  $h=8.51\text{mm}$ . Το δεύτερο δοκίμιο το συμπιέζουμε πάλι με δύναμη 520KN έχει μάζα 18.56g και το ύψος του είναι  $h=14.8\text{mm}$ . Εν συνεχεία πάλι ρυθμίζουμε το φούρνο στους  $755^{\circ}\text{C}$ , ο χρόνος ψησίματος των πρόδρομων δοκιμίων είναι ακριβώς  $t=5:09\text{minutes}$ . Το δοκίμιο με μάζα 18.56g καταστράφηκε.

Στη συνέχεια παίρνουμε το πρώτο δοκίμιο και με τη βοήθεια της δισκοτόμου το διαμορφώνουμε κατάλληλα με σκοπό το πείραμα θλίψης.



*Μορφή δοκιμίου μετά τη δισκοτόμο*

Μετράται τις διαστάσεις του δοκιμίου καθώς επίσης υπολογίζουμε τη μάζα του  $m=2.277\text{g}$  ,ετσι ώστε να υπολογίσουμε τη πυκνότητα του.

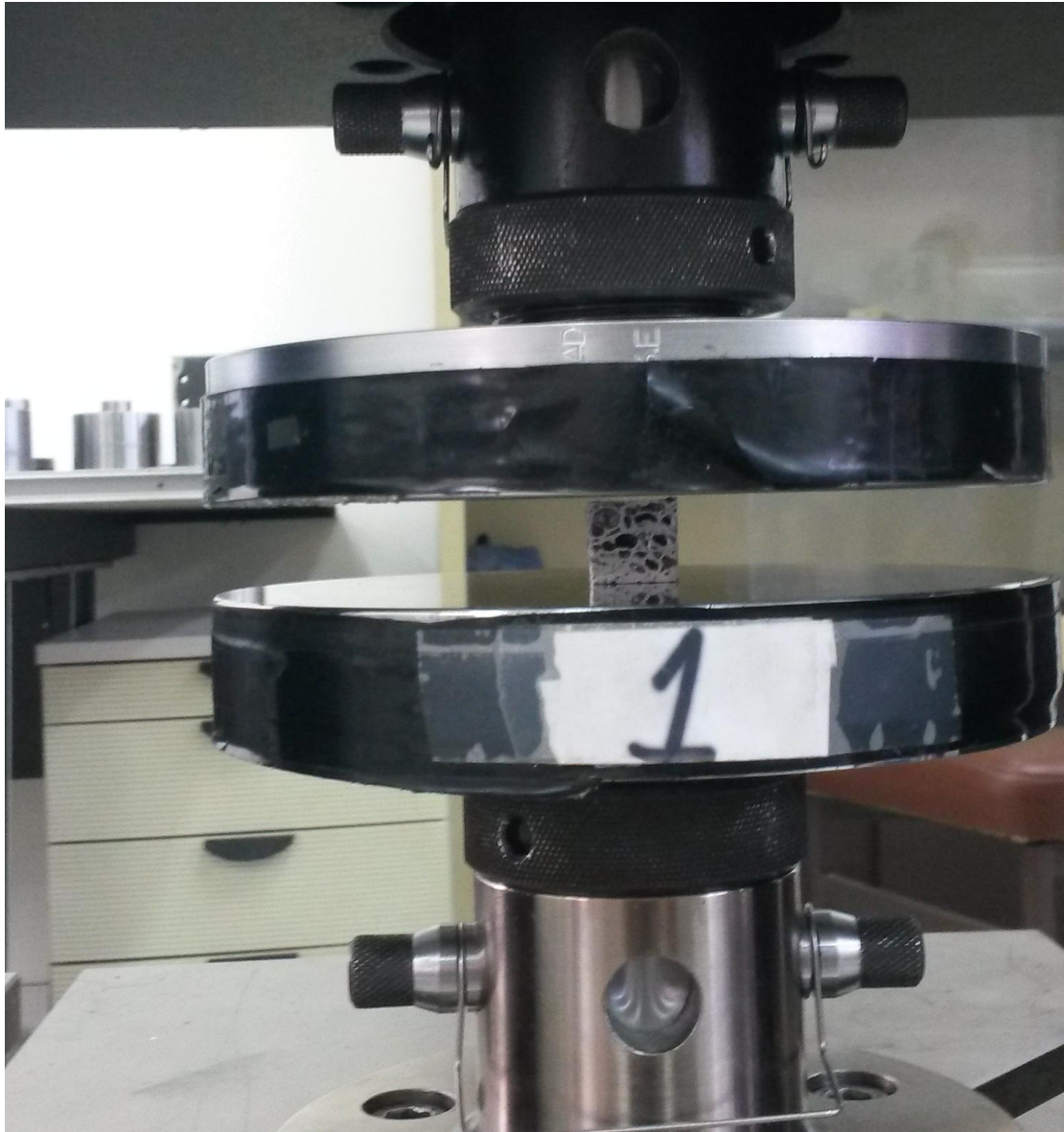


$a=15.77\text{mm}, b=12.92\text{mm}, h=14.82\text{mm}$ .

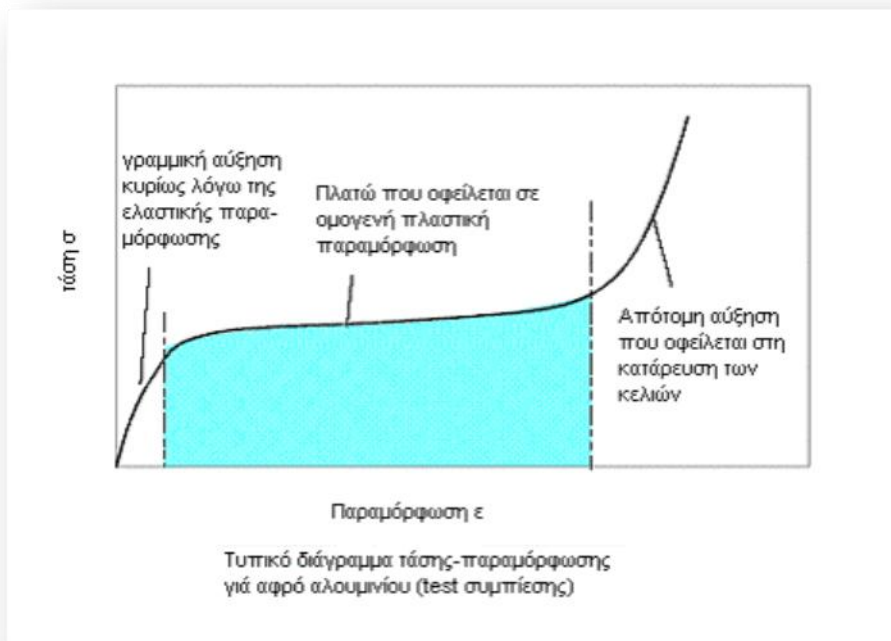
Έτσι λοιπόν η πυκνότητα του υπολογίζεται  $\rho=0.0075\text{g/mm}^3$ .



Τοποθετούμε το δοκίμιο στη πρέσα.



Η δοκιμή θλίψης μας δίνει ένα τυπικό διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης που χωρίζεται σε 3 μέρη.

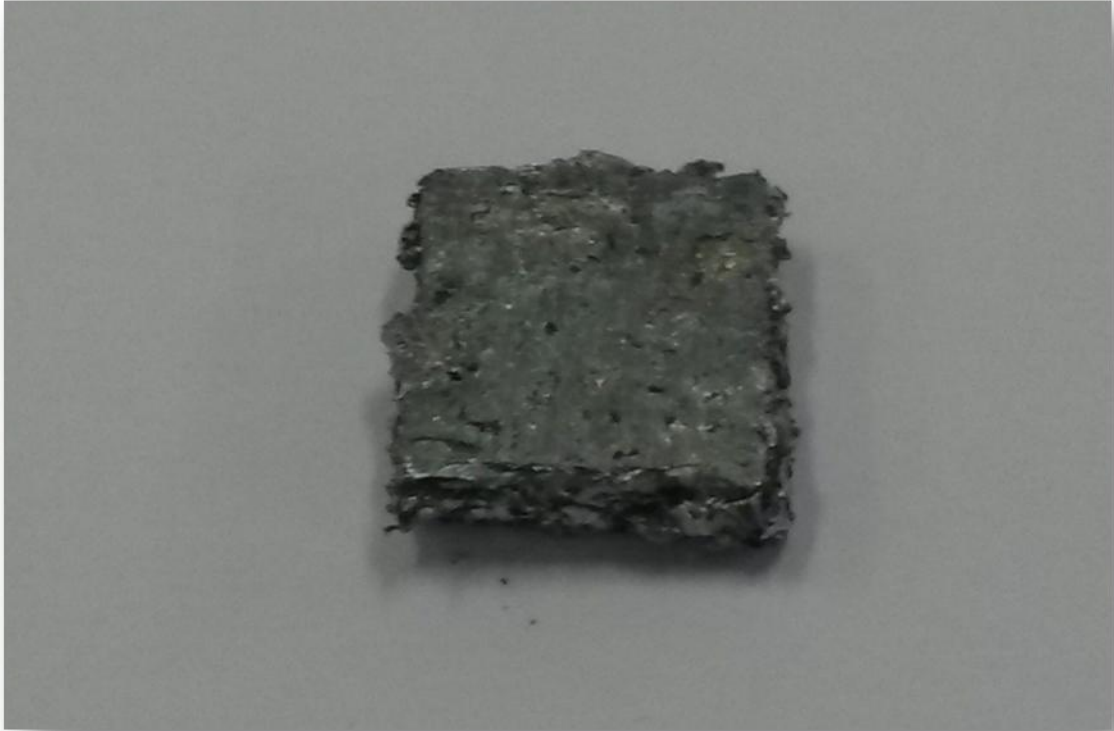


### Θεωρητική γραφική παράσταση

Το πρώτο στάδιο δεν είναι συνέπεια μόνο της ελαστικής παραμόρφωσης, όπως στην περίπτωση των μετάλλων, αλλά και της πλαστικής παραμόρφωσης. Στους αφρούς μη αντιστρεπτή παραμόρφωση μπορεί να συμβεί και σε χαμηλή τάση.

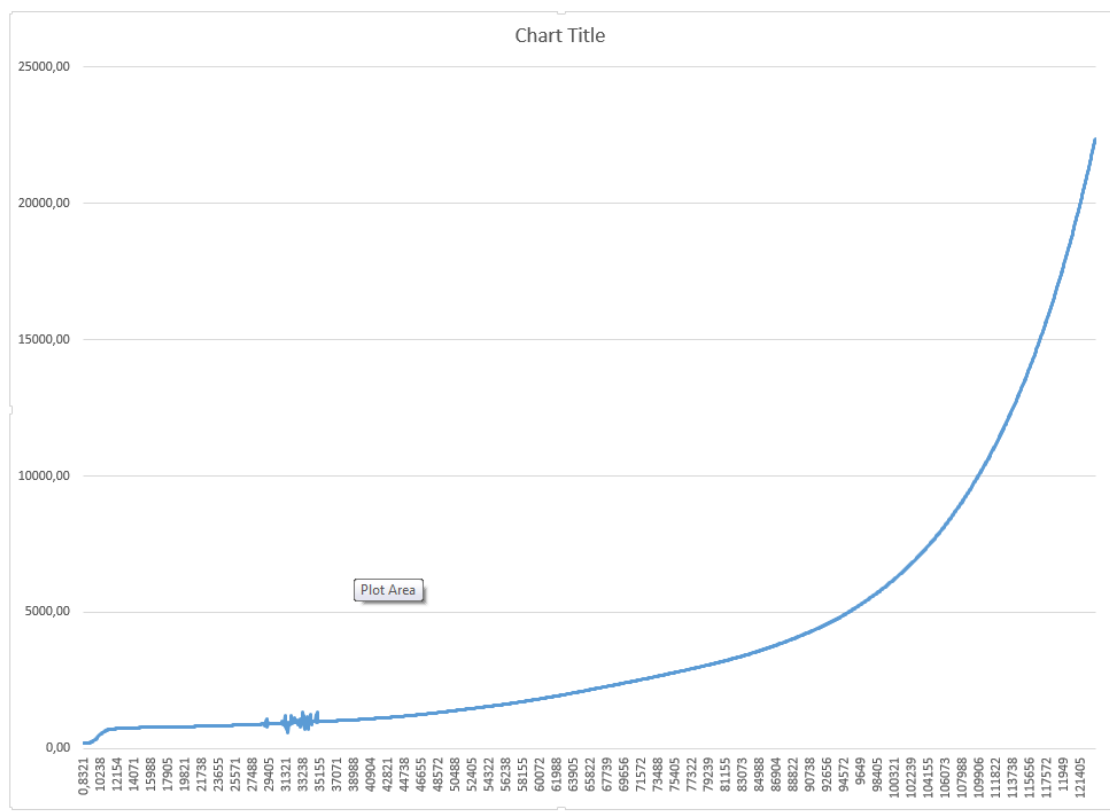
Το σχεδόν ευθύγραμμο κομμάτι εμφανίζεται λόγω μιας ομογενούς πλαστικής παραμόρφωσης.

Το τρίτο στάδιο οφείλεται στην κατάρρευση των κελιών.

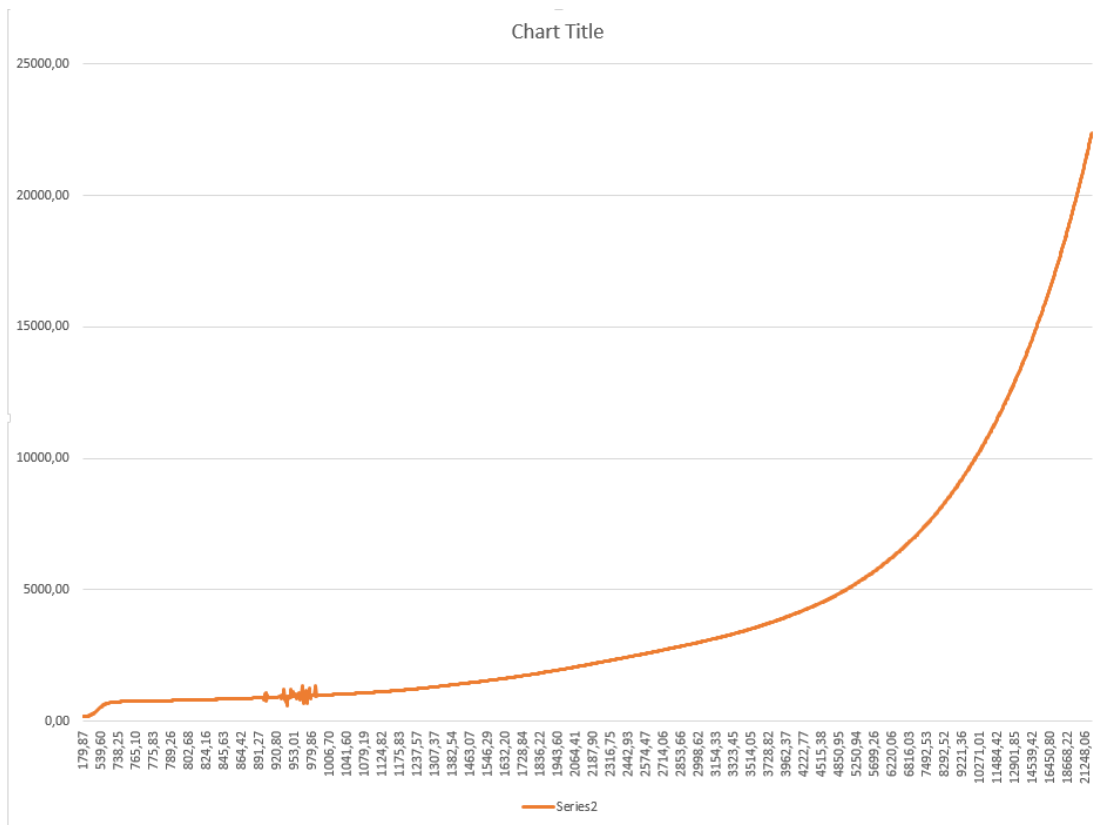


*Τρίτο στάδιο θλίψης που οφείλεται στην κατάρρευση των κελιών*

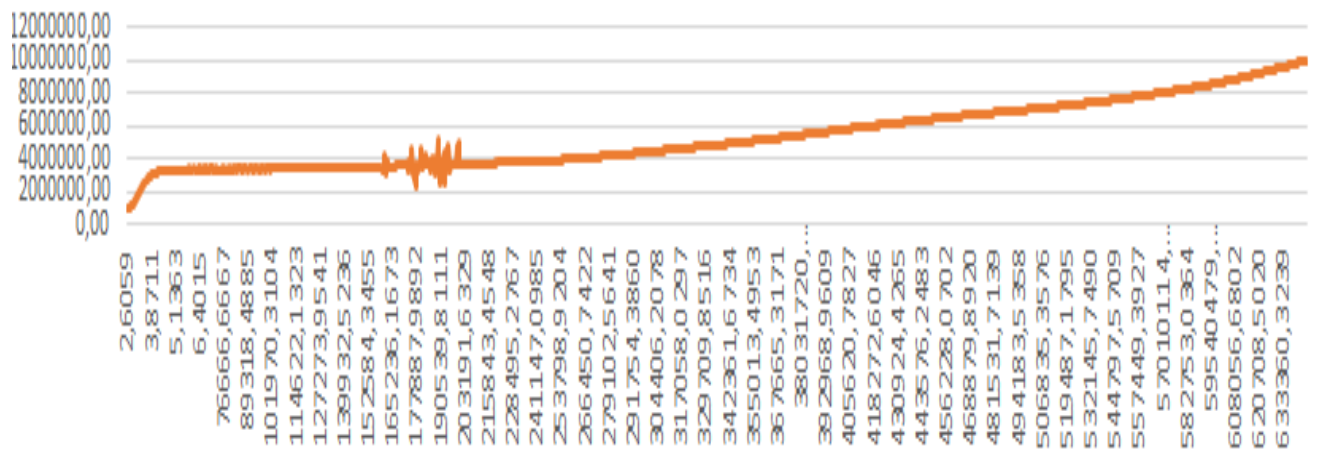
Έτσι λοιπόν με τη βοήθεια του προγράμματος excel έχουμε τις εξής γραφικές παραστάσεις:



Ο άξονας y εκφράζει τη δύναμη(N) ενώ ο άξονας x τη μετατόπιση extension(mm).



*Εδώ ο άξονας y εκφράζει τη δύναμη (N) ενώ ο άξονας x σε μονάδες (mm100/h)*



*Εδώ ο άξονας γ εκφράζει τη πίεση (Pa) ενώ ο άξονας χ σε μονάδες (mm100\h)*

## 11. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Παρά τις όποιες δυσκολίες και τα προβλήματα είναι γεγονός ότι το ενδιαφέρον για τους μεταλλικούς αφρούς συνεχώς μεγαλώνει.

Μεγάλη προσπάθεια γίνεται παγκοσμίως από πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα.

Στόχος είναι η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών παραγωγής μεταλλικών αφρών υψηλής ποιότητας, αλλά και με χαμηλό κόστος, ώστε τα προϊόντα να γίνουν ελκυστικά στη βιομηχανία μέσω μεταφοράς, κυρίως για την κατασκευή αμαξωμάτων με μικρό βάρος και υψηλή ακαμψία, καθώς και για στοιχεία απορρόφησης της ενέργειας σύγκρουσης.

Η σημερινή γενιά των μεταλλικών αφρών έχουν προφίλ δυναμικό και ο έλεγχος της επεξεργασίας βελτιώνεται ραγδαία, πολλοί βέβαια από αυτούς εξακολουθούν να είναι υπό ανάπτυξη.

Επειδή από τα μέταλλα και τα κράματα μπορούν εύκολα να παραχθούν πορώδη υλικά με αρκετά ενδιαφέρουσες ιδιότητες, προβλέπεται στο μέλλον αλματώδη ανάπτυξη αυτού του είδους των υλικών.

## 12. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Aluminium Foam Catrin Kammer Goslar Germany Fraunhofer-Institute for Applied Materials Research J. Banhart, J Banmeister.
2. Handbook of Cellular Metals – Hans Peter Desischer, Brigitte Kriszt.
3. Porous metal Russell Goodall and Andreas Mortensen.
4. John Banhart Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams.
5. [Michael-Ashby] Metal-Foams a design guide
6. Gergely, Clyne/The FORMGRIP Process: Foaming of Reinforced Metals
7. M.L. Renauld, A.F. Giamei, M.S. Thompson and J. Priluck, Porous and cellular materials for structural applications. In: D.S. Schwartz, D.S. Shih, A.G. Evans and H.N.G. Wadley, Editors, MRS Symp. Proc., vol. 521 (1998), p. 109. Abstract-Compendex.
8. Production methods for metallic foam J. Banhart, J. Baumeister  
Fraunhofer-Institute for Applied Materials Research (IFAM), Lesumer  
Heerstraße 36, 28717 Bremen, Germany, ban@ifam.fhg.de