



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ ΧΑΛΚΟΥ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΔΑΤΟΔΙΑΛΥΤΟΥ ΠΛΗΡΩΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ***
***PRODUCTION AND STUDY OF OPEN CELL COPPER FOAMS
USING AQUEOUS-SOLUBLE SPACE HOLDER PARTICLES***

ΜΑΡΝΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Κ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

**(ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π – ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ ΤΟΜΕΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ
Ε.Μ.Π.)**

Αθήνα, Ιανουάριος, 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΕΙΕΣ

Για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Δημήτρη Μανωλάκο, την τριμελή επιτροπή, τον Υ.Δ. Γιάννη Παπαντωνίου, τους Καθηγητές και τους γονείς μου.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό να συμβάλει στην μελέτη της παραγωγής μεταλλικών αφρών με την μέθοδο της κονιομεταλλουργίας αλλά και στην καταγραφή θεωρητικών μοντέλων υπολογισμού βασικών μηχανικών, θερμικών, ηλεκτρικών μεγεθών των μεταλλικών αφρών.

Κατά την παραγωγή μεταλλικών αφρών κυρίαρχο για τις μηχανικές, θερμικές, ηλεκτρικές ιδιότητες των μεταλλικών αφρών, είναι το μητρικό υλικό και κράμα που θα χρησιμοποιηθεί, γι' αυτό πρέπει να γίνει καταγραφή των ιδιοτήτων των υλικών. Για τον σκοπό αυτό, καταγράφονται οι βασικές ιδιότητες κάποιων υλικών που χρησιμοποιούνται στην κονιομεταλλουργία κατά την παραγωγή μεταλλικών αφρών. Επίσης κεφαλαιώδους σημασίας είναι η μελέτη του μεγέθους του πορώδους της δομής του, το μέγεθος των πόρων, το είδος των κελιών, τα οποία καθορίζουν τις εφαρμογές αλλά και τις μηχανικές, θερμικές, ηλεκτρικές κ.α ιδιότητες του παραγομένου αφρού.

Γίνεται παράθεση κάποιων βασικών μεθόδων παραγωγής μεταλλικών αφρών, προκειμένου να γίνει κατανοητή η προϋπάρχουσα τεχνική παραγωγής τους, καθώς και το είδος αφρών που δημιουργεί η κάθε μία, με την βιβλιογραφική καταγραφή του μεγέθους των πόρων της διανομής αυτών καθώς και το πορώδες που μπορούν να επιτύχουν.

Δίνεται έμφαση στην παραγωγή μεταλλικών αφρών με την μέθοδο της κονιομεταλλουργίας και συγκεκριμένα στις μεθόδους α) αφρών με αποπλενόμενα πληρωτικά μέσα, μετά από συμπίεση μείγματος κόνεων – πληρωτικού μέσου, απομάκρυνσή του και πυροσυσσώματωση, β) μεταλλικών αφρών από πρόδρομο μέσο που έχει παραχθεί με συμπίεση κόνεων ενός ή περισσότερων μετάλλων και παράγοντα αφροποίησης, με θέρμανσή του κοντά στο σημείο τήξης του. Αναφέρονται και εξετάζονται οι παράγοντες που καθορίζουν την παραγωγή, όπως το μέγεθος των κόκκων κόνεων, η κατεργασία του πρόδρομου, η πίεση συμπίεσης των κόνεων κλπ.

Στο τέλος του θεωρητικού μέρους παρατίθενται κάποια οικονομικά στοιχεία για την κοστολόγηση και την βιωσιμότητα διαφόρων μεθόδων παραγωγής μεταλλικών αφρών.

Στο πειραματικό μέρος, παρήχθη μεταλλικός αφρός από σκόνη χαλκού με πληρωτικό αποπλενόμενο μέσο καστανή και άσπρη κρυσταλλική ζάχαρη με συγκεκριμένες αναλογίες κόνεων.

Το πειραματικό μέρος αποτελείτο από 5 κύκλους πειραμάτων, όπου στον πρώτο παράχθηκαν 3 δοκίμια χαλκού – καστανής ζάχαρης, συμπιεσμένα σε 3 διαφορετικές πιέσεις, ενώ το ίδιο έγινε και στα δοκίμια που περιείχαν άσπρη κρυσταλλική ζάχαρη. Αναφέρθηκαν αστοχίες και έγινε η αιτιολόγησή τους. Στην συνέχεια οι δοκιμές περιορίστηκαν στην πίεση, κατά την οποία προκλήθηκαν τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα, σε σχέση με την αστοχία των δοκιμών κατά την φάση της συμπίεσης. Στην συνέχεια μελετηθήκαν στην εν λόγω πίεση η μορφή των πόρων και η δομή των αφρών με χρήση συνδετικού μέσου, σε σχέση με τα δοκίμια που δεν περιείχαν συνδετικά. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήσαμε διαφορετικό εξολκέα για να παρατηρηθεί η επίδραση αυτού στην επιτυχή συμπίεση του δοκιμίου. Μελετηθήκαν διαφορετικοί χρόνοι παραμονής των κόνεων υπό φορτίο και εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα.

Υπολογίστηκε στην βέλτιστη πίεση το μακροπορώδες και το μικροπορώδες των αφρών με συνδετικό μέσο κόνεων αιθανόλη καθώς και η σχετική τους πυκνότητα αναλυτικά, αλλά και με χρήση του προγράμματος imagej με σκοπό να γίνει συσχέτιση των δύο αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν τα συμπεράσματα που σχετίζονται με την όλη πειραματική διαδικασία παραγωγής μεταλλικού αφρού χαλκού από συμπιεσμένες κόνεις, απόπλυσης και πυροσυσσωμάτωσης. Τέλος παρατίθενται κάποια πεδία προς περαιτέρω έρευνα για την ανάπτυξη της γνώσης σχετικά με τις ιδιότητες, την βέλτιστη παραγωγή, τη δομή μεταλλικών αφρών, με την μέθοδο της κονιομεταλλουργίας, κυρίως για δύο τεχνικές, αυτής του αποπλενόμενου πληρωτικού μέσου και αυτής του πρόδρομου μέσου με παράγοντα αφροποίησης.

ABSTRACT

The present diploma thesis aims to contribute to the survey to the study of the production of metal foam by method of powder metallurgy, but also to record the theoretical calculation of basic mechanical models, thermal, electrical magnitudes of metal foams.

In the production of metal foams dominant for mechanical, thermal, electrical properties of the metal foams are the parent material and the alloy to be used must be made juxtaposition of material properties.

For this purpose, they record the basic properties of some materials used in powder metallurgy in the production of metal foams. Also crucial is the study of the size of the porous structure and the pore size as the porous type of cells to determine the size of the application and for the mechanical, thermal, electrical etc. properties of the produced foam. Perform the recording of some basic methods of production of metallic foams in order to understand their preexisting production technique and the type foams creates each with the bibliographic record of the pore size distribution of these as well as the porosity that can be achieved.

Emphasis is given in producing metal foams by the process of powder metallurgy and in particular to methods a) foams by dissolved space holders after compression of mixture – space holder powders, removal of space holder and sintering, b) metal foams by a precursor produced by compressing a powder or more metals and foaming agent by heating near the melting point.

Reported and examines the factors that determine the production of such grain size powder treatment of the precursor, the compression pressure of the powders etc.

At the end of the theoretical part is given some financial data for costing and viability of different production methods of metallic foams.

The experimental part developed metal foam production of copper powder water dissolved space holder agent brown, white granulated sugar with specific proportions powders.

It consists of 5 rounds of experiments where the first produced three copper - brown sugar specimen which compressed into 3 different pressures while the same happened on specimens which containing white crystalline sugar. Reported failures and became their justification. Then the tests were limited to the pressure at which had the most satisfactory results with respect to the failure of the samples during the phase of compression. Further experiments in this list form the pressure of resources and the structure of the foams by use of binder in relation to the test pieces containing no binders. During the experiments we used a different puller to observe the effect that the successful compression of the test piece. Studied different powder residence times under load and useful conclusions were reached

Calculated on the optimal pressure, the macro porosity and the micro porosity of the foams binder ethanol and their relative density and detail using Imagej program to make correlation of the two results. then they were given the conclusions related to the whole experimental process in relation to the literature study resulting from the production process from copper metal foam compressed doing leaching and sintering.

Finally given fields for further research into the development of our knowledge on the properties, the optimum production, and the structure of metal foams by the method of powder metallurgy mainly for two technique of water-soluble agent and that of the precursor medium foaming agent.

ΜΕΡΟΣ Α

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΣΥΝΟΨΗ- SUBSTRACK

0. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΤΑΛΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ

2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΤΥΠΩΝ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

2.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΧΥΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ ΣΤΟ ΜΙΓΜΑ

2.2. GAS RELEASING PARTICLE DECOMPOSITION IN THE MELT

2.3. GAS-RELEASING PARTICLE DECOMPOSITION IN SEMI-SOLIDS

2.4. ΧΥΤΕΥΣΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΚΕΡΙΝΟ ΠΡΟΔΡΟΜΟ Η ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ ΣΑΝ ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΜΗΤΡΑ

2.5. ΑΠΟΘΕΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΠΡΟΠΛΑΣΜΑΤΑ

2.6. ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΠΑΓΙΔΕΥΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

2.7. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΟΙΛΩΝ ΣΦΑΙΡΩΝ

2.8. ΣΥΜΠΙΕΣΗ Η ΧΥΤΕΥΣΗ ΔΥΟ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΟΠΟΙΑ ΤΟ ΕΝΑ ΕΙΝΑΙ ΔΙΗΘΗΣΙΜΟ

2.9. ΕΥΤΙΚΤΙΚΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ ΑΕΡΙΟΥ –ΜΕΤΑΛΛΟΥ.

3. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

3.1. ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

3.2. ΚΡΑΤΥΝΣΗ

3.3. ΕΡΠΥΣΜΟΣ

4. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

5. ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΟΥ

6. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΑΓΝΗΣΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΟΥ

7. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΑΛΚΟΥ ΚΑΙ ΚΡΑΜΜΑΤΩΝ ΤΟΥ

8. ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΑΛΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ

9. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΑΦΡΩΝ

- 9.1. ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ
 - 9.1.1. ΑΦΡΟΙ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΚΕΛΙΟΥ ΓΙΑ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ
 - 9.1.2. ΑΦΡΟΙ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΚΕΛΙΟΥ ΓΙΑ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ-ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΑΤΑΡΕΥΣΗΣ
 - 9.2. ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΑΦΡΩΝ
 - 9.3. ΚΟΠΩΣΗ
 - 9.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΟΥ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΤΑΣΗ ΠΛΑΤΕΑΥ
 - 9.5. ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ
 - 9.6. ΠΟΛΥΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ
10. ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ –ΑΓΩΓΗ ΣΥΝΑΓΩΓΗ –ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ –ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΣΤΟΛΗ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ
11. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΦΡΩΝ
12. ΟΙ ΜΕΤΑΛΙΚΟΙ ΑΦΡΟΙ ΩΣ ΥΛΙΚΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
13. ΟΙ ΜΕΤΑΛΙΚΟΙ ΑΦΡΟΙ ΩΣ ΥΛΙΚΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΗΧΗΤΗΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ (ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ)
14. ΥΛΙΚΑ ΑΥΞΗΜΕΝΗΣ ΑΚΑΜΨΙΑΣ – ΔΟΜΕΣ ΣΑΝΤΟΥΙΤΣ
- 14.1. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΜΑΖΑ ΜΕ ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΗ Η ΑΚΑΜΨΙΑ Η ΔΥΝΑΜΗ
 - 14.2. ΔΟΜΕΣ ΣΑΝΤΟΥΙΤΣ
 - 14.2.1. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΗ ΑΚΑΜΨΙΑ
 - 14.2.2. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
15. ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ
- 15.1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΦΡΩΝ ΜΕΣΩ ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ
 - 15.1.1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΦΡΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕ ΑΠΟΠΛΕΝΟΜΕΝΟ ΜΕΣΟ
 - 15.1.2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΦΡΟΥ ΑΠΟ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΗ ΣΚΟΝΗ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΕΣΟ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΥ ΑΠΟΣΥΝΤΙΘΕΤΑΙ ΔΙΑΣΤΕΛΛΟΝΤΑΣ ΤΟ ΚΡΑΜΑ ΣΕ ΗΜΙΣΤΕΡΕΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

(ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΤΗΞΗΣ Η ΠΟΛΥ ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΗΞΗΣ)

15.1.2.1. *ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΚΡΑΜΑΤΟΣ- ΣΚΟΝΗΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗΣ*

15.1.2.2. *ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΕΛΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΔΡΟΜΩΝ*

15.1.2.3. *ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΡΟΔΡΟΜΟΥ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗΣ*

15.1.2.4. *ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΣΤΟΛΗ ΤΟΥ ΠΡΟΔΡΟΜΟΥ*

16. **ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ**

ΜΕΡΟΣ Β

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

17. **ΠΡΩΤΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ –ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΦΡΟΥ ΧΑΛΚΟΥ ΜΕΣΩ ΑΠΟΠΛΕΝΟΜΕΝΟΥ ΜΕΣΟΥ ΑΝΑΛΟΓΙΑΣ 40 CU /60 ΚΑΣΤΑΝΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ ,40CU/60 ΑΣΠΡΗΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΜΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΗΝ ΠΙΕΣΗ**
18. **ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ**
19. **ΤΡΙΤΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ**
20. **ΤΕΤΑΡΤΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ**
21. **ΠΕΜΠΤΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ**
22. **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**
23. **ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ**

0. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μεταλλικοί αφροί είναι μια υποκατηγορία των αφρωδών υλικών η διάκριση γίνεται ανάλογα με το κύριο υλικό που αποτελούνται.

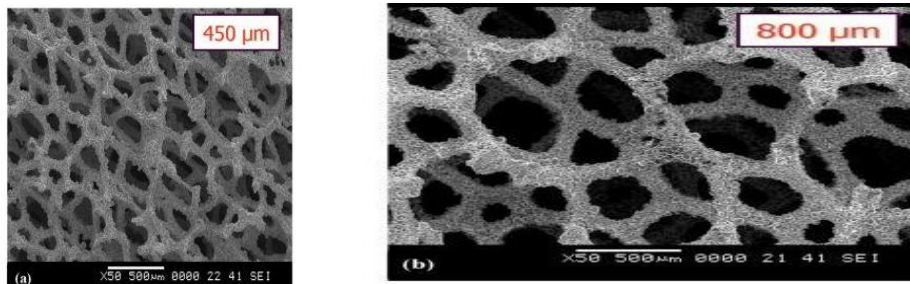
Χαρακτηριστικό τους είναι η πολύ μικρότερη πυκνότητα που οφείλεται στο πορώδες που υπάρχει ανάμεσα στο κυρίως υλικό ή κράμα του .

Ένας μεταλλικός αφρός μπορεί να διακριθεί σε 4 μεγάλες κατηγορίες :

1) Μεταλλικός αφρός ανοιχτών κελιών (ΕΙΚ. 0-1)

Σε αυτή την περίπτωση ο αφρός αποτελείται από ακμές δίχως έδρες δημιουργώντας έτσι ένα πορώδες όπως αυτό του σφουγγαριού με αποτέλεσμα ένα ρευστό που έχει το απαιτούμενο χαμηλό ιξώδες να μπορέσει να διαπεράσει αυτό όπως το νερό στο σφουγγάρι.

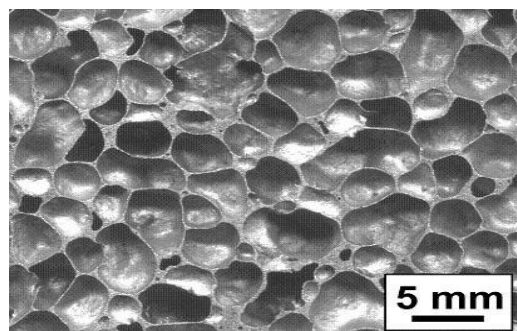
Χρήση αυτών των αφρών μπορεί να είναι το φιλτράρισμα αέρα ή ρευστών από διαφόρων ειδών σωματιδίων ανάλογα με το ίδιο το μέγεθος των σωματιδίων η μεγαλύτερων και το μέγεθος των ανοικτών κελιών, επίσης μπορεί να είναι η ηχομόνωση ή σίγαση, σαν εναλλάκτης για απαγωγή θερμικών φορτιών κλπ



ΕΙΚΟΝΑ.0:1:ΑΡΙΣΤΕΡΑ : Μεταλλικός αφρός ανοιχτών κελιών μεγέθους πόρων 450 μ m, ΔΕΞΙΑ : μεταλλικός αφρός ανοιχτών κελιών μεγέθους πόρων 800 μ m

2) Μεταλλικός αφρός κλειστών κελιών (ΕΙΚ. 0-2)

Τα κελιά εκτός από τις ακμές τους διαχωρίζονται και με κλειστές έδρες, με αποτέλεσμα να μην επικοινωνούν μεταξύ τους τα κελιά. Αυτού του είδους οι αφροί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ηχομόνωση, απορρόφηση ενεργείας κραδασμού-σύγκρουσης, όπως και απορρόφηση θερμικής ενεργείας επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές που απαιτεί εξαιρετική πλευστότητα.

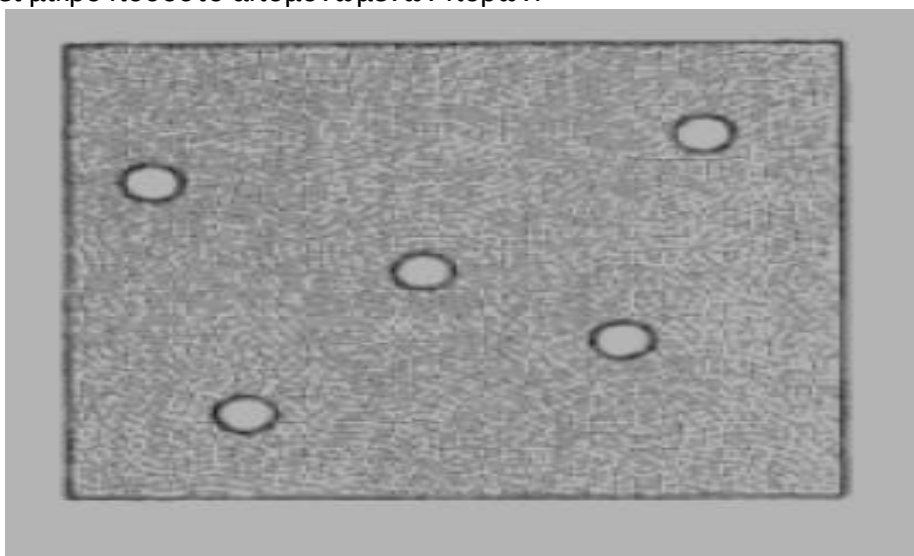


Ε.0.2. Τομή μεταλλικού αφρού κλειστών κελιών

3) Υλικά απομονωμένων πόρων (ΕΙΚ.3)

Πίνακας.1.	Εφαρμογή	ΣΧΟΛΙΑ
------------	----------	--------

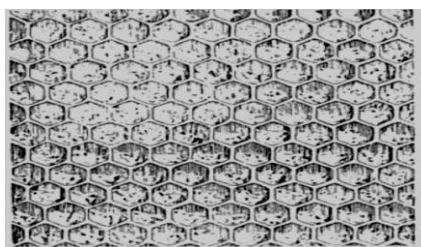
Εάν οι αφροί κλειστού κελιού έχουν μεγάλο ποσοστό σχετικής πυκνότητας, αυτό σημαίνει ότι τα τοιχώματά τους αυξάνουν πάχος που πέρα από ένα σημείο η κατάσταση που θα παρατηρείται είναι ένα συμπαγές υλικό που ενδιάμεσά του θα περιέχει μικρό ποσοστό απομονωμένων πόρων.



Ε.0.3.: Μεμονωμένοι πόροι

4. **Μεταλλικοί δισδιάστατοι αφροί (honey combs)**

Όπως το λέει και το όνομά τους έχουν την μορφή κυψελίδας, δηλαδή αποτελούνται από πολλές δισδιάστατες κυψελίδες που έχουν εξωθηθεί ως προς την τρίτη διάσταση. Μπορεί να κατασκευαστεί με επικόλληση πολλών επίπεδων φύλλων ενός υλικού που έχει πρεσαριστεί για να αποκτήσει σχήμα κυψέλης. Οι τρόποι κατασκευής είναι πολλοί, αλλά δεν θα μας απασχολήσουν ιδιαίτερα.



Ε.0.4.: Honeycombs

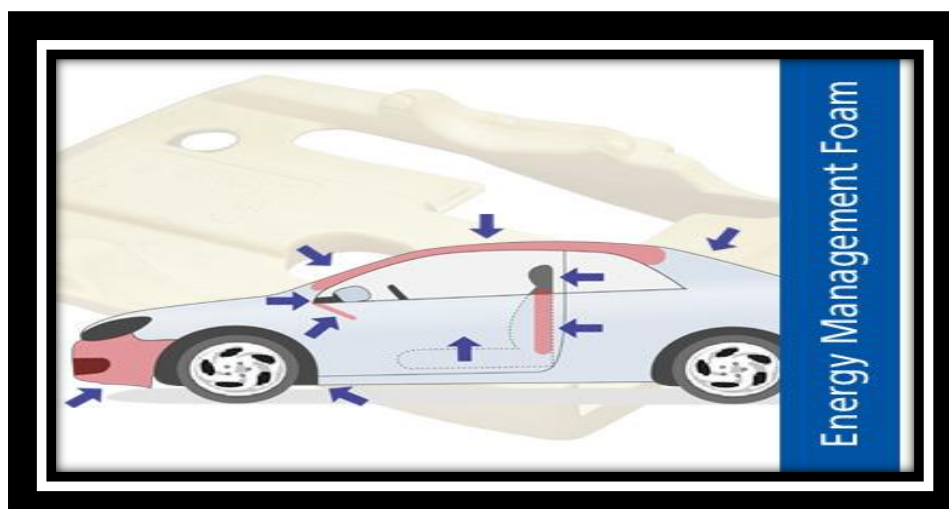
1. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ

1	Ελαφρές κατασκευές	Εξαιρετικός λόγος ακαμψίας προς βάρος όταν φορτίζονται καμπτικά
2	Πυρήνες σάντουιτς	Έχουν χαμηλή πυκνότητα με καλή αντοχή διάτμησης και θραύσης
3	Μηχανική απόσβεση	Η ικανότητα απόσβεσης των μεταλλικών αφρών είναι μεγαλύτερη από εκείνη των στερεών μετάλλων κατά έναν συντελεστή πάνω από 10
4	Έλεγχος ταλάντωσης	Τα αφροποιημένα πλαίσια έχουν μεγαλύτερη ευελιξία σε ταλαντευτικούς κραδασμούς σε σχέση με τα στερεά φύλλα της ίδιας μάζας ανά μονάδα επιφάνειας
5	Ακουστική απορρόφηση	Πλέγμα μεταλλικών αφρών έχει ικανότητα απορρόφησης ήχου
6	Διαχείριση ενεργειών συμπαγείς ή ελαφροί απορροφητές	Έχουν εξαιρετική ικανότητα στην απορρόφηση ενέργειας σε σταθερή σχέση πίεσης
7	Συσκευασία με υψηλή ικανότητα θερμοκρασίας	Ικανότητα να απορροφά κρούσεις σε σταθερό φορτίο συνδυασμένη με θερμική σταθερότητα
8	Τεχνητό ξύλο	Οι μεταλλικοί αφροί έχουν κάποια χαρακτηριστικά του ξύλου όπως κάμψη, δυσκαμψία και μπορούν να ενώνονται με ξυλόβιδες
9	Θερμική διαχείριση: εναλλάκτες θερμότητας – ψήκτες	Οι αφροί ανοιχτού κελιού έχουν μεγάλη συνολική επιφάνεια και υψηλή θερμική αγωγή δίνοντας εξεταστικές ικανότητες μεταφοράς θερμότητας.
10	Θερμική διαχείριση	Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα των ακμών του κυττάρου σε συνδυασμό με την μεγάλη επιφάνεια είναι παράγοντας που παρεμποδίζει την διάδοση φλόγας
11	Θερμική διαχείριση: θερμικά πεδία	Οι μεταλλικοί αφροί είναι άκαυστοι καθώς και η επιφανειακή οξειδωση του αργιλίου οδηγεί σε ανθεκτικότητα και αντοχή στην φλόγα
12	Αναλώσιμοι πυρήνες για χύτευση	Διαμόρφωση πυρήνων μεταλλικών αφρών με έγχυση για σύνθετα σχήματα χρησιμοποιούνται ως αναλώσιμοι πυρήνες χύτευσης αλουμινίου
13	Βιωσιμβατά ένθετα	Η κυτταρική ύψη των βιοσυμβατών μεταλλικών αφρών όπως του τιτάνιου οδηγούν στην ανάπτυξη των κυττάρων
14	Φίλτρα	Ανοιχτού κελιού αφροί ελεγχόμενου μεγέθους πορώδους μπορούν να εφαρμοστούν για φιλτράρισμα υψηλής θερμοκρασίας αερίου και υγρού
15	Ηλεκτρόδια και φορείς καταλύτη	Υψηλός λόγος επιφάνειας - όγκου επιτρέπει συμπαγή ηλεκτρόδια με περιοχή υψηλής επιφανειακής αντίδρασης
16	Πλευστότητα	Μικρή πυκνότητα και καλή αντίσταση διάβρωσης συνίσταται για πιθανές εφαρμογές πλευστότητας

Ο παραπάνω πίνακας δείχνει εφαρμογές στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μεταλλικοί αφροί μαζί με τις ιδιότητες τους που εκμεταλλευόμαστε, ώστε να τους χρησιμοποιήσουμε.

Όταν θέλουμε εξαρτήματα κατασκευασμένα από μεταλλικούς αφρούς που χρησιμοποιούνται ως αποσβεστήρες ενέργειας, στοιχεία μηχανών, ελαφρές

κατασκευές, σιγαστήρες, έδρανα, αυτά ενδείκνυται να αποτελούνται από αφρούς κλειστών κελιών ενώ σε εφαρμογές όπως οι εναλλάκτες θερμότητας, καταλύτες, φίλτρα, απαιτούνται αφροί ανοικτών κελιών.



Εικόνα.1.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΦΡΩΝ ΣΤΗΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΣΗ

Οι εφαρμογές στις οποίες μεταλλικοί αφροί χρησιμοποιούνται σε ολοκληρωμένα συστήματα για απόσβεση ενέργειας είναι διάφορων ειδών. Μία διαδεδομένη εφαρμογή εντοπίζεται στο χώρο της αυτοκίνησης αλλά και στο πακετάρισμα εύθραυστων ή ευαίσθητων από την κρούση προϊόντων. Στην περίπτωση της αυτοκίνησης, ο άνθρωπος είναι το εσωκλειόμενο στοιχείο που προστατεύεται, ενώ στο πακετάρισμα προϊόντων το ίδιο το προϊόν.

Στις εφαρμογές στις οποίες μεταλλικοί αφροί χρησιμεύουν σαν σιγαστήρες χρησιμοποιείται η ιδιότητα ότι ο ήχος χάνει την ενέργεια του όταν διέρχεται από ένα υλικό το οποίο αποτελείται από πολύ πυκνό μέρος και μετά από ένα πολύ αραιό τμήμα (όπως ο αέρας ή το αέριο που περιέχει το κελί). Σε αυτές τις εφαρμογές προτιμάται σύμφωνα με την βιβλιογραφία και τα πειραματικά δεδομένα, οι αφροί να είναι τύπου ανοικτών κελιών έχοντας καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τους αντίστοιχους αφρούς κλειστών κελιών από το ίδιο μητρικό μέταλλο ή κράμα.

Στα φίλτρα χρειάζονται οπωσδήποτε αφροί πλήρους ανοικτών κελιών, κατά το δυνατό, με ελεγχόμενη ισοδύναμη διάμετρο πόρων υψηλής ομοιομορφίας, για την απομάκρυνση σωματιδίων που η εφαρμογή απαιτεί. Δηλαδή άλλοι πόροι είναι κατάλληλοι για την απομάκρυνση μικροσκοπικών σωματιδίων και άλλου μεγέθους πόροι για την απομάκρυνση μεγαλύτερων. Η επιλογή καταλλήλου κράματος πορώδους μεγέθους κόκκων εξαρτάται από τη θερμοροή, τη θερμοκρασία στην οποία ανέρχεται το φίλτρο καθώς και τη ροή που απαιτούμε να διέρχεται από τα φίλτρα. Η πτώση πίεσης είναι μια σημαντική παράμετρος που εξαρτάται από το πόσο λεία είναι η επιφάνεια επαφής της ροής με το υλικό επηρεαζόμενη από το μέγεθος των πόρων.



Εικόνα 1-2 ΦΙΛΤΡΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ

Στους εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούμε αφρούς ανοικτού κελιού ώστε να έχουμε πολύ μεγάλες επιφάνειες απαγωγής θερμότητας. Αν χρησιμοποιούσαμε μερικώς κλειστού τύπου αφρό, η αγωγιμότητα του υλικού θα μίκραινε σημαντικά λόγω των εσωτερικών κενών, ενώ η επιφάνια επαφής μεταξύ ψυκτικού μέσου και αφρού θα ήταν πολύ μικρότερη. Το πλεονέκτημα που προσφέρουν οι μεταλλικοί αφροί ανοικτών κελίων είναι ότι η θερμότητα επάγεται προς όλες τις κατευθύνσεις από μεγάλη επιφάνεια απαγωγής θερμότητας και βασική παράμετρος που καθορίζει τον ρυθμό ψύξης είναι ο αριθμός Biot.

Άλλες εφαρμογές εντοπίζονται σε διάφορα εξαρτήματα που επιδιώκεται να έχουν καλές ιδιότητες αντοχής και ακαμψίας σε σχέση με το βάρος τους.

Να παραθέσουμε εδώ ότι για κάποιες από τις παραπάνω εφαρμογές οι μεταλλικοί αφροί δεν είναι πάντα οι καταλληλότεροι, καθώς υπάρχουν αφροί μη μεταλλικοί που είναι πιο φθηνοί και έχουν καλύτερες ιδιότητες για την επιδιωκόμενη εφαρμογή.

Παρακάτω παραθέτουμε κάποιες εικόνες όπου καταδεικνύονται κάποια προϊόντα μεταλλικών αφρών με την αντίστοιχη χρήση τους.



Εικόνα.1-3 Εφαρμογές μεταλλικών αφρων με παράμετρο τον τύπο κελιού (ανοικτού κλειστού , μερικώς ανοικτού)

2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΤΥΠΩΝ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η κατασκευή μεταλλικών άφρων κατηγοριοποιείται σε 4 ευρείς τύπους ανάλογα με την φάση (σε αυτόν τον διαχωρισμό) που δημιουργείται ο αφρός:

- 1) Αυτούς που οι αφροί δημιουργούνται από την ατμώδη φάση του μετάλλου
- 2) Αυτούς που οι αφροί ηλεκτροαποτίθενται από υγρό διάλυμα
- 3) Αυτούς που βασίζονται σε διαδικασίες υγρής κατάστασης
- 4) Αυτούς που ο αφρός δημιουργείται στην στερεά ή ημιστερεά κατάσταση

Κάθε τύπος αφρού μπορεί να δημιουργείται από ένα μικρό υποσύνολο μετάλλων για την δημιουργία πορώδους υλικού με περιορισμένο εύρος σχετικών πυκνοτήτων και μεγέθη κυψελών .

Μερικές μέθοδοι παράγουν αφρούς ανοικτών κελιών, άλλες παράγουν κλειστά κελιά και μερικές υπό προϋποθέσεις και τα δυο.

Ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται, τα προϊόντα διαφέρουν κατά πολύ στην ποιότητα και στο κόστος τους.

Οι ιδιότητες των μεταλλικών άφρων βασίζονται στις ιδιότητες των υλικών από τα όποια προέρχονται, δηλαδή στη σχετική πυκνότητα και στη τοπολογία των κυψελών (ανοιχτά –κλειστά , κατανομή πόρων , μέγεθος κυψέλης) αλλά όχι μονό.

Οι ιδιότητες των μεταλλικών άφρων εξαρτώνται στενά από μια πληθώρα παραμέτρων που θα τις δούμε αναλυτικά ή περιληπτικά σε αλλά κεφάλαια καθώς εξετάζουμε μερικές από τις επικρατέστερες[1].

Καταγράφονται 9 διαδικασίες παραγωγής μεταλλικών άφρων καθώς και τα μέταλλα που έχουν υποστεί υγροποίηση με την δοσμένη διαδικασία ή μία ποικιλία αυτών.

- 1) Με διοχέτευση αερίου μέσα σε λιωμένο κράμα Al-Al₂O₃. [Al-Mg]
- 2) Με την ανάδευση ενός παράγοντα αφροποίησης (foaming agent τυπικά TiH₂) σε ένα τετηγμένο κράμα (τυπικά κράμα αλουμινίου) και ελέγχοντας την πίεση κατά την διάρκεια της ψύξης. [Al]
- 3) Ενοποίηση μεταλλικών κονιαμάτων (πουδρών –μεταλλικής σκόνης) με έναν παράγοντα αφροποίησης που ακολουθείται από θέρμανση όπου και ο παράγοντας αφροποίησης διασπάται και κάτω από την εσωτερική πίεση του αερίου που απελευθερώνεται διαστέλλεται το υλικό που βρίσκεται σε ημιστερεά κατάσταση (συνήθως η θέρμανση γίνεται πάνω από την solidus και κάτω από την liquidus αν και μπορεί να βρίσκεται και πάνω από την liquidus). [Al,Zn,Pb,Au]
- 4) Κατασκευή μιας αργιλώδους μήτρας από ένα πρόδρομο κέρινο ή πολυμερή αφρό, ακολουθείται κάψιμο του πρόδρομου και με μια πίεση διήθησης πληρώνεται με το λιωμένο μέταλλο η μεταλλική σκόνη, ενώ στη συνέχεια λαμβάνει χώρα πυροσυσσωμάτωση στην περίπτωση των κόνεων. [Al,Mg,Ni-Cr,ανοξειδωτος χάλυβας,Cu]
- 5) Εναπόθεση ατμώδους φάσης ή ηλεκτροαπόθεση μετάλλου σε ένα πολυμερή πρόδρομο αφρό το οποίο στην συνέχεια καίγεται αφήνοντας κύτταρα με κοίλους πυρήνες. [Ni,Ti]

- 6) Η παγίδευση ενός υψηλής πίεσης αδρανούς αερίου στο πορώδες της μεταλλικής σκόνης πιέζοντας θερμό ισοστατικά ενώ αυξανόμενης της θερμοκρασίας διαστέλλεται το αέριο δημιουργώντας πόρους κατά την διάρκεια της ενοποίησης.
- 7) Πυροσυσσωμάτωση κοίλων σφαιρών γίνεται μέσω τροποποιημένης διαδικασίας εξαερώσεως είτε από μεταλλικό οξείδιο είτε από ιδρυδικές σφαίρες που ακολουθούνται από ατμόεναποθεση μέσα στις πολυμερείς σφαίρες. [Ni,Co,Ni-Cr alloys]
- 8) Συμπύεση ενός μετάλλου σε σκόνη με μια σκόνη απόπλυσης μέσω καταλλήλων πιέσεων και καταλλήλων συνθηκών περιβάλλοντος μίγματος που ακολουθείται από απόπλυση ώστε να φύγει το μέσο απόπλυσης και να μείνει το μέταλλο με πόρους στην θέση της σκόνης απόπλυσης.
- 9) Διάλυση αερίου (τυπικά υδρογόνου) στο υγρό μέταλλο υπό πίεση επιτρέποντας του έπειτα να κυκλοφορήσει με ελεγχόμενο τρόπο κατά την διάρκεια της μετέπειτα στερεοποίησης

2.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΧΥΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ ΣΤΟ ΥΓΡΟ ΜΙΓΜΑ

Καθαρά υγρά μέταλλα δεν μπορούν να αφροποιηθούν εύκολα με διοχέτευση αερίου μέσα σε αυτά, καθώς το υγρό αποστραγγίζεται πάρα πολύ γρήγορα από το υγρό υψηλού (για την επιδιωκόμενη διαδικασία) ιξώδους, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να δημιουργηθεί αφρός, αλλά να απελευθερώνεται το αέριο και ο αφρός που δημιουργείται να μην είναι σταθερός .

Με την χρήση μικρών σωματιδίων, όπως οξείδια του αργιλίου και καρβίδιο του τιτάνιου, επιτυγχάνεται αύξηση του ιξώδους του υγρού μέταλλου και εμποδίζεται η γρήγορη αποστράγγιση του αερίου από το τήγμα, δίνοντας χρόνο έτσι για σταθεροποίησή του, ενώ δεν έχει ακόμα αποστραγγιστεί η φυσαλίδα από το τήγμα.

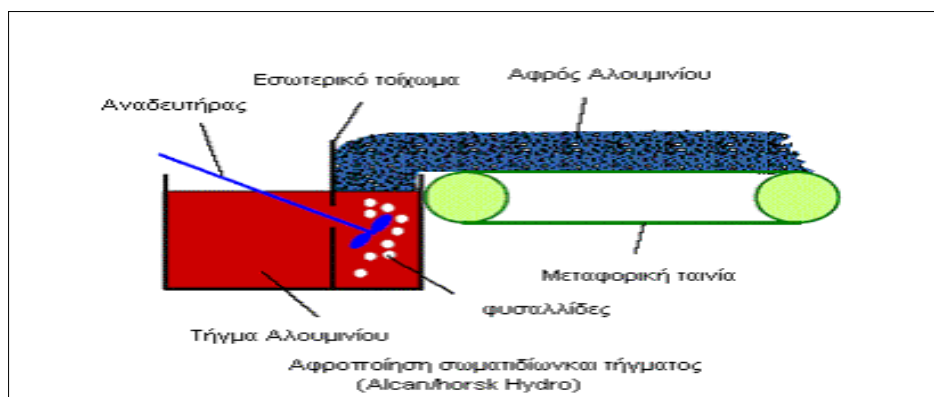
Η διαδικασία άμεσης έκχυσης αερίου είναι ευκολότερο να εφαρμοστεί στα κράματα αλουμινίου, γιατί αυτά έχουν χαμηλή πυκνότητα και δεν οξειδώνονται υπερβολικά, όταν εκτεθούν σε αέρα ή άλλο αέριο που περιέχει οξυγόνο.

Καθαρό αλουμίνιο ή κράμα του τήκεται και προστίθεται αργιλώδης σκόνη 5-15% σαν παράγοντας σταθεροποίησης σε διάμετρο σωματιδίων 0,5-25 μm. Άλλα σωματίδια μπορούν να φτιαχτούν από αλουμίνια, ψευδάργυρο, καρβίδιο του πυριτίου ή διβορίδιο του τιτάνιου.

Μια ποικιλία αέριων μπορεί να χρησιμοποιείται για την δημιουργία φυσαλίδων εντός του υγρού αλουμινίου.

Συνηθεστέρα εγχέεται αέρας αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί διοξείδιο του άνθρακα, οξυγόνο, αδρανή αέρια και νερό (ο ατμός του δημιουργεί τις φυσαλίδες).

Με αυτήν την διαδικασία δημιουργούνται φυσαλίδες που ανεβαίνουν προς την επιφάνεια του τήγματος και κατά την διαδικασία και πριν ολοκληρωθεί η αποστράγγιση, έχει στερεοποιηθεί το υγρό που τις περιβάλλει.



E.2-1 AIR BUBBLING METHOD

Η ταχύτητα ψύξης (θερμική κλίση) του αφρού καθορίζει πόσο χρόνο παραμένει ο αφρός υγρός ή ημιστερεός και συνεπώς την έκταση της αποστράγγισης.

Χαμηλής σχετικής πυκνότητας αφροί μπορούν να παραχθούν μέσω προσεκτικά ελεγχόμενης διαδικασίας έγχυσης και ρυθμού ψύξης του αφρού.

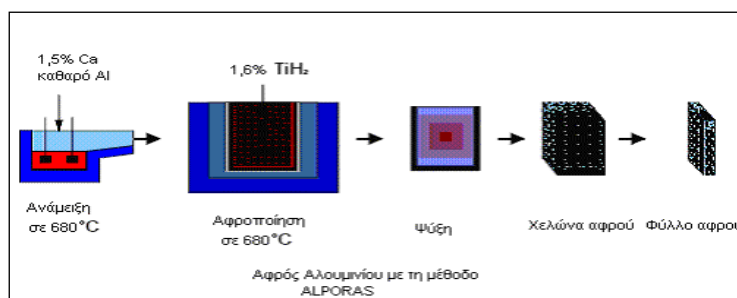
Ποικίλες τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή του αφρού και δημιουργία μεγάλων παροχών υγροποιημένων κραμάτων αλουμινίου φτιαγμένα με αυτόν τον τρόπο(1m και 0,2m πάχος πλάκας) κλειστού κελιού με διαμέτρους 5-20mm.

Αυτή η προσέγγιση είναι η λιγότερο κοστοβόρα να εφαρμοστεί παρέχοντας αφρό με σχετικές πυκνότητες 0,03-0,1 ή διαφορετικά διατυπωμένο πορώδες 90 % έως 97% ενώ προς το παρόν περιορίζεται στην κατασκευή αφρού αλουμινίου.

2.2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΑΕΡΙΟΥ ΣΤΟ ΥΓΡΟ ΤΗΓΜΑ ΑΠΟ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Μεταλλικά κράματα μπορούν να αφροποιηθούν ανακατεύοντάς τα με ένα μέσο αφροποίησης που απελευθερώνει αέριο όταν θερμαίνεται.

Ο ευρέως διαδεδομένος παράγοντας αφροποίησης είναι το υδρίδιο του τιτάνιου TiH_2 που αρχίζει να αποσυντίθεται σε Ti και H_2 όταν θερμαίνεται πάνω από τους $465^\circ C$. Με την προσθήκη υδριδίου του τιτάνιου σε ένα τήγμα αλουμινίου, μεγάλος όγκος αερίου υδρογόνου παράγεται γρήγορα δημιουργώντας φουσαλίδες που μπορεί να οδηγήσουν σε αφρό κλειστών κελιών, με την προϋπόθεση η αποστράγγιση του αφρού να είναι αρκετά αργή, η οποία απαιτεί υψηλό ιξώδες τήγματος.



Εικόνα 2-2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕΣΑ ΣΤΟ ΤΗΓΜΑ (ALPORAS)

Η εταιρία Sinko Wire έχει αναπτύξει αφρό αλουμινίου χρησιμοποιώντας αυτή την μέθοδο.

Η διαδικασία αρχίζει με την τήξη του αλουμινίου και τη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του τήγματος μεταξύ των 670°C και 690 °C περίπου, το ιξώδες κατόπιν ανυψώνεται με προσθήκη 1-2% ασβεστίου που γρήγορα οξειδώνεται και διασπείρεται σε σωματίδια CaO και CaAl₂O₂.

Το τήγμα στην συνέχεια αναδεύεται έντονα και 1-2% TiH₂ προστίθεται σε μορφή σωματιδίων διαμέτρου 5-20 μm διάμετρο.

Μόλις αυτά διασκορπιστούν στο τήγμα το σύστημα ανάδευσης αποσύρεται και αφήνεται να σχηματιστεί στο ανώτερο τήγμα.

Ο έλεγχος της διαδικασίας επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας την υπερπίεση την θερμοκρασία και τον χρόνο .

Παίρνει περίπου 10 λεπτά για την ολοκληρωτική αποσύνθεση του υδριδίου του τιτάνιου.

Όταν ο αφρισμός είναι πλήρης, το τήγμα ψύχεται πριν προλάβει το H₂ να δραπετεύσει συγχωνεύοντας φυσαλίδες και απελευθερώνοντας τες.

Το κλάσμα ασβεστίου και υδριδίου του τιτάνιου που προστίθεται στο μίγμα καθορίζει τελικά την σχετική πυκνότητα και, σε συνδυασμό με τις συνθήκες ψύξης, το μέγεθος των κυψελίδων .

Το μέγεθος της κυψελίδας μπορεί να ποικίλει από 0,5 έως 5 mm αλλάζοντας την σύσταση σε υδρίδιο του τιτάνιου και τις συνθήκες αφροποίησης και ψύξης.

Αφροί σχετικών πυκνοτήτων από 0,2 έως 0,07 μπορούν να κατασκευαστούν .

Με την τεχνική αυτή μπορούμε επιμηκύνουμε τον χρόνο αναμονής, με αποτέλεσμα να σπάσουν μερικώς τα κελιά και να ενοποιηθούν αυξάνοντας έτσι την ακουστική απόσβεση που έχει το υλικό μας. Μια σημαντική παράγωγη υπάρχει στην Ιαπωνία.

Αν και χρησιμοποιούνται μονό μικρά κλάσματα των ακριβών ασβεστίου και υδριδίου του τιτάνιου, η διαδικασία είναι πιθανόν να είναι πιο δαπανηρή από την άμεση αέριο έγχυση, γιατί είναι μια διαδικασία σε παρτίδες.

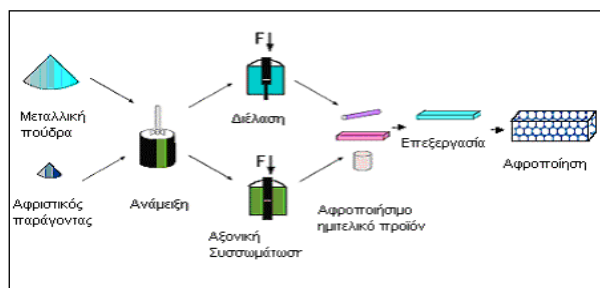
Σήμερα μονό κράματα αλουμινίου φτιάχνονται με αυτήν την μέθοδο γιατί το H₂ ψαθυροποιεί πολλά μέταλλα και επειδή η αποσύνθεση του υδριδίου του τιτάνιου συμβαίνει πολύ πριν το σημείο τήξης πολλών κραμάτων.

Διεξάγεται έρευνα για την χρήση εναλλακτικών μεσών αφροποίησης (ανθρακικά, νιτρικά μέσα) με υψηλότερη θερμοκρασία αποσύνθεσης, προσφέροντας προοπτική της χρήσης αυτής της μεθόδου για αφρούς σιδηρού ατσαλιού και νικελιούχων κραμάτων.

2.3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΗΜΙΣΤΕΡΕΑ ΦΑΣΗ

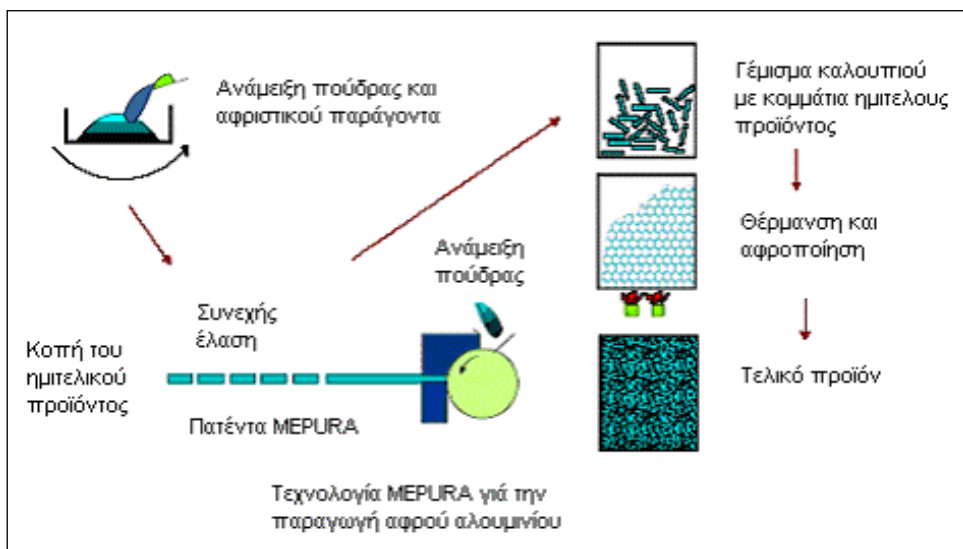
Τα μέσα αφροποίησης μπορούν να εισαχθούν στα μέταλλα στη στερεά κατάσταση μέσω μίξης και ενοποίησης πουδρών. Το υδρίδιο του τιτάνιου, όντας ένα πλατιά χρησιμοποιούμενο μέσο αφροποίησης, αρχίζει να αποσυντίθεται στους 465°C περίπου που βρίσκεται αρκετά κάτω από το σημείο τήξης του καθαρού αλουμινίου (660°C) και των κραμάτων του. Αυτό αυξάνει την πιθανότητα δημιουργίας αφρού με διασπορά του παράγοντα αφροποίησης στην στερεά κατάσταση αλουμινίου χρησιμοποιώντας

μεταλλουργικές κατεργασίες σκόνης και έπειτα αυξάνοντας την θερμοκρασία προκαλώντας απελευθέρωση αερίου και μερική ή πλήρη τήξη του επιτρέποντας την ανάπτυξη φυσαλίδων. Έπειτα ψύχοντας σταθεροποιείται ο αφρός. Παίρνουμε σκόνη υδριδίου του τιτάνιου και σκόνη αλουμινίου ή κράματος του, αναμιγνύοντάς τα καλά μεταξύ τους και με συμπίεση - εξώθηση παίρνουμε πλάκες, ράβδους, χελώνες ή φύλλα που βρίσκονται κοντά στην θεωρητική πυκνότητα του αρχικού μετάλλου.



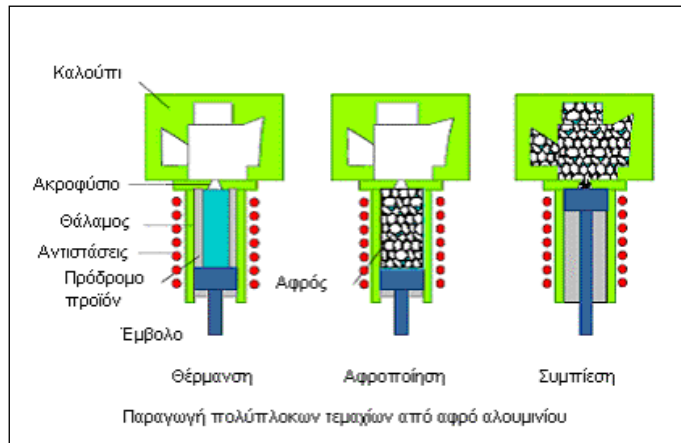
ΕΙΚΟΝΑ.2.3: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ ΜΕ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΕ ΗΜΙΣΤΕΡΕΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Το υλικό αυτό ονομάζεται πρόδρομο, τεμαχίζεται σε μικρά κομμάτια και τοποθετείται σε ένα σφραγισμένο καλούπι και θερμαίνεται λίγο πάνω από την θερμοκρασία solidus του κράματος. Το υδρίδιο του τιτάνιου στην συνέχεια αποσυντίθεται δημιουργώντας κενούς χορούς μέσα στο μίγμα με υψηλή εσωτερική πίεση.



ΕΙΚΟΝΑ 2-4: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΕΡΑΡΑ

Αυτά επεκτείνονται σε ημιστερεά ροη, διογκώνονται δημιουργώντας έναν αφρό που γεμίζει το καλούπι. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι ένα προϊόν που έχει το ίδιο σχήμα με το δοχείο και σχετικές πυκνότητες έως 0,08 ή πορώδες 92%. Ο αφρός με αυτήν την μέθοδο έχει κλειστά κύτταρα με διαμέτρους που κυμαίνονται από 1-5mm.



ΕΙΚΟΝΑ 2-5: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ ΑΠΟ ΑΦΡΟΥΣ ΠΟΛΥΠΛΟΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

2.4. Χύτευση χρησιμοποιώντας κέρινο πρόδρομο ή πολυμερές σαν αρνητική μήτρα (στην αρχή)

Ένα πολυμερές ανοιχτής κυψέλης χαμηλής σχετικής πυκνότητας με μεγάλο εύρος μεγεθών κυψέλης και μεγάλης ομοιομορφίας πορώδους είναι διαθέσιμο από πολλές πηγές.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καλούπια για την δημιουργία επένδυσης μητρών χύτευσης εντός της οποίας θα ριχτεί μέταλλο ή κράμα του.

Θεωρείται ότι το φάσμα αφρών ERG DUOCELL φτιάχνεται με αυτό τρόπο.

Στην αρχή επιλέγεται ένα αφρώδες πολυμερές ανοιχτής κυψελίδας σαν ένα πρότυπο καλούπι με το επιθυμητό μέγεθος πυκνότητας και κυψελίδων. Αυτό επικαλύπτεται (γεμίζει) με ένα αιώρημα καλουπιού χύτευσης το οποίο ξεραίνεται και ενσωματώνεται σε άμμο χύτευσης.

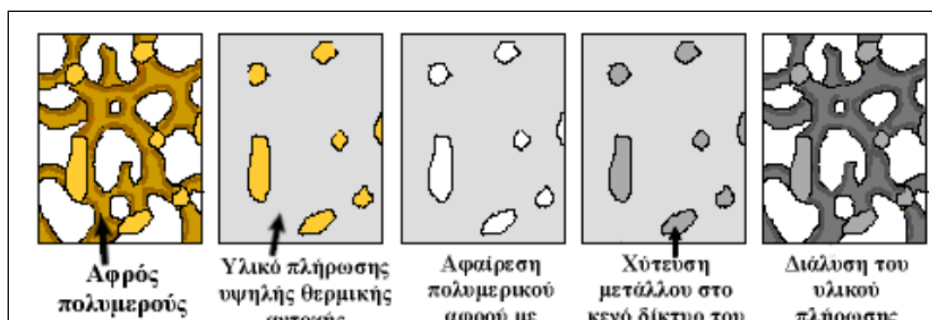
Το καλούπι στην συνέχεια ψήνεται για να σκληρύνουν τα υλικά χύτευσης και για να εξατμιστεί (καεί) το πρότυπο πολυμερές υλικό δημιουργώντας μια αρνητική εικόνα του αφρού που επιθυμούμε να παράγουμε.

Αυτό το καλούπι γεμίζεται με ένα μεταλλικό κράμα και αφήνεται να κρυώσει. Η χρήση μιας μέτριας πίεσης κατά της διάρκειας της διείσδυσης βοηθά στο να ξεπεραστεί η αντίσταση που δημιουργείται λόγω της ροής μες το καλούπι.

Μετά από κατευθυνόμενη στερεοποίηση και ψύξη απομακρύνονται τα υλικά της μήτρας αφήνοντας πίσω ένα ισοδύναμο του αρχικού πολυμερούς αφρού. Πολλοί μεταλλικής σκόνης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν αντί των τηγμάτων μετάλλων. Η μέθοδος αυτή δίνει αφρούς ανοιχτής κυψέλης με μέγεθος πόρων 1-5 mm και σχετικές πυκνότητες τόσο χαμηλές όσο $\rho_{rel}=0,05$.

Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κατασκευή αφρών από οποιοδήποτε μέταλλο που μπορεί να είναι χρήσιμο.

Μια παραλλαγή της μεθόδου είναι η ενσωμάτωση πρόδρομου υλικού στο πολυμερές ή στο κέρινο πλέγμα. Η δομή του πλέγματος συμπληρώνεται από μεταλλικό πολτό καίγοντας την αρνητική μήτρα.



ΕΙΚΟΝΑ 2.6: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ ΣΑΝ ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΜΗΤΡΑ

2.5. ΑΠΟΘΕΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΠΡΟΠΛΑΣΜΑΤΑ

Πολυμερής ανοικτής κυψελίδας αφρός μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρότυπο επί των οποίων τα μέταλλα εναποτίθενται με χημική αποσύνθεση ατμών με εξάτμιση ή με ηλεκτροστατική βαφή. Στο πλαίσιο της διαδικασίας κατά INCO, νικέλιο εναποτίθεται από την αποσύνθεση του καρβονύλιου του νικελίου $Ni(CO)_2$.

Αυτό το αέριο αποσυντίθεται σε νικέλιο και μονοξείδιο του άνθρακα σε θερμοκρασία περί των 100 βαθμών κελσίου και επιχρίει όλες τις επικαθίμενες επιφάνειες με το αντιδραστήριο.

Μετά από μερικές δεκάδες νανομέτρων επικειμένου μετάλλου το πολυμερές καίγεται και το αντιδραστήριο απομακρύνεται με θέρμανση στον αέρα. Αυτό οδηγεί σε κύτταρα με κώλους συνδέσμους. Έπειτα χρησιμοποιείται διαδικασία πυροσυσσωμάτωση για την πύκνωση των συνδέσμων.

Το Καρβονύλιο του Νικελίου είναι αρκετά τοξικό και απαιτεί δαπανηρούς περιβαλλοντολογικούς ελέγχους πριν την κατασκευή αφρών του νικελίου.

Ηλεκτρομαγνητικές και μέθοδοι ηλεκτροαπόθεσης έχουν χρησιμοποιηθεί για τα επιχρισμένα προπλάσματα αλλά το Καρβονύλιο του Νικελίου έχει την μικρότερη ηλεκτρική αντίσταση από τις άλλες μεθόδους δημιουργίας του.

Το μέγεθος του πορώδους μπορεί να ποικίλει. Με αυτή την διαδικασία προκύπτουν αφροί ανοικτών πόρων διαμέτρου 100 -300 μm.

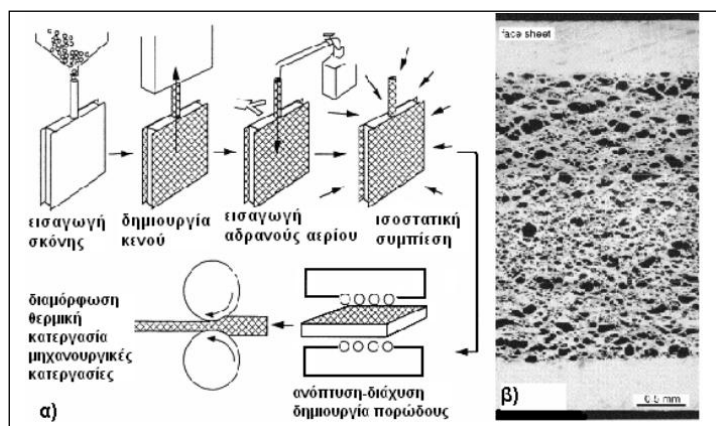
Η μέθοδος περιορίζεται σε καθαρά στοιχεία όπως Νικέλιο ή Τιτάνιο λόγω της δυσκολίας εφαρμογής της μεθόδου (CVD) ηλεκτροαπόθεσης κραμάτων.

Δίνει την χαμηλότερη σχετική πυκνότητα (0,2- 0,05) αφρών σήμερα.

2.6. ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΠΑΓΙΔΕΥΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Η διαλυτότητα αδρανών αέριων όπως του Αργού (Ar) είναι πολύ χαμηλή. Τεχνικές κονιομεταλλουργίας έχουν αναπτυχθεί για κατασκευή υλικών με διασπορά μικρών πόρων που περιέχουν ένα αδρανές αέριο σε υψηλή πίεση.

Αυτά τα υλικά στην συνέχεια θερμαίνονται αυξάνοντας την πίεση των πόρων και οι πόροι επεκτείνονται με ερπυσμό του μετάλλου που τους περιβάλλει.



ΕΙΚΟΝΑ 2.7: ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ ΜΕ ΔΙΑΣΤΟΛΗ ΠΑΓΙΔΕΥΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΔΡΟΜΟΥ

Αυτή η διαδικασία έχει χρησιμοποιηθεί από την Boeing για την δημιουργία πυρήνα χαμηλής πυκνότητας Ti-6Al-4V σε πάνελ σάντουιτς με κλάσμα πορώδους 50%

Η διαδικασία έχει ως εξής (μια εκδοχή της) :

Σκόνη Ti-6Al-4V σφραγίζεται σε ένα μεταλλικό δοχείο του ίδιου κράματος. Το δοχείο εκκενώνεται για να απομακρυνθεί το οξυγόνο που ψαθυροποιεί το τιτάνιο και έπειτα ξαναγεμίζεται με αργό σε πίεση 3-5 ατμόσφαιρες. Το κάνιστρο στην συνέχεια σφραγίζεται και ενοποιείται σε μια υψηλή σχετική πυκνότητα (0,9-0,98) με θερμοισοστατική συμπίεση προκαλώντας 8 φορές αύξηση στην πίεση κενού. Αυτή είναι πολύ χαμηλή για να προκαλέσει διαστολή του Ti-6Al-4V σε θερμοκρασία δωματίου .

Ο αριθμός των πόρων που υπάρχουν στο ενοποιημένο δείγμα είναι σχετικά χαμηλός (συγκρίσιμος με τον αριθμό σωματιδίων της σκόνης στο αρχικό σύμπαγες υλικό). Ένα στάδιο έλασης εισάγεται για να βελτιώσει την δομή και να δημιουργήσει μια πιο ομοιόμορφη κατανομή των πόρων.

Σε κράματα τιτανίου η έλαση στου 900-940°C έχει σαν αποτέλεσμα την επιπεδοποίηση των κενών (flattening) και την επιμήκυνση στην κατεύθυνση της έλασης. Καθώς τα κενά ισοπεδώνονται οι έδρες των κενών έρχονται σε επαφή και διαχέονται δημιουργώντας λωρίδες από μικρότερους πόρους γεμισμένους με αέριο.

Η σταυροειδής κίνηση (κατά την έννοια κατεύθυνσης πλάτους και μήκους) έλασης βελτιώνει την ομοιομορφία της κατανομής τους .

Ποικίλες διαδικασίες ψυχρής έλασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να διαμορφωθούν οι πλάκες έλασης. Το τελικό βήμα της διαδικασίας είναι η διαδοχική διαστολή με θέρμανση στου 900 °C περίπου για 20 με 30 ώρες.

Η υψηλή θερμοκρασία αυξάνει την εσωτερική πίεση των πόρων προκύπτουσα από τον λόγο απόλυτης θερμοκρασίας κλιβάνου /θερμοκρασίας ατμόσφαιρας επί έναν συντελεστή περίπου 4, δηλαδή μια πίεση μεταξύ 10-16 Μρα προκαλώντας την διαστολή ερπυσμού και την μείωση της συνολικής πυκνότητας του δείγματος.

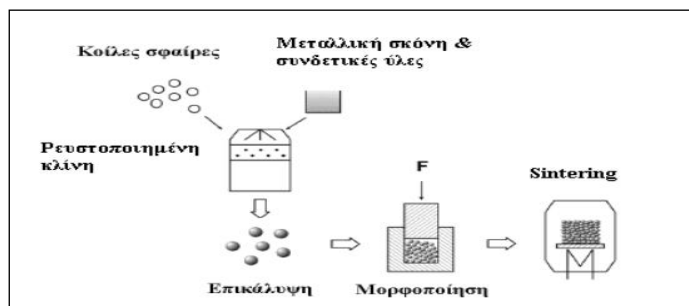
Αυτή η διαδικασία οδηγεί στην διαμόρφωση κραμάτων του Τιτανίου τύπου σάντουιτς , στη διαμόρφωση εξαρτημάτων με έναν κλειστού κελίου με λόγο κενού πάνω από 0,5 και ανά μέγεθος κενού 10-300 μm.

Ενώ το κόστος εισερχομένου αερίου είναι μικρό, η διαδικασία διπλής σταυροειδούς έλασης μπορεί να κάνει αυτήν την διαδικασία πιο δαπανηρή στην κατασκευή εξαρτημάτων σε σχέση με την μέθοδο κραμάτων κονιομεταλλουργίας.

2.7. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΟΙΛΩΝ ΣΦΑΙΡΩΝ

Μερικές μέθοδοι έχουν προταθεί για την σύνθεση κοίλων μεταλλικών σφαιρών. Μια προσέγγιση εκμεταλλεύεται την παρατήρηση ότι ο διασκορπισμός εισερχομένου αερίου συχνά οδηγεί σε μικρά κλάσματα (1-5%) από μεγάλης διαμέτρου (0,3-1 χιλιοστό) κοίλες μεταλλικές σφαίρες κραμάτων με σχετικές πυκνότητες κοντά στο 0,1. Αυτά τα κοίλα σωματίδια μπορούν να ταξινομηθούν με μεθόδους πλευστότητας μέσω θερμοϊσοστατικής συμπίεσης, μέσω πυροσυσσωμάτωσης ή από υγρής φάσης πυροσυσσωμάτωση.

Η υγρής φάσης πυροσυσσωμάτωση ίσως να είναι η προτεινόμενη προσέγγιση για κάποια κράματα αφού αποφεύγονται οι θλιπτικές στρεβλώσεις των λεπτότερων σωματιδίων σκόνης που προκύπτουν από την διαδικασία θερμικής ισοστατικής συμπίεσης και αποφεύγονται επίσης οι παρατεταμένες επεξεργασίες υψηλής θερμοκρασίας που απαιτούνται για να επιτευχθούν ισχυροί δεσμοί μεταξύ των σωματιδίων μέσω μεθόδων πυροσυσσωμάτωσης κενού.



ΕΙΚΟΝΑ.2.8 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΚΟΙΛΩΝ ΣΦΑΙΡΩΝ

Υπερκράματα πορώδους Νικελίου και Ti-6Al-4V με σχετικές πυκνότητες της τάξης των 0,06 μπορούν να παρατηρηθούν στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας αυτήν την προσέγγιση.

Η ανάπτυξη ελεγχόμενων τεχνικών κοίλων κονιαμάτων μπορεί να επιτρέψει οικονομική κατασκευή δομής αφρού χαμηλής πυκνότητας με αυτόν τον τρόπο.

Σε μια εναλλακτική μέθοδο οι κοίλες σφαίρες σχηματίζονται από έναν πολτό που αποτελείται από ένα αποσυντιθέμενο πρόδρομο, όπως το TiH_2 μαζί με οργανικά συνδετικά υλικά και διαλύτες. Οι σφαίρες σκληρύνονται με εξάτμιση κατά την διάρκεια της πτήσης από έναν ψήλο πύργο σταγόνων θερμαινόμενο για να εξατμιστούν οι διαλύτες και να εξαερωθεί ή/και να αποσυντεθεί το συνδετικό υλικό.

Σε μια τελική θερμική διεργασία αποσυντίθεται το υδρίδιο του μέταλλου αφήνοντας κοίλες μεταλλικές σφαίρες. Η προσέγγιση που εφαρμόστηκε στο Georgia Tech Institute μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλά υλικά και δεν περιορίζεται σε υδρίδια.

Σαν παράδειγμα, ένα μείγμα οξειδίων του Σιδηρού και του Χρωμίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει ανοξειδωτο χάλυβα (οι ανοξειδωτοι χάλυβες ως γνωστό περιέχουν μια ποσότητα χρωμίου που σχηματίζουν μια ένωση οξειδίου του χρωμίου στην επιφάνια του χάλυβα εμποδίζοντας την περαιτέρω διάβρωση του χάλυβα).

Με μια τρίτη μέθοδο I FAM Βρέμης σφαίρες Πολυεστερενίου επικαλύπτονται με ένα μεταλλικό πολτό συντηγμένο δίνοντας κοίλες μεταλλικές επιφανές υψηλής ομοιομορφίας .

Η ενοποίηση των σφαιρών δίνει ένα μείγμα με δομή ανοιχτού και κλειστού πορώδους . Η αναλογία αυτών των δύο τύπων πορώδους μπορεί να προσαρμοστεί με μεταβολή της αρχικής πυκνότητας των κοίλων σφαιρών και την έκταση της συμπυκνώσεως κατά την ενοποίηση.

Συνολικά σχετικές πυκνότητες από πολύ χαμηλά μέχρι 0,05 είναι εφικτές και στην περιοχή διαμέτρων από 100 μm μέχρι μερικά mm.

2.8. ΣΥΜΠΙΕΣΗ Η ΧΥΤΕΥΣΗ ΔΥΟ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΟΠΟΙΑ ΤΟ ΕΝΑ ΕΙΝΑΙ ΔΙΗΘΗΣΙΜΟ

Δύο σκόνες από τις οποίες καμιά δεν έχει ποσοστό κάτω του 25 % κατά βάρος αναμιγνύονται και συσσωματώνονται σχηματίζοντας διπλά συνδεόμενες δομές από δύο φάσεις.

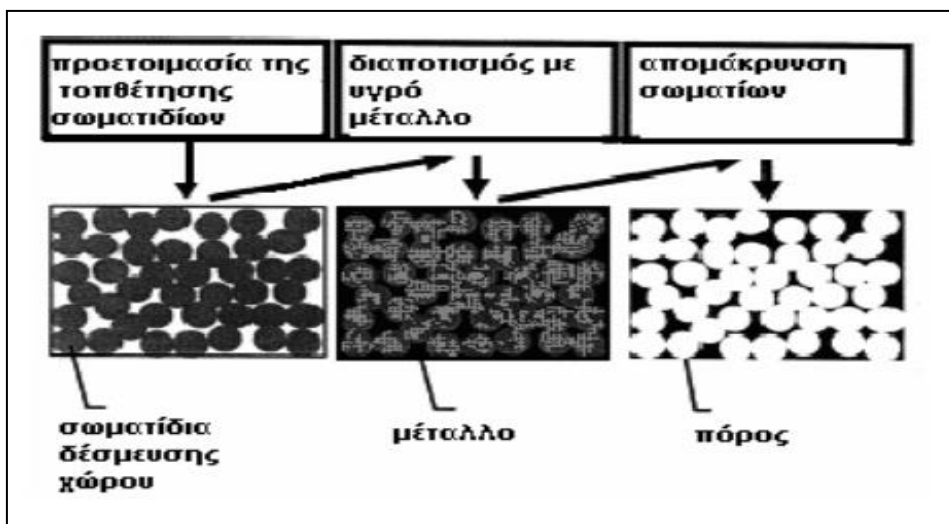
Μετά την συνένωση, η μια σκόνη (άλατος πχ) αποπλένεται με έναν κατάλληλο διαλύτη.

Αφροί βασιζόμενοι σε σκόνη κράματος Αλουμινίου με Χλωριούχο Νάτριο έχουν επιτευχθεί δίνοντας μεγάλα τμήματα με ομοιόμορφες δομές.

Το προκύπτον σχήμα κελιού διαφέρει αξιοσημείωτα από το σχήμα αφρών που φτιάχνονται με άλλες μεθόδους.

Στην πράξη η μέθοδος περιορίζεται στην παράγωγη υλικών με σχετικές πυκνότητες μεταξύ 0,3 και 0,5.

Το μέγεθος του κελιού προσδιορίζεται από το μέγεθος των σωματιδίων του αποπλενόμενου υλικού (μέγεθος κόκκου) που βρίσκονται στο εύρος από 10 μm μέχρι 10 mm.



ΕΙΚΟΝΑ 2.9: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ ΑΠΟ ΤΗΓΜΑ ΠΟΥ ΕΙΣΕΡΧΕΤΑΙ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΑΠΟΠΛΕΝΟΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΕΤΑΙ

Σε μια εναλλακτική μέθοδο σε μια κλίνη τοποθετούμε αποπλενόμενα σωματίδια που διηθίζονται από υγρό μέταλλο κάτω από πίεση που έπειτα αφήνεται να ψηχθεί. Η απόπλυση δίνει πάλι μια κυτταρική μεταλλική δομή μεγάλης ομοιομορφίας.

2.9. ΕΥΤΗΚΤΙΚΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ ΑΕΡΙΟΥ –ΜΕΤΑΛΛΟΥ

Πολυάριθμα διαγράμματα κραμάτων υδρογόνου δύο φάσεων εμφανίζουν ένα ευτηκτικό σημείο. Αυτά περιλαμβάνουν Al- , Be-, Cr- , Cu- , Fe- , Mg- , Mn- και κράματα με βάση το Νικέλιο.

Τα κράματα τήκονται κορεσμένα σε Υδρογόνο κάτω από πίεση και έπειτα στερεοποιούνται ελεγχόμενα μειώνοντας προοδευτικά την πίεση. Κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης στερεό μέταλλο και υδρογόνο σχηματίζονται από μια αέρια ευτηκτική αντίδραση με αποτέλεσμα το πορώδες υλικό να περιέχει πόρους γεμισμένους με υδρογόνο. Αυτά τα υλικά αναφέρονται ως GAZARS.

Μια βασική προσέγγιση της διαδικασίας έχει ως εξής:

Ένας κλίβανος τοποθετείται μέσα σε ένα δοχείο που χρησιμοποιείται για να λιώσει ένα κράμα υπό μια κατάλληλη πίεση υδρογόνου (5- 10 ατμόσφαιρες υδρογόνου).

Αυτό το τήγμα κατόπιν χύνεται σε ένα καλούπι όπου κατευθυνόμενη ευτηκτική στερεοποίηση επιτρέπεται να συμβεί.

Αυτό οδηγεί σε ένα αντικείμενο που περιέχει ένα αξιόλογο (έως 30%) κλάσμα όγκου πόρων. Το κλάσμα όγκου πόρων και ο προσανατολισμός των πόρων είναι μια ευαίσθητη λειτουργία της χημείας του άνω κράματος, η υποπίεση τήξης, η υπερθέρμανση τήξης (τα όποια επιδρούν στην διαλυτότητα του υδρογόνου στο υγρό μέταλλο), το θερμοκρασιακό πεδίο στο υγρό κατά την διάρκεια της στερεοποίησης και ο ρυθμός στερεοποίησης είναι τόσες πολλές μεταβλητές που ο έλεγχος και η βελτιστοποίηση της δομής των πόρων είναι δύσκολη.

Η μέθοδος θέτει ορισμένα ζητήματα ασφάλειας και στην παρούσα μορφή είναι μια μέθοδος κατά παρτίδες. Ως αποτέλεσμα αυτού, τα υλικά που παράγονται με αυτήν την διαδικασία είναι πιο ακριβά.

Παρακάτω βλέπουμε κάποιες ιδιότητες των αφρών συγκεντρωμένες ανάλογα με την μέθοδο παράγωγης ενδεικτικά:

Property	Alporas	Alulight	Cymat	ERG	Inco	Porvair*
Material	Al	Al	Al-SiC	Al	Ni	Various
Structure	Closed	Closed	Closed	Open	Open	Open
Density (Mg/m ³)	0.2-0.25	0.3-1.0	0.07-0.56	0.16-0.25	0.26-0.37	Various
Relative density	0.08-0.1	0.1-0.35	0.02-0.2	0.05-0.1	0.03-0.04	Various
Young's Modulus (GPa)	0.4-1.0	1.7-12	0.02-2.0	0.06-0.3	0.4-1.0	Various
Shear Modulus (GPa)	0.3-0.35	0.6-5.2	0.001-1.0	0.02-0.1	0.17-0.37	Various
Poissons ratio	0.31-0.34	0.31-0.34	0.31-0.34	0.31-0.34	0.31-0.34	Various
Compressive Strength (MPa)	1.3-1.7	1.9-14.0	0.04-7.0	0.9-3.0	0.6-1.1	Various
Tensile Strength (MPa)	1.6-1.9	2.2-30	0.05-8.5	1.9-3.5	1.0-2.4	Various
Melting Point (K)	910-920	840-850	830-910	830-920	1700-1720	Various
Max service temperature (K)	400-420	400-430	500-530	380-420	550-650	Various
Min service tempertaure (K)	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	Various
Specific heat (J/kg.K)	830-870	910-920	830-870	850-950	450-460	Various
Thermal conductivity (W/m.K)	3.5-4.5	3.0-35	0.3-10	6.0-11	0.2-0.3	Various
Resistivity (ohm.m EXP -08)	210-250	20-200	90-3000	180-450	300-500	Various

Πίνακας φυσικών ιδιοτήτων μερικών αφρωδών υλικών

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: ΦΥΣΙΚΕΣ, ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ , ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΑΦΡΩΝ

Ο πίνακας αυτός μας παρέχει κάποιες βασικές ιδιότητες των ευρέως χρησιμοποιούμενων άφρων με τις αντίστοιχες μεθόδους για συγκεκριμένα υλικά με δεσπόζουσα θέση το αλουμίνιο όπως : δομή κελιών (ανοιχτά, κλειστά), πυκνότητα (σε $\frac{\text{τόνους}}{\text{m}^3}$), σχετική πυκνότητα, μέτρο ελαστικότητας (young modulus Gpa), μέτρο διάτμησης (shear modulus Gpa), λόγο poisson (poisson ratio), αντοχή θλίψης (compressive ratio Mpa), αντοχή εφελκυσμού (tensile strength Mpa), σημείο τήξης (melting point σε KELVIN), μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας (max, min service temperature σε Κέλβιν), ειδική θερμότητα (Cr, Specific heat σε $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$), θερμική συναγωγιμότητα (thermal conductivity , $(\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}})$), ηλεκτρική αντίσταση .

3. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Επειδή οι μηχανικές ιδιότητες των μεταλλικών αφρών εξαρτώνται από τις μηχανικές ιδιότητες των μητρικών τους υλικών, αξίζει να μελετήσουμε συνοπτικά και να παραθέσουμε κάποιες βασικές και συγκεντρωμένες ιδιότητες κάποιων βασικών μετάλλων και κραμάτων που είναι μητρικά του αφρού.

Ένα λεπτό σημείο που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι το μέσο αφροποίησης και το βασικό μέταλλο που περιέχει ενσωματώνεται και αυτό στο τελικό κράμα κι ως εκ τούτου πρέπει να λαμβάνεται και αυτό υπόψη κατά τον σχηματισμό ενός αφρού.

Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων και των κραμάτων στο γραμμικό ελαστικό τμήμα του διαγράμματος τάσης παραμόρφωσης καθορίζονται:

- Από το μετρό διάτμησης σε μια θερμοκρασία αναφοράς
- Από το μετρό ελαστικότητας σε μια θερμοκρασία αναφοράς
- Από τον λόγο του poisson
- Από την θερμοκρασία που υπάρχει την συγκεκριμένη χρονική στιγμή

Επίσης βασική παράμετρος για τον καθορισμό των ιδιοτήτων είναι η ομοιομορφία ή μη των τρόπων που υπάρχει κατά τις 3 διευθύνσεις των αξόνων X , Y , Z, καθορίζοντας έτσι αν το υλικό είναι ισότροπο, ανισότροπο ή αν έχει κάποιες ενδιάμεσες διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες ανάλογα με τους άξονες του υλικού.

Η μορφή ανισοτροπίας είναι κάτι που έχει να κάνει με την μέθοδο παράγωγης του υλικού (για παράδειγμα από την κατεύθυνση της έλασης κτλ). Έτσι δεν είναι κάτι μονοσήμαντο που έχει να κάνει μόνο με το υλικό.

Για ισότροπα υλικά ισχύει η σχέση :

$$G = \frac{E}{[2 * (1 + \nu)]}$$

Όπου:

E= το μετρό ελαστικότητας σε οποιαδήποτε θερμοκρασία που φυσικά είναι διαφορετικό από θερμοκρασία σε θερμοκρασία.

V= ο λόγος poisson

G= το μετρό διάτμησης που και αυτό κατά συνέπεια είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας.

3.1. ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Το μέτρο ελαστικότητας σε θερμοκρασία αναφοράς τους 0 βαθμούς κελσίου εκτιμάται από την σχέση:

$$E_s^0 = 100 * K * \frac{T_m}{\Omega}$$

όπου :

Tm = θερμοκρασία τήξης του μετάλλου ή του κράματος.

Ω= ο μοριακός όγκος του υλικού

K= η σταθερά Boltzmann =1, 38*10⁻²³ J/KELVIN

Παράδειγμα: λαμβάνω ως υλικό καθαρό Αλουμίνιο το οποίο έχει μοριακό όγκο

$$\Omega = 10 \frac{cm^3}{mol}$$

Το σημείο τήξης του αλουμινίου είναι **Tm=933, 52 Kelvin**

Αρά στους 0 Kelvin το μέτρο ελαστικότητας του καθαρού Αλουμινίου είναι:

$$E_S^0 = 100 * K * \frac{Tm}{\Omega} = 100 * 1,38 * [10^{-23}] * \frac{933,52}{10} J * \frac{mol}{cm^3} \left(N * m * \frac{mol}{cm^3} \right)$$

$$E_S^0 = 1,28826E(-13)N * \frac{mol}{cm^2} \text{ το } 1 \text{ mol} = 6,02214199 * 10^{23} \text{ άτομα αλουμινίου}$$

Αρά:

$$E_S^0 = 1,2826 * [10^{-13}] * 6,02214199 * 10^{23} = \frac{77,581GN}{m^2}$$

Αυτό το μετρό ελαστικότητας είναι μεγαλύτερο κατά $8,5 \frac{GN}{m^2}$ από την πειραματικά μετρούμενη τιμή για θερμοκρασίες δωματίου, πράγμα λογικό αφού η τιμή που πήραμε από την θεωρητική σχέση είναι στο απολυτό 0 και η τιμή για θερμοκρασία δωματίου δίνεται από την σχέση που συσχετίζει την πραγματική θερμοκρασία, της οποίας η θεωρητική τιμή βρίσκεται από την παρακάτω σχέση :

$$Es(Tm) = E_S^0 * \left(1 - \alpha m * \frac{T}{Tm} \right)$$

όπου το αm =σταθερά περίπου 0,5

Αρά για το αλουμίνιο : $Es(300K) = 77,581 * (1 - 0,5 * 300/933,52) = 65 \text{ GN/m}^2$ στους 27 βαθμούς κελσίου, γεγονός που επιβεβαιώνει τις πειραματικές μετρήσεις που είναι για τους 20 βαθμούς κελσίου $E = 69 \text{ GN/m}^2$, διαφορά που μπορεί να εξηγηθεί από τα εσωτερικά ελαττώματα, ακαθαρσίες κλπ.

Είναι προφανές ότι για $T=0$, προκύπτει ότι: $Es(0) = E_S^0$, επίσης το μέτρο ελαστικότητας βαίνει μειούμενο καθώς ανεβαίνει η θερμοκρασία του μετάλλου ή του κράμματος με θεωρητικά μέγιστη αυτή του σημείου τήξης (ουσιαστικά πολύ πιο κάτω γιατί για πολύ υψηλές θερμοκρασίες εμφανίζονται και φαινόμενα εντόνου ερπυσμού για σταθερή τάση). Ή

Όπως είδαμε πιο πάνω, για την περίπτωση των ισότροπων υλικών βρίσκοντας το $E(T)$ και έχοντας και τον λόγο poisson ορίζεται και το μετρό διάτμησης για την εν λόγω θερμοκρασία.

Για ορθοτροπία και στην γενική περίπτωση ανισότροπων υλικών, υπάρχουν τόσα μέτρα ελαστικότητας όσοι είναι και οι άξονες που παρουσιάζουν διαφορετική ανισοτροπία.

Οι σχέσεις που προκύπτουν από τον γενικευμένο νόμο του Hook (δεν περιλαμβάνει τοπικές ανομοιομορφίες και ατέλειες) δίνουν τις τάσεις εφόσον ξέρουμε την παραμόρφωση στις αντίστοιχες διευθύνσεις και εφόσον ξέρουμε το μέτρο ελαστικότητας και τον λόγο poisson του υλικού (ο λόγος poisson δίνεται όπως και το μέτρο ελαστικότητας). Αντίστροφα ξέροντας τις τάσεις βρίσκουμε τις παραμορφώσεις. Δίνονται παρακάτω οι σχέσεις:

$$e_x = \left(\frac{1}{E} \right) * [\sigma_x - \nu * (\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$e_y = \left(\frac{1}{E} \right) * [\sigma_y - \nu * (\sigma_x + \sigma_z)]$$

$$ez = \left(\frac{1}{E}\right) * [\sigma z - \nu * (\sigma y + \sigma x)]$$

Στην γενική περίπτωση της γραμμικής ελαστικής περιοχής η ανοιγμένη μεταβολή του όγκου δίνεται από την σχέση $\frac{\Delta V}{V} = \left[\frac{1-2\nu}{E}\right] * (\sigma x + \sigma y + \sigma z)$, από όπου προκύπτει για $\nu=1/2$ ότι η μεταβολή του όγκου ανεξάρτητα των τάσεων είναι μηδενική.

Ανεξάρτητα από το εάν είμαστε στην ελαστική ή στην πλαστική περιοχή, το μέτρο συμπίεσεως ή το μέτρο διόγκωσης βρίσκεται εάν ξέρουμε μόνο τις παραμορφώσεις :

$\Theta = \Delta V/V = [(1+ez)*(1+ex)*(1+ey)-1]/1$, όπου εάν αμελήσουμε του όρους που αποτελούν γινόμενα παραμορφώσεων (πχ για δοκίμιο χαλκού με παραμορφώσεις της τάξεως του 0,1 υπάρχουν όροι δεύτερης και τρίτης τάξης 0,01 και 0,001 αντίστοιχα, $e_i * e_j * e_k$ ή $e_i * e_j$) προκύπτει:

$$\Theta = \frac{\Delta V}{V} = ez + ex + ey \text{ (περίπου) [37]}$$

Αντίθετα στην πλαστική περιοχή στα ιδανικά χωρίς πορώδες μέταλλα ο λόγος poisson θεωρείται 0,5 και σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις είναι η διόγκωση μηδενική καθώς ο Όρος $[1-2\nu]$ μηδενίζεται (θεωρούμε ότι δεν υπάρχει διόγκωση ή συμπίεση).

Τα κριτήρια διαρροής είναι αυτά που μας δείχνουν πότε το υλικό αρχίζει να διαρρέει πλαστικά και εκεί εφαρμόζονται διάφορα κριτήρια με επικρατέστερο αυτό του Misses και Tesca, όπου λαμβάνεται η ισοδύναμη τάση που επιφέρουν οι διάφορες ασκούμενες τάσεις και βρίσκουμε αν αυτή η ισοδύναμη τάση που θεωρούμε ότι αντιστοιχεί σε εφελκυστική ή θλιπτική μονοαξονική καταπόνηση είναι μικρότερη από την τάση διαρροής.

$$\text{Κριτήριο Misses : } \sigma_{ισ} = \left\{ \frac{[(\sigma_3 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}{2} \right\}^{0,5} = \sigma_y$$

Κριτήριο Tesca : $\sigma_{ισ} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 = \bar{\tau} K$ όπου K είναι η τάση διαρροής σε διάτμηση.

Οι σχέσεις αυτές γενικά ισχύουν όσο το υλικό είναι στην ελαστική περιοχή και δεν έρπει υπό σταθερή τάση αλλιώς δημιουργείται ερπυσμός. Σε υψηλές θερμοκρασίες τα φαινόμενα ερπυσμού στα μέταλλα είναι ιδιαίτερα υψηλή ενώ σε χαμηλές (ανάλογα και με την τάση) μηδενική. Ο ερπυσμός αρχίζει να εμφανίζεται περίπου από το 33% του σημείου τήξης του μέταλλου όποτε δεν έχει νόημα ο υπολογισμός σταθερών μέτρων ελαστικότητας.

3.2. ΚΡΑΤΥΝΣΗ

Μετά την ελαστική γραμμή αρχίζει το υλικό μας να παραμορφώνεται πλαστικά. Το σημείο στο οποίο συμβαίνει αυτό ονομάζεται σημείο διαρροής και η τάση για την οποία συμβαίνει αυτό συμβολίζεται ως $\sigma_{ys} = \sigma_d$.

Για κρατυνόμενα υλικά η τάση σε σχέση με την παραμόρφωση δίνεται από την σχέση : $\sigma_s = \sigma_{ys} + B * \epsilon_{pl}^m$ όπου το ϵ_{pl} είναι η πλαστική παραμόρφωση, m είναι περίπου από 0,05 μέχρι 0,5 συνήθως ενώ η B είναι μια σταθερά.

Η τάση διαρροής σε θερμοκρασίες δωματίου θεωρείται σταθερή ενώ στην πραγματικότητα, όταν η θερμοκρασία αυξάνει, η τάση διαρροής μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ αυξάνει με αύξηση της ταχύτητας παραμόρφωσης σύμφωνα με την σχέση :

$$\frac{\sigma_{ys}}{E_s} = \left[\frac{\sigma_{ys}^0}{E_s^0} \right] * \left[1 - A * \left(\frac{T}{T_m} \right) * \ln \left[\frac{\epsilon_{os}}{\epsilon} \right] \right]$$

Η ταχύτητα παραμόρφωσης έχει να κάνει με την ταχύτητα που εφαρμόζονται οι παραμορφώσεις πάνω στο δοκίμιο και δεν έχουν να κάνουν με τον ερπυσμό de facto.

3.3. ΕΡΠΥΣΜΟΣ

Ο ερπυσμός εφαρμόζεται όταν για σταθερή τάση (που μπορεί να είναι οποιαδήποτε στην πλαστική πχ περιοχή) το υλικό συνεχίζει να ρέει με κάποιο ρυθμό παραμόρφωσης.

$$\epsilon = A_s * \left[\left[\frac{\dot{\sigma}}{\sigma_{os}} \right]^{n_s} \right] * e^{\left[\frac{Q_s}{R*T} \right]}$$

A_s , n_s , sos , είναι σταθερές ερπυσμού και η Q_s είναι η ενέργεια ενεργοποίησης. Παρακάτω παραθέτουμε κάποιους πίνακες, όπου αναγράφονται οι κυριότερες μηχανικές ιδιότητες των υλικών για κάποια βασικά μέταλλα ή κράματα που χρησιμοποιούμε στην βιομηχανία

Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο.3-Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο.-1: ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Μηχανικές ιδιότητες στερεών μετάλλων				
Υλικό	Πυκνότητα Mg/m^3	Μετρό ελαστικότητας $\left(\frac{GN}{m^2}\right)$	Τάση διαρροής $\sigma_{ys} \left(\frac{MN}{m^2}\right)$	Τάση θραύσης $\sigma_{fs} \left(\frac{MN}{m^2}\right)$
Καθαρό αλουμίνιο	2,7	69	40	200
Χρώμιο	7,2	289	-	-
Σίδηρος	7,9	196	50	200
Χαλκός	8,9	124	60	400
Νικέλιο	8,9	214	70	400
Ασημί	10,5	76	55	300
Χάλυβες	7,6-8,1	190-210	200-1500	500-2000
Κράματα χαλκού	7,5-9	120-150	60-960	250-1000
Κράματα αλουμινίου	2,6-2,9	69-79	100-627	300-700
Τιτάνιο και κράματα του	4,3-5,1	80-130	180-1320	300-1400
Ψευδάργυρος και κράματα του	5,2-7,2	43-96	160-421	200-500
Κράματα μαγνησίου	1,74-2	41-45	80-300	125-380
Κράματα μόλυβδου	10,7-11,3	14	11-55	14-60

Η τάση διαρροής που έχει το κράμα μας είναι σημαντικό μέγεθος, καθοριστικό και για τις ιδιότητες του αφρού που θα σχηματιστεί με βάση αυτό. Επίσης οι ατέλειες

που εισάγουν στο κράμα μας οι διαφορές ενώσεις που χρησιμεύουν σαν βοηθητικές στον σχηματισμό των άφρων, λειτουργούν έτσι ώστε να έχουμε ελαφρά (ή σημαντικά σε ορισμένες περιπτώσεις) διαφορετικές ιδιότητες του κράματος που εν τελεί αποτελεί τον αφρό. Τις ακριβείς ιδιότητες του κράματος που αποτελεί τον αφρό τις βρίσκουμε πειραματικά (να σημειώσουμε ότι η τάση διαρροής είναι μια μόνο παράμετρος που επιδρά στην «μηχανική» του αφρού)

4. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Ένα στερεό υλικό (έτσι και τα μέταλλα) έχουν εσωτερική ενέργεια ίση με $E_i = 3 \cdot R \cdot T / M$
 Οπού : M = το μοριακό βάρος του μετάλλου (kg/mol)

T = Η θερμοκρασία του μετάλλου

Βασική χαρακτηριστική ιδιότητα των μετάλλων είναι η ειδική θερμότητα C_{ps} , ορίζεται σαν η θερμότητα που πρέπει να δοθεί στο σώμα ώστε η θερμοκρασία του να αυξηθεί κατά 1 βαθμό Kelvin και δίνεται από την σχέση :

$C_{ps} = 3 \cdot \frac{R}{M}$ (η σχέση αυτή προσεγγίζει ικανοποιητικά και τα πειραματικά δεδομένα για τα μέταλλα)

Από αυτή την σχέση βλέπουμε ότι όσο μεγαλύτερο μοριακό βάρος, έχουμε μικρότερη ειδική θερμότητα, ενώ το αντίστροφο ισχύει όταν έχουμε μικρότερο μοριακό βάρος. Αυτό σημαίνει ότι όσο πιο μεγάλο είναι το μοριακό βάρος, τόσο πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη θερμότητα για την άνοδο της θερμοκρασίας κατά 1 Kelvin σε 1 kg μετάλλου (ή κράματός του).

Ένας άλλος βασικός συντελεστής που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο να τον γνωρίζουμε σε εφαρμογές με μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας (και όχι μόνο) είναι ο συντελεστής θερμικής διαστολής του μετάλλου, του οποίου η θεωρητική έκφραση δίνεται από την σχέση :

$$\alpha_s = C \cdot \frac{k}{E_s \cdot \Omega} \text{ οπού } C = \text{σταθερά}$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι με γνωστό από την θεωρητική έκφραση του μέτρου ελαστικότητας, με γνωστό από πίνακες του μοριακού όγκου του υλικού και με γνωστή την σταθερά Boltzmann μπορεί να προσδιοριστεί ο συντελεστής C με ημιεμπειρικές τεχνικές (όπως με εξίσωση της σχέσης αυτής με την πειραματική της τιμή).

Οι βασικές θερμοδυναμικές ιδιότητες του υλικού δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Μέταλλο-κράμα	Σημείο τήξης (KELVIN)	Θερμική διαστολή α_s [W/(m*K)]	Θερμική αγωγή λ_s [$\mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{K})$]	Ειδική θερμότητα
αλουμίνιο	933	24	230	1080
Κράματα αλουμινίου	Μικρότερη από 933	20-24	88-160	920-960
Σίδηρος	1809	11,7	75	460
Χάλυβες	Μικρότερο από 1809	19,7	420	234
Χρώμιο	2148	6,2	67	936
Μαγνήσιο	923			
Κράματα μαγνησίου	<923	26	42-140	1020
Νικέλιο	1726	13,3	92	730

Κράματα νικελίου	<1726	12-14	15-65	380-460
Χαλκός	1356	16,5	384	493
Κράματα χαλκού	<1356	14-17	50-230	320-400
Μόλυβδος και κράματα	<600	28-30	27-35	130-140
Χρυσός	1336	14,2	297	130
Κοβάλτιο και κράματα	<1768	12-13	40-69	400-600
Τιτάνιο και κράματα	1943	6-7	30-54	100-168
Ψευδάργυρος και κράματα	<505	20-40	100-112	400-420
Ουράνιο	1405	17	26	126
Βολφράμιο και κράματα	<3680	4-5	160-190	140-145
Βηρύλλιο	1277	12,4	158	1883
μπρούντζοι	<1200	14-20	110-230	380
λευκόχρυσος	2042	8,9	71	130
Ασημί	1234	19,7	420	234

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1: ΒΑΣΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ-ΚΡΑΜΑΤΩΝ

Η επίδραση της θερμοκρασίας στις μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων είναι η εξής: Όσο η θερμοκρασία αυξάνεται, η τάση διαρροής, η τάση αναλογίας και το μέτρο ελαστικότητας καθώς και η μέγιστη τάση μειώνονται ενώ αυξάνονται η επιμήκυνση θραύσεων, ο λόγος poisson, η ελάττωση του εμβαδού διατομής την στιγμή της θραύσεως.

Τελειώνοντας αυτό το κεφαλαίο είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι η πειραματική τιμή του λόγου τάσης θραύσεως προς το μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με την θεωρητική τιμή αυτού του λόγου για θραύση κρυστάλλων δεν έχει καμιά σχέση και δεν μπορούν να εξαρθούν συμπεράσματα και αυτό γιατί η δομή ενός δοκιμίου ποτέ δεν μπορεί να είναι απόλυτα τέλεια όπως αυτή των θεωρητικών εξιδανικευμένων κρυσταλλικών δόμων.

5. ΔΟΜΗ ΑΦΡΩΝ

Η δομή των αφρών καθορίζεται από το μέγεθος των πόρων το σχήμα τους και την τοπολογία τους.

Ως προς το σχήμα οι πόροι μπορεί να είναι τριγωνικοί, τετραγωνικοί, παραλληλόγραμμοι, πολυγωνικοί.

Πέρα από το σχήμα τους, οι πόροι αποτελούνται από ακμές που μπορεί να είναι κενοί στις έδρες τους ή στα σύνορα τους να έχουν μια μεμβράνη που έχει κάποιο πάχος.

Θεωρούμε ότι η μεμβράνη είναι πιο λεπτή συνήθως από το πάχος των ακμών. Με αυτόν τον τρόπο και έχοντας καθορισμένη την γεωμετρία μπορούμε να πάρουμε τον λόγο του υλικού που υπάρχει στις ακμές των κελιών και των εδρών, ορίζουμε τον λόγο του υλικού των ακμών προς τον συνολικό ϕ

$$\phi = \frac{[\text{μάζα υλικού στις ακμές}]}{[\text{συνολική μάζα κελίου σε ακμες και εδρες}]}$$

Το ϕ είναι πολύ χρήσιμο καθώς με καθορισμένη την πυκνότητα του αφρού και γνωρίζοντας το ϕ μπορούμε να καθορίσουμε και την γεωμετρία του αφρού (γιατί κατ' ουσία αυτό συμβαίνει) και έτσι μπορούμε έχοντας τα χαρακτηριστικά (μηχανικά) του υλικού μπορούμε να καθορίσουμε αναλυτικά από ημιεμπειρικές σχέσεις ποσότητες όπως μετρώ ελαστικότητα αφρού, τάση plateau, τάση πυκνοποίησης, τάση διαρροής αφρού, θερμική αγωγιμότητα αφρού κλπ.

Το σχήμα των κελιών περά από τον τύπο κελιού του αφρού (ανοικτού τύπου και κλειστού τύπου) και περά από το πορώδες (που μπορεί να είναι το ίδιο με μικρούς πόρους αλλά πόλους η μεγάλους πόρους και λιγότερους αριθμό) μπορεί να είναι τετράεδρο, τριγωνικό πρίσμα, εξαγωνικό πρίσμα, οκτάεδρο, ρομβικό δωδεκάωρο, πενταγωνικό δωδεκάωρο, δεκατετράωρο, ορθογώνιο πρίσμα.

Επίσης με δεδομένη γεωμετρία ακμών, καθορίζεται και το μέγεθος του πόρου, εάν ξέρουμε το μέγεθος του κελιού, το πάχος των δοκίδων και το πάχος των εδρών.

Από μελέτες προκύπτει ότι η τάση στους μεταλλικούς αφρούς είναι να έχουν $f = 14$ έδρες και μέσο αριθμό ακμών ανά έδρα $n \sim 2$

Τα κύρια χαρακτηριστικά σε ένα μεταλλικό αφρό και η ονοματολογία τους για κυψέλη τετραγωνική είναι :

Ονοματολογία κύριων χαρακτηριστικών ενός μεταλλικού αφρού (για κυβική κυψέλη)	
T	Πάχος (ακμής t_e , εδρών t_f)
E	πορώδες
L	Μηκος δεκάδας
Φ	Λόγος μάζας υλικού στις ακμές προς το συνολικό
P^*	Προφανής πυκνότητα (πυκνότητα αφρού)
P_s	Πυκνότητα υλικού δεκάδων (πυκνότητα μητρικού)

ΠΙΝΑΚΑΣ.5-1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ

Στην γενική περίπτωση έχουμε ένα οποιοδήποτε σχήμα κελιού όπου κάποιες χαρακτηρίστηκες ιδιότητες καθορίζουν το ϕ και την σχετική πυκνότητα αν γνωρίζουμε τον αριθμό των εδρών που ακουμπούν σε μια ακμή Z_f , τον αριθμό των ακμών που ακουμπούν σε μια κορυφή Z_e , τον πάχος των ακμών t_e και το πάχος των εδρών t_f .

Οι δείκτες f , e συμβολίζουν τις έδρες και τις ακμές αντίστοιχα από το faces και edges.

Ο μέσος αριθμός ακμών σε μια έδρα εκτιμάται από τον τύπο:

$$n_{\text{μεσο}} = \left[Z_e * \frac{Z_f}{[Z_e - 2]} \right] * \left[1 - \frac{2}{f} \right],$$

όπου το f συμβολίζει τον αριθμό των εδρών του κελιού. Για να είμαστε ποιο ακριβείς επειδή κάθε κελί δεν έχει ακριβώς το ίδιο σχήμα και από αφρό σε αφρό διαφέρει και η κατανομή των κελιών, ανάλογα με την μέθοδο παραγωγής, είναι σημαντικό για τα Z_e , Z_f , f να λαμβάνουμε κάποια μέση τιμή τους. Οι τιμές αυτών των 3 γεωμετρικών στοιχείων καθορίζουν το σχήμα αλλά όχι το μέγεθος. Τα στοιχεία που καθορίζουν το μέγεθος είναι το πάχος των ακμών, το πάχος των εδρών, το ϕ σε συνδυασμό με το μήκος της ακμής ή τη διάμετρο του κελιού.

Στη γενική περίπτωση :

$$\phi = \frac{t_e^2}{\left[t_e^2 + Z_f * t_f * \frac{1}{n_{\text{μεσο}}} \right]}$$

$$\frac{[\rho^*]}{\rho_s} = \left(\frac{f}{C4} \right) * \left\{ n_{\text{μεσο}} * \frac{t^2}{[2 * Z_f * l^2]} + 0,5 * \frac{t_f}{l} \right\}$$

$$\frac{t_f}{l} = \left[2 * \frac{C4}{f} \right] * (1 - \phi) * \frac{[\rho^*]}{\rho_s}$$

$$\frac{t_e}{l} = \left\{ 2 * Z_f * C4 * \phi * \frac{[\rho^*]}{[n_{\text{μεσο}} * f * \rho_s]} \right\}^{0,2}$$

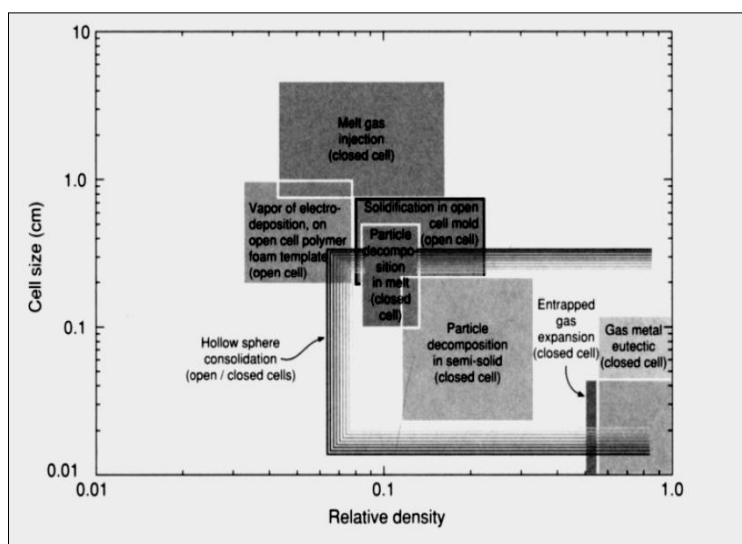
Για εξιδανικευμένες περιπτώσεις, όπου $t_e=t_f$ διαθέτουμε, πινάκες όπου ανάλογα με το σχήμα, την συνδεσιμότητα ακμών και εδρών, τον μέσο αριθμό των ακμών ανά έδρα, λαμβάνουμε την έκφραση της σχετικής πυκνότητας με παραμέτρους το σχήμα των κελιών, το ανηγμένο στο μήκος πάχος και τον λόγο $Ar=h/l$, όπως για παράδειγμα το τετραγωνικό πρίσμα :

$$\frac{[\rho^*]}{\rho_s} = 2 * \left(\frac{t}{l} \right) * \left[1 + \frac{1}{2 * Ar} \right]$$

Η σύνθεση για ένα μείγμα κελιών διαφόρων γεωμετριών είναι πολυπλοκή, η πυκνότητα μπορεί να βρεθεί πειραματικά με μεθόδους άμεσες, όπως μέτρησης του βάρους και του όγκου, το μέγεθος του κελιού με δειγματοληπτικό τρόπο πάνω σε μια τομή του αφρού και το μέτρο ελαστικότητας πειραματικά.

Υπάρχουν μέθοδοι παρασκευής αφρών που δίνουν ελεγχόμενες σχεδόν απόλυτα γεωμετρίες κελιών, αλλά άλλες που δίνουν ένα φάσμα ανάλογα με τις συνθήκες αφροποίησης. Πχ η συμπίεση μίγματος κόνεων και αποπλενόμενου πληρωτικού μέσου, όπου μετά την απομάκρυνσή του λαμβάνει χώρα πυροσυσσωμάτωση, δίνει καλή ομοιομορφία μεγέθους πόρων και η κατανομή τους εξαρτάται από την ανάδευση. Ο έλεγχος αυτός γίνεται επιλέγοντας συγκεκριμένη διάμετρο σκόνης αποπλενόμενου υλικού ή φάσμα διαμέτρων σε στενά όρια, ενώ η μέθοδος της αφροποίησης από υγρή φάση με έκχυση και ανάδευση αερίου είναι πιο απαιτητική όσον αφορά την ομοιογενή ανάπτυξη στο υλικό των πόρων.

Παρακάτω παραθέτουμε έναν πίνακα που αποδίδει χονδρικά το μέγεθος των πόρων και την σχετική πυκνότητα που μπορούμε να πάρουμε με διάφορες μεθόδους κατασκευής μεταλλικών αφρών:



ΕΙΚΟΝΑ:5-1 ΜΕΓΕΘΗ ΚΕΛΙΩΝ ΑΦΡΩΝ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΜΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ

6. ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΟΥ

Θα ασχοληθούμε λίγο παρακάτω με το Αλουμίνιο καθώς είναι ένα ευρέως διαδεδομένο μέταλλο που χρησιμοποιείται στην παράγωγη μεταλλικών άφρων.

Το καθαρό αλουμίνιο θεωρείται εκείνο που έχει μέγιστο ποσοστό άλλων στοιχείων (ως ακαθαρσιών) μέχρι 1%.

Το αλουμίνιο τυποποιείται σύμφωνα με τα βασικά στοιχεία κραματοποίησης που περιέχει στις παρακάτω 8 σειρές:

1) Σειρά 1000 :

Κράματα με περιεκτικότητα σε αλουμίνιο πάνω από 99%:

Η ελάχιστη περιεκτικότητα του καθαρού αλουμινίου είναι 99 % και υποδιαιρείται αυτή η σειρά ανάλογα με την περιεκτικότητά του, αναγκαστικά όμως πάνω από 99%.

Χαρακτηρίζεται από υψηλή αντίσταση στην διάβρωση, υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και εύκολη κατεργασιμότητα.

Οι μηχανικές του αντοχές είναι σχετικά χαμηλές και οι μηχανικές αντοχές του αποκτούνται από τον βαθμό και το είδος της μηχανικής κατεργασίας που υφίσταται.

2) Σειρά 2000: κράματα αλουμινίου – χαλκού:

Τα κράματα αυτά αποκτούν σημαντικές αντοχές μετά από θερμική επεξεργασία έχει σημαντικά υψηλότερη αντοχή και μηχανικές ιδιότητες και η αντοχή τους θεωρούνται υψηλότερες από αυτή του μέσου χάλυβα.

3) Σειρά 3000: κράματα αλουμινίου μαγκανιού :

Χαρακτηριστικό τους είναι η εύκολη μορφοποίηση, η καλή αντοχή στην ατμοσφαιρική διάβρωση, η ευκολία συγκόλλησης με τις συνήθεις μεθόδους.

4) Σειρά 4000: κράματα αλουμινίου - πυριτίου :

Η προσθήκη πυριτίου ελαττώνει το σημείο τήξης του αλουμινίου

5) Σειρά 5000 : κράματα αλουμινίου - μαγνησίου (κράμα αλουμινίου αυτής της σειράς συνάντησα στην εταιρία VETA S.A., όπου έκανα την δίμηνη πρακτική και συγκεκριμένα αλουμίνιο 5083)

Τα χαρακτηριστικά των κραμάτων αυτής της σειράς είναι η πολύ καλή συγκολλητικότητα και κατεργασιμότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες, μεγάλη αντιδιαβρωτική συμπεριφορά στο θαλάσσιο περιβάλλον και μέσες μηχανικές αντοχές. Χρησιμοποιείται στην ναυπηγική στην χημική βιομηχανία στις οικοδομές, στα μεταφορικά μέσα κλπ. Βασικά κράματα αυτής της σειράς είναι τα : 5005 , 5754 , 5083 , 5086 , 5182 , 5052

6) Σειρά 6000 : κράματα αλουμινίου – μαγνησίου –πυριτίου

7) Σειρά 7000 : κράματα αλουμινίου - ψευδαργύρου –μαγνησίου

8) Σειρά 8000: διαφορά άλλα κράματα αλουμινίου (λίθου ,σιδηρούχα , κ.α)

Από αυτές τις σειρές προκύπτει ότι τα βασικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την παράγωγη κραμάτων αλουμινίου είναι :

1) Ο χαλκός

2) Ο ψευδάργυρος

3) Ο σίδηρος

- 4) Το μαγνήσιο
- 5) Το πυρίτιο
- 6) Το μαγκάνιο

Τα χαρακτηριστικά του μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Είναι πολύ ελαφρύ μέταλλο αρά με χαμηλή πυκνότητα. Έχει πολύ καλά χαρακτηρίστηκα θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας, ενώ είναι άφλεκτο με σημείο τήξης στους 660 C. (Τα κράματα του παρουσιάζουν σημείο τήξεως μεταξύ των 600 – 660 C)
- Διαμορφώνεται, ελάσσεται, εξελάσσεται, διελάσσεται και συγκολλείται με ευκολία αρά είναι ιδανικό μέταλλο κατασκευών.
- Σε δεδομένη κατάσταση φόρτισης, η αλουμινένια κατασκευή παρουσιάζει τρεις φορές μεγαλύτερη μήκυνση από αυτή του σιδηρού.
- Είναι μαζί με τα κράματά του ανθεκτικό στην διάβρωση καθώς έχει στην επιφάνειά του ένα λεπτό στόμα οξειδίου λόγο της χημικής συγγένειας του αλουμινίου με το οξυγόνο δημιουργώντας οξείδιο του αλουμινίου, με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η εξάπλωση της διάβρωσης.
- Δεν καίγεται, δεν μαγνητίζεται
- Δεν είναι τοξικό, παρουσιάζει χαμηλή διαπερατότητα ως φιλμ.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΘΑΡΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ		
	στοιχεία	Μονάδα μέτρησης
Ατομικό βάρος	26,98	-
Πυκνότητα	2,6898	$\frac{gr}{cm^3}$
Σημείο τήξης	660,2	C
Γραμμική διαστολή	$23,5 * 10^{-6}$	$\frac{m}{m}$ C
Ηλεκτρική αντίσταση	2,69	μω*cm
Μέτρο ελαστικότητας	68,3	GPa
Μέτρο στρέψης	25,5	GPa
Συντελεστής Poisson	0,34	-

Πίνακας 6-1: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΘΑΡΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

7. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΑΓΝΗΣΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΟΥ

Ένα μέταλλο εξαιρετικά ελαφρύ που χρησιμοποιείται για την παραγωγή αφρών είναι το μαγνήσιο. Ως εκ τούτου, θα εξετάσουμε τις ιδιότητές του ως μέταλλου που παρατίθενται συγκεντρωμένες στον παρακάτω πίνακα:

ΠΙΝΑΚΑΣ:7-1: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΑΓΝΗΣΙΟΥ

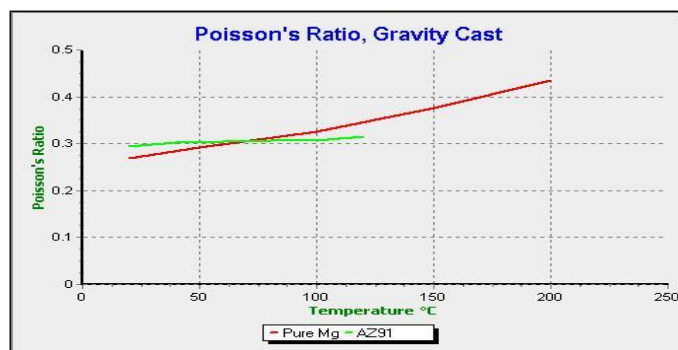
Ιδιότητες μαγνησίου	
Σημείο τήξης (K)	923
πυκνότητα g/cm ³	1,738
Κρυσταλλική δομή	Εξαγωνική (hcp)
Σκληρότητα (BRINEL)	44-260 Mpa
Θερμότητα διάχυσης (kj/mol)	8,48
Θερμική διαστολή	24,8 $\frac{\mu m}{m \cdot K}$
Θερμική αγωγιμότητα	156 $\frac{W}{m \cdot K}$
Ηλεκτρική αντιστατική	43,9 $N\Omega \cdot m$ (στους 293 K)
Μέτρο ελαστικότητας	45 Gra
Λόγος poisson	0,33

Το μαγνήσιο σχηματίζει κράμα με το αλουμίνιο με ευρεία χρήση. Το αλουμίνιο βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες οδηγώντας σε πιο όλκιμη συμπεριφορά.

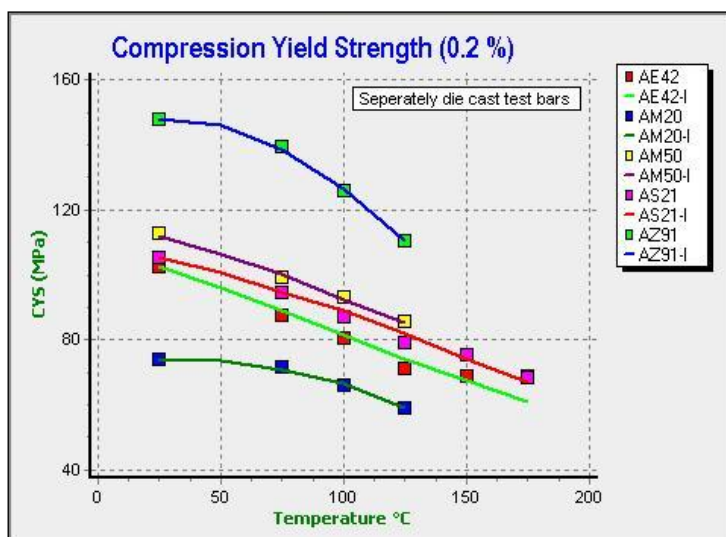
Είναι εξαιρετικά ελαφρύ με μεγάλη τάση αντοχής. Θεωρείται από τα πιο σημαντικά κραματικά μέταλλα.

Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει τις φάσεις κράματος Μαγνησίου, Αλουμινίου, τις θερμοκρασίες και θεωρείται ότι οι μεταβολές θερμοκρασίας δεν είναι πολύ γρήγορες ώστε να θεωρείται διάγραμμα ισορροπίας, καθώς μέσα από μια πολύ γρήγορη μεταβολή εμφανίζονται φαινόμενα που εμποδίζουν την διάχυση και εγκλωβίζουν στην κρυσταλλική δομή του μαγνησίου, άτομα αλουμινίου σε υψηλή συγκέντρωση αλλάζοντας πλήρως τις ιδιότητες του κράματος (αντοχή, ολκιμότητα, σκληρότητα).

Στο παρακάτω διάγραμμα δίνεται ο λόγος poisson για διαφορές θερμοκρασίες για καθαρό μαγνήσιο και κράμα μαγνησίου AZ91, όπου για καθαρό μαγνήσιο είναι στους 25 βαθμούς κελσίου περίπου 0,28 ενώ στους 120 βαθμούς κελσίου 0,33 περίπου. Στο κράμα AZ91 κυμαίνεται σε στενά όρια από 0,29 σε θερμοκρασίες δωματίου μέχρι 0,31 στους 120 βαθμούς κελσίου.

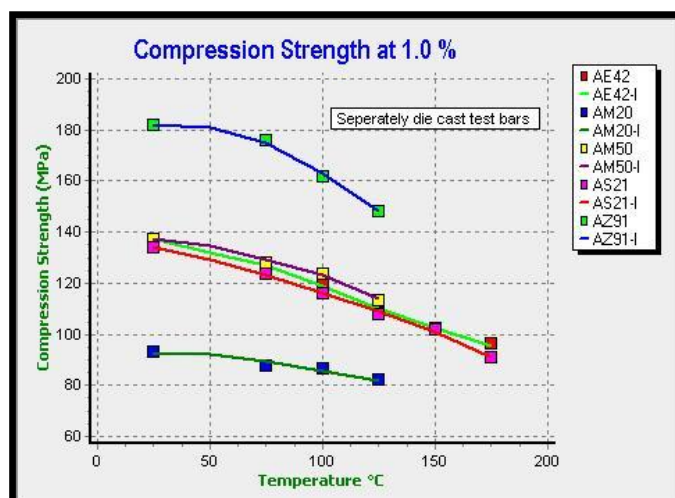


ΓΡΑΦΗΜΑ 7-1 : ΛΟΓΟΣ POISSON ΜΑΓΝΗΣΙΟΥ ΚΑΙ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΑΠΟ ΧΥΤΕΥΣΗ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ



ΓΡΑΦΗΜΑ 7-2 : ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΑΓΝΗΣΙΟΥ (ΓΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ 0,2%) ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

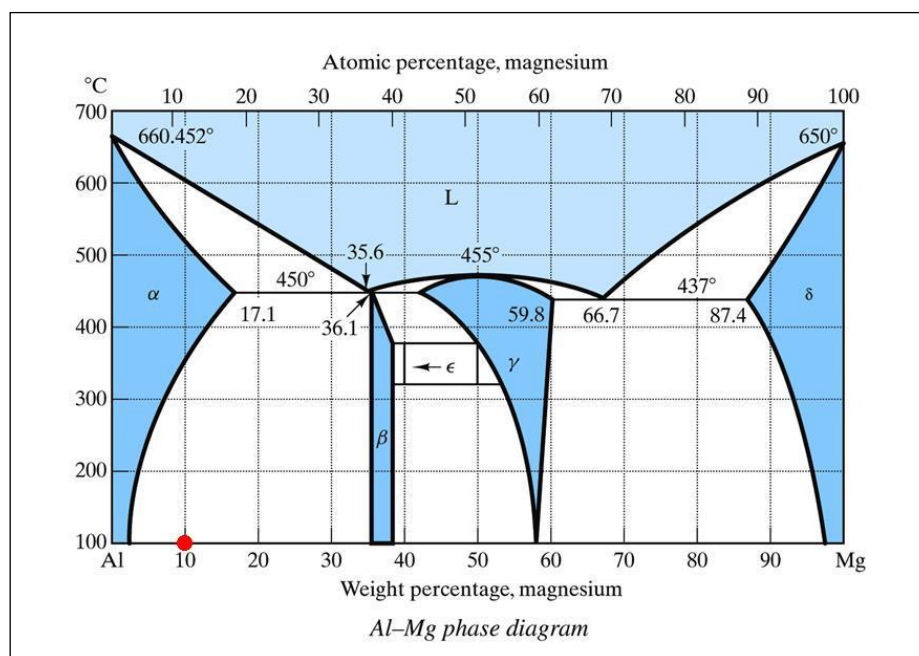
Για διάφορες θερμοκρασίες και διάφορα κράματα υπάρχουν τα διαγράμματα τάσης διαρροής για παραμόρφωση 0,2%. Παρατηρούμε ότι βαίνει μειούμενη. Το ίδιο στο παρακάτω σχήμα αλλά για παραμόρφωση 1%.



ΓΡΑΦΗΜΑ 7-3: ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΓΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ 1% ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Οι παραπάνω αντοχές έχουν ληφθεί από μπάρες που έχουν παραχθεί σε μήτρες μηχανής κρύου θαλάμου 40 τόνων.

Εννοείται ότι η τάση διαρροής συσχετίζεται με την ιστορία φόρτισης του κράματος, με τη μέθοδο κατασκευής του και την επεξεργασία του, μηχανική και θερμική.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-1: Σχεδιάγραμμα φάσεων ισορροπίας Μαγνησίου – Αλουμίνιου

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει τις φάσεις ανάλογα με την σύσταση και την θερμοκρασία. Μπορούμε να διακρίνουμε τις περιοχές, όπου βασικό στοιχείο είναι το Αλουμίνιο και τις περιοχές όπου βασικό στοιχείο είναι το Μαγνήσιο. Για καθαρό Αλουμίνιο 100% βλέπουμε ότι το σημείο τήξης είναι 660,5°C ενώ για καθαρό Μαγνήσιο το σημείο τήξης είναι 650°C.

Ένα συμπέρασμα που προκύπτει από την παρατήρηση του διαγράμματος είναι ότι, παρόλο που το σημείο τήξης των μετάλλων διαφέρει κατά 10 Κέλβιν, μια προσθήκη μαγνησίου ώστε το κράμα να έχει σύσταση 36,1 % κ.β. σε μαγνήσιο και 63,9% κ.β. αλουμίνιο, οδηγεί σε πτώση της θερμοκρασίας υγροποίησης κατά 210°C στους 450°C. Επίσης, αν προσθέσουμε αλουμίνιο σε καθαρό μαγνήσιο ώστε το κράμα μας να έχει 66,7 % κβ μαγνήσιο και 33,3 % αλουμίνιο η θερμοκρασία υγροποίησης (στερεοποίησης) πέφτει κατά 213°C στους 437°C.


Οι βασικές φάσεις που διακρίνουμε είναι η α , β , γ , δ, όπου δ είναι η φάση στην οποία η κρυσταλλική δομή του κράματος είναι αυτή του μαγνησίου και μέσα σε αυτή διαλυμένο το αλουμίνιο, ενώ στην φάση α η κρυσταλλική δομή του κράματος είναι αυτή του αλουμινίου με διαλυμένο στοιχείο το μαγνήσιο.

Η περιοχή που μας ενδιαφέρει κατά την παράγωγη κράματος μαγνησίου με κραματικό στοιχείο το μαγνήσιο, μπορούμε να πούμε ότι είναι από 0% αλουμίνιο μέχρι 30 % αλουμίνιο, οπότε σε συνθήκες περιβάλλοντος το κράμα μας αποτελείται από δυο βάσεις δ-γ.

Αντίστοιχα για βασικό στοιχείο το αλουμίνιο και κραματικό στοιχείο το μαγνήσιο σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, οι φάσεις στις οποίες συνιστάται το κράμα είναι α-β.

8. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΑΛΚΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΟΥ

Ο πίνακας 8.1 [Wikipedia] δίνει συνοπτικά τις ιδιότητες του χαλκού [32], διαπιστώνουμε ότι είναι σημαντικά βαρύτερος από το Αλουμίνιο και το Μαγνήσιο, ενώ έχει σημαντικά υψηλότερο σημείο τήξης. Το μέτρο του young είναι επίσης σημαντικά υψηλότερο.

Βασικές ιδιότητες χαλκού		
πυκνότητα	8,96	$\frac{gr}{cm^3}$
Μέτρο ελαστικότητας	110-128	GPa
Μέτρο διάτμησης	48	GPa
Θερμική διαστολή	16,5	$\frac{\mu m}{m * K}$
Θερμική συναγωγιμότητα	401	$\frac{W}{m * K}$
Λόγος poisson	0,34	-
Mohs Hardnes	3	-
Σκληρότητα κατά Vickers	343-369	Mpa
Σκληρότητα κατά brinell	235-878	Mpa
Κρυσταλλική δομή	Εδροκεντρομένη κυβική	
Σημείο τήξης	1084,62	$^{\circ} C$
Σημείο βρασμού	2562	$^{\circ} C$
Ατομικό βάρος	63,546	
Μαγνητική τάση	διαμαγνητικό	
Ηλεκτρική αντίσταση	16,78	nΩ*m στους 20 C
Ταχύτητα του ήχου	3810	$\frac{m}{s}$

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.1. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΑΛΚΟΥ

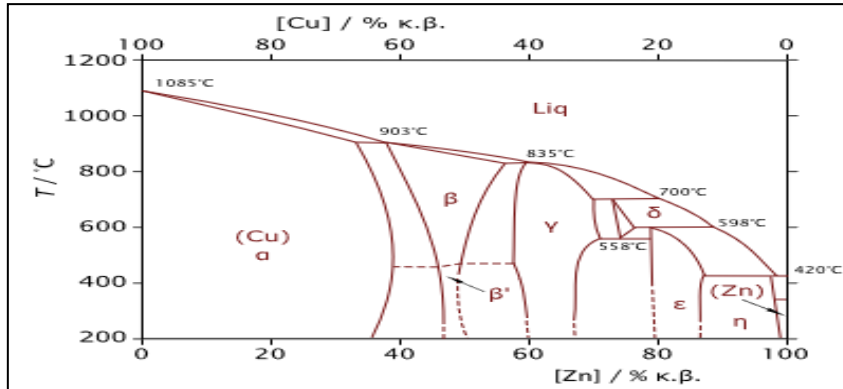
Έχει την δεύτερη μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα μετά το ασήμι και έχει την τιμή 59,6 S/m ενώ είναι πολύ καλός αγωγός της θερμότητας.

Μειονέκτημα του είναι ότι δεν ενδείκνυται για κατασκευή χυτών αντικειμένων στην μασίφ δομή τους γιατί απορρόφα οξυγόνο κατά την τήξη του, το οποίο αποβάλλει μετά.

Επίσης έχει αντιμικροβιακές ιδιότητες καταστρέφοντας το 99,9% των βακτηρίων χωρίς να φθείρεται ο ίδιος, ενώ είναι απόλυτα ασφαλής στην χρήση του, ιδιότητα που τον καθιστά ιδανικό για φίλτρα, σωληνώσεις κτλ[52].

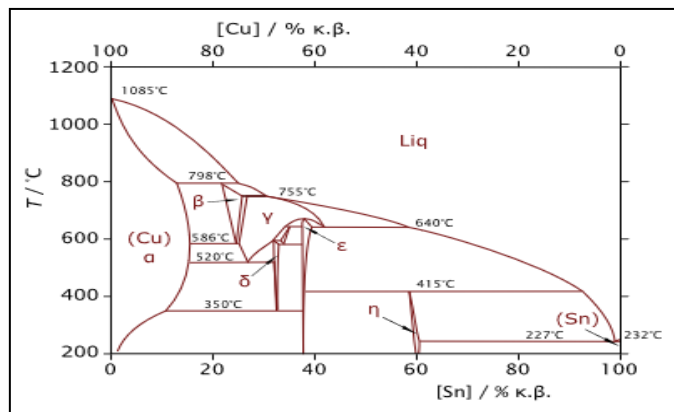
Τα βασικότερα κράματα του χαλκού συνοδευόμενα από τα αντίστοιχα διαγράμματα φάσης είναι τα εξής:

1. Ορείχαλκος: κράμα χαλκού(Cu) – Ψευδαργύρου(Zn)



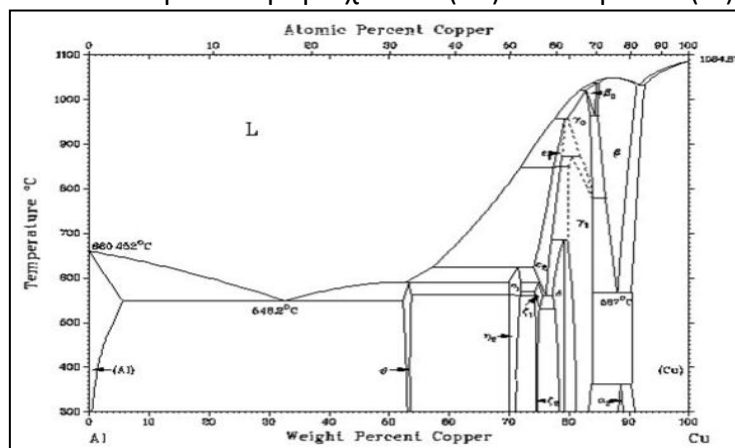
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΑΣΕΩΝ ΙΣΟΡΟΠΙΑΣ ΧΑΛΚΟΥ -ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ

2. Μπρούτζος : κράμα χαλκού (Cu)–κασσιτέρου (Sn)



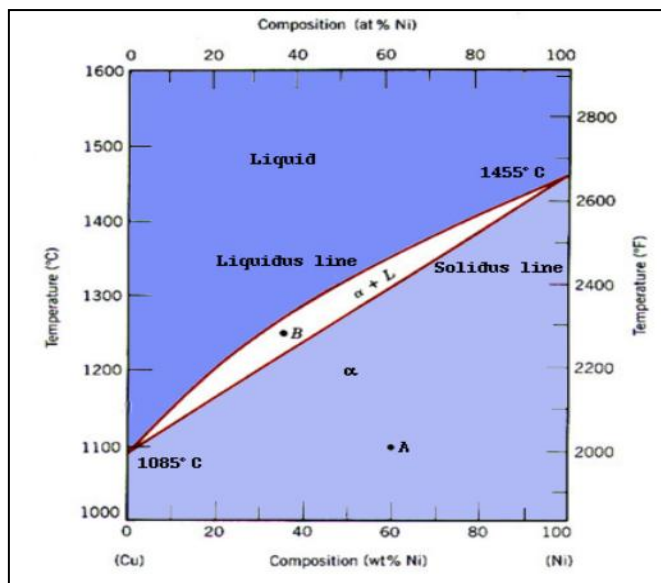
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8.2: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΑΣΕΩΝ ΙΣΟΡΟΠΙΑΣ ΧΑΛΚΟΥ-ΚΑΣΣΙΤΕΡΟΥ

3. Χαλκοαλουμίνιο : κράμα χαλκού (Cu) – αλουμινίου (Al)



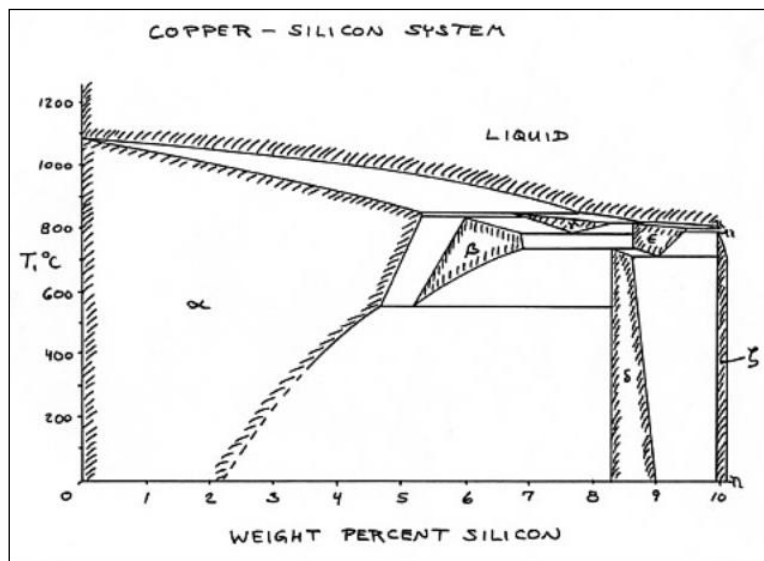
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8.3: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΑΣΕΩΝ ΙΣΟΡΟΠΙΑΣ ΧΑΛΚΟΥ- ΑΙΟΥΜΙΝΙΟΥ

4. Χαλκονικέλιο : κράμα χαλκού (Cu) -νικελίου (Ni)



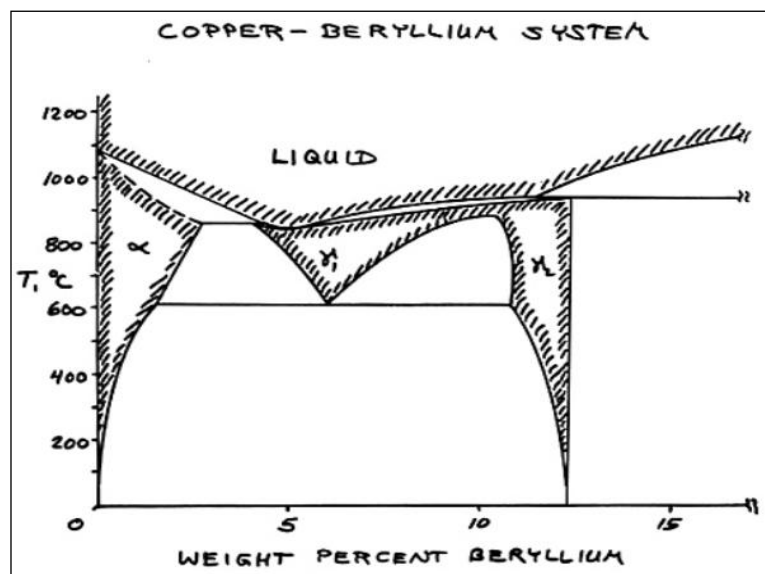
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8.4: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΑΣΕΩΝ ΙΣΟΡΟΠΙΑΣ ΧΑΛΚΟΥ-ΝΙΚΕΛΙΟΥ

5. Χαλκοπυρίτιο: κράμα χαλκού (Cu) - πυριτίου (Si)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8.5: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΑΣΕΩΝ ΙΣΟΡΟΠΙΑΣ ΧΑΛΚΟΥ-ΠΥΡΙΤΙΟΥ

6. Χαλκοβυρίλιο : κράμα χαλκού (Cu) - βυριλίου (Be)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8.6: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΑΣΕΩΝ ΙΣΟΡΟΠΙΑΣ ΧΑΛΚΟΥ-ΒΥΡΙΛΙΟΥ

Κάθε κραματικό στοιχείο αποδίδει κάποιες χαρακτηριστικές ιδιότητες στο κράμα χαλκού.

Ο ψευδάργυρος με ποσοστό μέχρι 30% προκαλεί αύξηση της μηχανικής αντοχής του κράματος αλλά δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλο (45%) γιατί δημιουργούνται εύθραυστες φάσεις που ψαθοποιούν το υλικό.

Υπάρχουν δυο είδη ορείχαλκου:

- Ο α ορείχαλκοι ή μονοφασικοί ορείχαλκοι ($Zn < 39\%$)
- Οι α+β ορείχαλκοι ή διφασικοί ορείχαλκοι ($Zn > 39\%$)

Σημαντικότερες αιτίες αστοχίας των εξαρτημάτων από ορείχαλκο είναι η αποψευδαργύρωση, όπου όταν ο ορείχαλκος εκτεθεί στο νερό διαλύεται δημιουργώντας κρατήρες στην επιφάνεια του κράματος. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με προσθήκη ποσοτήτων κασσιτέρου περίπου 1% ή αρσενικού 0,01 – 0,2 % μέσα στο κράμα.

Επίσης ο ορείχαλκος με ποσοστό ψευδαργύρου πάνω από 10% εμφανίζει εποχική ρηγμάτωση που αντιμετωπίζεται με ανόπτυση στους 250- 300 βαθμούς κελσίου ύστερα από ψυχρή διαμόρφωση.

Η προσθήκη μολύβδου σε ποσοστά 3% βελτιώνει την κατεργασιμότητά του στην κοπή.

Η προσθήκη του κασσιτέρου στον χαλκό συνήθως κυμαίνεται από 7-13 % δημιουργώντας μονοφασικό κράμα κυβικού εδροκεντρομένου πλέγματος εφόσον δεν ξεπερνά το 14 % . Παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση, φθορά και τριβή σε σχέση με τον κασσίτερο αλλά με σημαντικά μεγαλύτερο κόστος.

Η προσθήκη φωσφόρου συνεισφέρει στην απόξεση του κράματος, αυξάνει την αντοχή σε διάβρωση, την μηχανική αντοχή και την αντοχή σε τριβή (ποσοστό φώσφορου 0,1-1%)

Ο μόλυβδος στον μπρούντζο βελτιώνει την κατεργασιμότητα σε κοπή

Τα κράματα χαλκού - αλουμίνιου έχουν μεγάλη αντοχή σε διάβρωση σε βιομηχανικό περιβάλλον λόγω δημιουργίας στρώματος Al_2O_3 . Είναι μονοφασικά κράματα α φάσης, όταν το αλουμίνιο δεν υπερβαίνει το ποσοστό 9% και χρησιμοποιούνται με κατεργασία εν ψυχρώ για σωλήνες εναλλακτών θερμότητας καθώς και στην κοσμηματοποιία ενώ είναι διφασικά α+γ2, όταν το ποσοστό είναι 9-16% και χρησιμοποιούνται με εν θερμώ κατεργασία ή χύτευση σε καλούπι ή στην άμμο στην χημική βιομηχανία, όπου απαιτείται μεγάλη αντοχή σε διαβρωτική ατμόσφαιρα με υψηλές θερμοκρασίες.

Κάθε αναλογία νικελίου στον χαλκό δημιουργεί μονοφασικό κράμα α φάσης και κρυσταλλώνεται σε κυβικό εδροκεντρομένο πλέγμα. Παρουσιάζει μεγάλη ολκιμότητα και μπορεί εύκολα να διαμορφωθεί σε κατεργασία εν ψυχρώ, έχει εξαιρετη αντοχή στην διάβρωση ακόμα και σε θαλάσσιο περιβάλλον.

9. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΑΦΡΩΝ

Κατά τις δοκιμές ομοαξονικής συμπίεσης, επιδρούν τρεις μηχανισμοί παραμόρφωσης του αφρού, εφόσον πρόκειται για αφρούς κλειστών κελιών

A) κάμψη εδρών του αφρού γύρω από την ακμή επαφής τους

B) Συμπίεση εσωκλειόμενου αερίου

Γ) έκταση τοιχωμάτων του αφρού

9.1 ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

9.1.1. ΑΦΡΟΙ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΚΕΛΙΟΥ ΓΙΑ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

Για κάθε υλικό το μέτρο ελαστικότητας λαμβάνεται αδιάστατο ως προς αυτό του υλικού του αφρού

$$\frac{[E^*]}{Es} = \alpha_2 * \left(\frac{[\rho^*]}{\rho_s} \right)^2$$

Παρομοίως και για το μετρό διάτμησης :

$$[G^*] \frac{1}{Es} = \left(\frac{3}{8} \right) * \alpha_2 * \left(\frac{[\rho^*]}{\rho_s} \right)^2$$

Και για το ν λόγο poisson, η μέση τιμή έπειτα από πειράματα λαμβάνεται ίση με :

$\nu^* = 0,3$,

όπου το α_2 κυμαίνεται μεταξύ 0,1 έως 4.

9.1.2. ΑΦΡΟΙ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΚΕΛΙΟΥ ΓΙΑ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

$$\frac{[E^*]}{Es} = (\varphi^2) * \left(\frac{[\rho^*]}{\rho_s} \right)^2 + (1 - \varphi) * \left(\frac{[\rho^*]}{\rho_s} \right) + \frac{\rho_0(1 - 2 * [\nu^*])}{\left[Es * \left(1 - \frac{[\rho^*]}{\rho_s} \right) \right]}$$

$$\frac{[G^*]}{Es} = \left(\frac{3}{8} \right) * \left\{ (\varphi^2) * \left[\left(\frac{[\rho^*]}{\rho_s} \right)^2 \right] + (1 - \varphi) * \left(\frac{[\rho^*]}{\rho_s} \right) \right\}$$

$\nu^* = 0,333$

Να σημειώσουμε ότι για να μπορέσουμε να έχουμε ανεξαρτησία του μέτρου του young και των άλλων παραμέτρων από το μέγεθος του δοκιμίου, κατά μια μέτρηση πρέπει να είναι το μέγεθος 6 φορές, κάθε διάσταση το μέγεθος του κελιού, (αυτό ισχύει και για το μετρό ελαστικότητας και για την μέτρηση της ανηγμένης τάσης).

Μια άλλη προσέγγιση του μέτρου ελαστικότητας του young του αφρού ως προς το μέτρο ελαστικότητας του μητρικού υλικού είναι :

$$\frac{[E^*]}{E} = C1 * (\varphi^2) * \left[\left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{n1} \right] + C1^{n2} * (1 - \varphi) * \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)$$

Και της τάσης διαρροής του αφρού που για μέταλλα αντικαθίσταται από την τάση plateau "

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}} = C2 * \left[\left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{n2} \right] + (C2^{n2})(1 - \varphi) * \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)$$

Οι σταθερές C1 , C2 , n1 , n2 εξαρτώνται από την δομή του υλικού και είναι αντικείμενο προς διερεύνηση και πειραματική μελέτη.

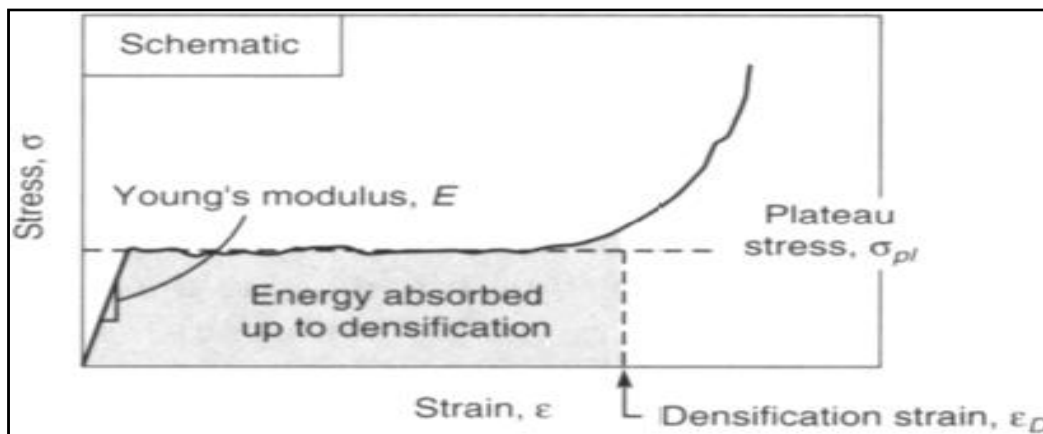
Πειραματικά δεδομένα έπειτα από μοντελοποίηση προτείνουν n1=2 , n2=1,5.

Η C1 κυμαίνεται από 0,1-4 και η C2 από 0,1-1

9.2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

Θεωρώντας ότι η τάση διαρροής είναι κοντά στην γραμμική ελαστική περιοχή μπορούμε να πάρουμε την θεώρηση της τάσης σ_{pl} * που συμβαίνει για πλαστική κατάρρευση και συμπίκνωση του αφρού, ενώ η τάση διαρροής είναι η σ_{ys} του μασιφ υλικού.

Η τάση pl(plateau) είναι η σταθερή τάση (σχεδόν) που κρατιέται κατά την παραμόρφωση στην θλιπτική μονόαξονική καταπόνηση μέχρι μια συγκεκριμένη παραμόρφωση, μετά από την οποία αυξάνεται απότομα.



ΕΙΚΟΝΑ. 9.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΑΦΡΟΥ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΥ

Η σχέση τάσης pl ανοιγμένη στην τάση διαρροής του συμπαγούς υλικού είναι :

$$\left([\sigma_{pl}^*] * \frac{1}{\sigma_{ys}} \right) = (0,25 \text{ έως } 0,35) * \left((\rho^*) * \frac{1}{\rho_s} \right)^m \quad (\text{για ανοικτά κελιά})$$

Με το m να κείται μεταξύ 1,5

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{ys}} \right) = 0,23 * \left[\left(\frac{[\rho^*]}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} \right] * \left[1 + \left(\frac{[\rho^*]}{\rho_s} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

(Για ανοικτό κελιά με διόρθωση πυκνότητας)

$$\left(\frac{[\sigma_{pl}^*]}{\sigma_{ys}}\right) = \left[0,3 * \left(\varphi * [\rho^*] * \frac{1}{\rho_s}\right)^{\frac{3}{2}}\right] + \left[(1 - \varphi) * \left([\rho^*] * \frac{1}{\rho_s}\right)\right] + \left[\frac{P_0 - Pat}{\sigma_{ys}}\right]$$

(για κλειστά κελιά συμπεριλαμβάνοντας την συμβολή στην έκταση μεμβράνης και πίεσης αερίου).

Πλαστική συμπίκνωση συμβαίνει όταν αρχίζουν να πέφτουν οι ακμές και οι έδρες, η μια πάνω στην άλλη.

Όσο προχωρεί η παραμόρφωση ολοένα και μεγαλύτερος αριθμός κελιών έχει καταρρεύσει και όταν έχει καταρρεύσει ένας σημαντικός αριθμός, αρχίζει η τάση να ανεβαίνει απότομα.

$$\text{Το σημείο αυτό συμβαίνει για } \varepsilon = \varepsilon_D = 1 - \alpha_1 * \left(\frac{[\rho^*]}{\rho_s}\right)$$

Με μια γενική θεώρηση του $\alpha_1 = 1,5$

Έχοντας τώρα το ε_D , θεωρώντας ότι οι μεταλλικοί αφροί ανήκουν στην κατηγορία των πλαστικών άφρων εξετάζουμε τον σχηματισμό της καμπύλης παραμόρφωσης ως προς την παραμόρφωση.

$$\text{Θέτουμε } D = \frac{\varepsilon_D}{\varepsilon_D - \varepsilon}$$

Πριν από την τάση συμπίκνωσης, θεωρούμε ότι ο αφρός βρίσκεται στην τάση plateau, σύμφωνα με τον τύπο :

$$\sigma * \frac{1}{\sigma_{pl}} = 1 \text{ για } \varepsilon < \varepsilon_D * \left(1 - \frac{1}{D}\right)$$

Για μεγαλύτερες τάσεις παραμόρφωσης, θεωρώ ότι η τάση είναι:

$$\sigma * \frac{1}{\sigma_{pl}} = \left(\frac{1}{D}\right) * \left[\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_D - \varepsilon}\right)\right]^m \quad \varepsilon > \varepsilon_D * \left(1 - \frac{1}{D}\right)$$

Πριν έχουμε εξετάσει και έχει βρεθεί πειραματικά με τους ανάλογους ημιεμπειρικούς τύπους ότι το η τάση plateau εξαρτάται από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο αφρός και την σχετική πυκνότητα του, ενώ η παραμόρφωση πυκνοποίησης εξαρτάται από την σχετική πυκνότητα ρ^*/ρ_s .

Οι ανωτέρω σχέσεις ισχύουν για τις περιπτώσεις που η σχετική πυκνότητα του αφρού είναι:

$$\rho * \frac{1}{\rho_s} < 0,3$$

Για μεγαλύτερες σχετικές πυκνότητες ισχύουν άλλες σχέσεις, όπου η τάση plateau ή μικραίνει ή εξαφανίζεται. Η παραμόρφωση λοιπόν που συμβαίνει η πυκνοποίηση

για σχετικές πυκνότητες $< 0,3$ και για πλαστικούς αφρούς, όπως είναι αυτοί του αλουμινίου για παράδειγμα, είναι

$$\epsilon c = 1 - 2 * [\rho * \frac{1}{\rho s}]$$

Η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης, όπου εμφανίζονται τα ζεύγη τάσης παραμόρφωσης, εμφανίζεται στους πλαστικούς μεταλλικούς αφρούς σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα, στο οποίο βλέπουμε ότι μέχρι σχετική πυκνότητα 0,5, έχουμε σχεδόν ίδια τάση για την έναρξη πυκνοποίησης και για πιο μεγάλες σχετικές πυκνότητες αρχίζει να πέφτει απότομα.

Στο σύνορο λοιπόν της πλαστικής κατάρρευσης και πυκνοποίησης μπορούμε να πάρουμε την σχέση της τάσης :

$$\frac{[\sigma *]}{E_s} = \left(\frac{0,106}{D}\right) * \left(\frac{\sigma_{ys}}{E_s}\right) * [(1 - \epsilon c)^{0,5}] * (1 + 2,33 * \epsilon c)$$

Μετά από αυτή την ανάλυση είναι χρήσιμο να δούμε ποια είναι η αντιστοίχιση τάσης της μονοαξονικής καταπόνησης στους αφρούς.

Παίρνουμε το κριτήριο von Misses στην περίπτωση των κλασικών μετάλλων για να βρούμε την ισοδύναμη τάση που ασκείται στο δοκίμιο σαν συνάρτηση των 3 ορθών τάσεων ορισμένων στο καρτεσιανό σύστημα:

$$(\sigma_e)^2 < 0,5 * [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

$$\Rightarrow \sigma_e = \{0,5 * [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]\}^{0,5}$$

Αντίθετα με την μονοαξονική καταπόνηση που η έκφραση της είναι ίδια (για την ελαστική περιοχή οι εκφράσεις είναι ίδιες) και για τους αφρούς και για συμπαγή υλικά, στην πλαστική περιοχή η ισοδύναμη τάση είναι διαφορετική στην πολυαξονική καταπόνηση (γενική περίπτωση που ανάγεται σε αυτήν της μονοαξονικής αν επικρατούν τέτοιες συνθήκες φόρτισης) και η έκφραση της είναι :

$$\sigma_f = \left\{ \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2} \right] * [\sigma_e^2 + (\alpha^2) * \sigma_m^2] \right\}^{0,5}, \text{ όπου σε προκύπτει από την έκφραση του στερεού και}$$

$$\sigma_m = \left(\frac{1}{3}\right) * (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \text{ όπου λέγεται και υδροστατική τάση.}$$

Το α ονομάζεται σταθερά διαρροής ή συντελεστής ευαισθησίας πίεσης, κυμαίνεται από 1,35 μέχρι 2,08 και έχει εξάρτηση από τον πλαστικό λόγο poisson.

Η εξάρτηση αυτή φαίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$\alpha = \left[\frac{\frac{1}{2} - \nu p}{1 + \nu p} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Ο πλαστικός λόγος poisson υπολογίζεται καλύτερα από μονοαξονική δόκιμη θλίψης. Εάν $\alpha=0$ δηλαδή $\nu=0,5$ τότε έχουμε την συμπεριφορά των πλήρως πυκνών στερεών. Οπότε η σταθερά διαρροής α υπολογίζεται μέσω του πλαστικού λόγου poisson του αφρού, όπου είναι μικρότερος από 0,5 αρά $\alpha>0$ (μαθηματικά) και υπολογίζεται πειραματικά.

Το όριο για να μην υπάρχει διαρροή είναι φυσικά η τάση διαρροής του υλικού. Έτσι στην γενική περίπτωση της τριαξονικής καταπόνησης λαμβάνω μια τρισδιάστατη κλειστή καμπύλη που δείχνει ότι πάνω σε αυτήν και για αυτές τις τάσεις που καταδεικνύει κάθε σημείο της καμπύλης, αρχίζει να υπάρχει διαρροή υλικού.

9.3. ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΑΦΡΩΝ

Η σκληρότητα ενός αφρού είναι περίπου $H=\sigma_{pl}^*$, ενώ για το στερεό υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο αφρός είναι $H=3\sigma_{ys}$
[Gibson asby cellular solids structures properties]

9.4. ΜΕΤΡΟ ΤΟΥ YOUNG ΚΑΙ ΤΑΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΣΤΟΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

Το μέτρο του young στην ελαστική γραμμική περιοχή υπολογίζεται όπως στις σχέσεις ακριβώς της ελαστικής γραμμικής περιοχής στην θλιπτική ομοαξονική καταπόνηση, ενώ το μέτρο του young στην μη γραμμική ελαστική περιοχή είναι :

$$EA^*] * \frac{1}{Es} = [\rho^*] \frac{1}{\rho s}$$

Η τάση διαρροής του αφρού για ομοαξονικό εφελκυσμό υπολογίζεται ως :

$$\frac{\sigma A}{\sigma Y s} = [\rho^*] * \frac{1}{\rho s}$$

9.5. ΚΟΠΩΣΗ

(κάποιες ημιεμπειρικές σχέσεις για τον αριθμό κύκλων για αστοχία)

Έχοντας ένα εύρος παραμόρφωσης (ας πούμε $\Delta \epsilon_{pl}$ το εύρος πλαστικής παραμόρφωσης) και $\Delta \epsilon_f$ η παραμόρφωση αστοχίας σε μισό κύκλο, τότε οι κύκλοι που αστοχεί ο αφρός μας δίνεται από την σχέση (προσεγγιστικά άλλωστε η αστοχία σε συγκεκριμένο αριθμό κύκλων είναι μέγεθος στοχαστικό) κατά Basquin:

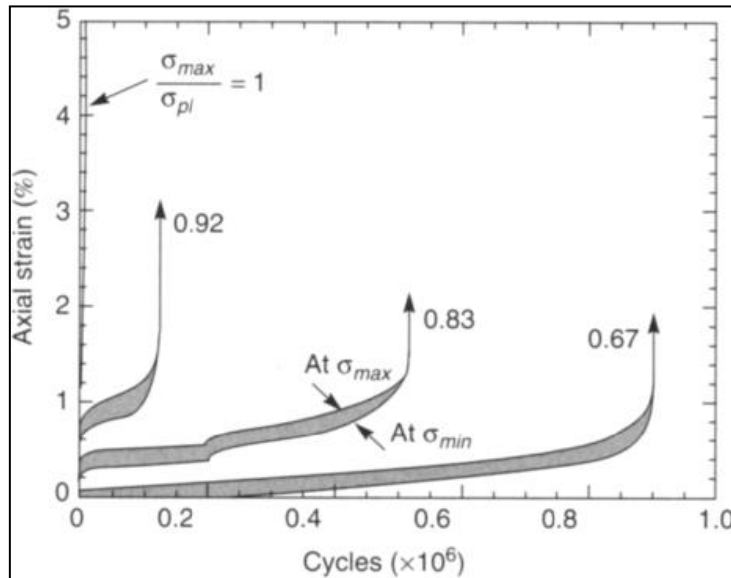
$$Nf = \left(\frac{\Delta \epsilon}{\Delta \epsilon_f} \right)^{-u}$$

Εφ' όσον έχουμε στον αφρό μια μικρορωγή με την αύξηση των κύκλων καταπόνησης αυξάνεται και η ρωγή. Η ρωγή αυτή επάγεται από μια ένταση καταπόνησης ΔK_I προκαλώντας την αύξηση της.

Σύμφωνα με τον νομό Paris έχω :

$$\frac{da}{dN} = C * \Delta K_i^m = C' * (\Delta K_i)^u$$

$$\text{όπου } C' = I * \left\{ \left[\frac{C}{\Delta \epsilon_f * E_s * \text{sq}r(\pi * l)} \right] * \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right)^3 \right\}^u$$



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΟΠΟΣΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΥΚΛΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

9.5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΟΥ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΤΑΣΗ PLATEAU

Όλη η παραπάνω μοντελοποίηση έγινε με την θεώρηση ότι οι παραμορφώσεις και οι τάσεις λαμβάνουν χώρα σε σταθερή θερμοκρασία (ή η θερμοκρασία στα εύρη που μελετάμε δεν έχει επίδραση) καθώς και σε κάποια σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης (η ταχύτητα παραμόρφωσης δεν έχει επίδραση).

Στην πραγματικότητα όμως η τάση plateau, το μέτρο του young εξαρτώνται ισχυρά από την θερμοκρασία και την ταχύτητα παραμόρφωσης.

Για πλαστική διαρροή υπάρχει εξάρτηση της τάσης με την ταχύτητα παραμόρφωσης σύμφωνα με την σχέση :

$$\sigma * pl = (\sigma pl)^0 * \left[1 - A * \left(\frac{T}{Tm} \right) * \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}0}{\dot{\epsilon}} \right) \right]$$

Όπου $\sigma * pl$ = τάση διαρροής του αφρού για την εν λόγω θερμοκρασία T και ταχύτητα παραμόρφωσης $\dot{\epsilon}$.

$$\sigma * pl^0 = \text{τάση διαρροής στους } 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{\epsilon}0 = \text{σταθερά}$$

Η τάση plateau έχει ισχυρή εξάρτηση από την σχετική πυκνότητα αλλά ταυτόχρονα η εξάρτηση αυτή είναι της ίδιας ακριβώς μορφής ως προς την πυκνότητα (κλίση ως προς πυκνότητα σταθερή) σε κάθε θερμοκρασία και για κάθε ταχύτητα παραμόρφωσης και αυτό εκφράζεται από την σχέση :

$$\sigma * pl = C * \sigma_{ys} * \left([\rho *] \frac{1}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Εξάγεται, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι η τάση plateau έχει εξάρτηση από την θερμοκρασία, την ταχύτητα παραμόρφωσης και την σχετική πυκνότητα .

Για μια σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης και με παράμετρο διάφορες θερμοκρασίες λαμβάνω ισάριθμες καμπύλες τάσης plateau παραμόρφωσης που είναι παράλληλες μεταξύ τους. Άρα η εξάρτηση της τάσης ως προς την πυκνότητα παραμένει αμετάβλητη σε σχέση με την θερμοκρασία.

Το ίδιο συμβαίνει με την εξάρτηση της τάσης ως προς την σχετική πυκνότητα με την μεταβολή της ταχύτητας (ρυθμού) παραμόρφωσης.

Η τάση plateau είναι φθίνουσα συνάρτηση της θερμοκρασίας τείνουσα ασυμπτωτικά σε μηδενική τάση για μεγάλες θερμοκρασίες (λογικό άλλωστε, καθώς η κινητική ενεργεία είναι τόσο μεγάλη σε μεγάλες θερμοκρασίες που οι μεταλλικοί δεσμοί είναι τόσο ανίσχυροι ώστε να μια απειροελάχιστη τάση να οδηγεί στην ροή του υλικού).

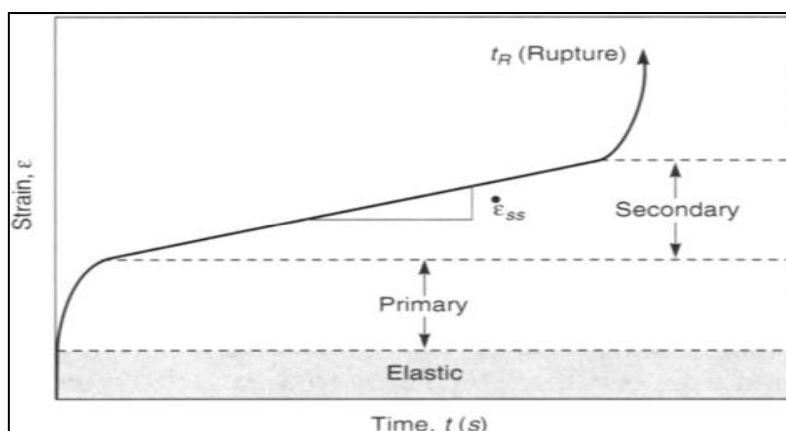
Επίσης η τάση plateau αυξάνει με αύξηση της ταχύτητας παραμόρφωσης .

Υπάρχουν εφαρμογές, στις οποίες οι τάσεις εφαρμόζονται για μεγάλα χρονικά διαστήματα, το οποίο οδηγεί σε μεγάλη παραμόρφωση για σταθερή τάση.

Ένα μοντέλο που υπολογίζει την ταχύτητα παραμόρφωσης για κλειστού κελιού αφρό υπό μια σταθερή τάση σ είναι:

$$\left[\varepsilon * \frac{1}{\varepsilon_{0s}} \right] = \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0s}} \right) / \left\{ \left[\frac{1}{C_{10}} \right] * \left[\left[\frac{ns + 2}{C_9} \right] \wedge \left[\frac{1}{ns} \right] \right] * \left[\varphi * \left[\frac{[\rho *]}{\rho_s} \right] \right]^{\left[\frac{3 * ns}{2 * ns} \right]} + [1 - \varphi] * \left[\frac{[\rho *]}{\rho_s} \right] \right\}$$

όπου ns , ε_{0s} , σ_{0s} , C_{10} , C_9 σταθερές



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ-ΧΡΟΝΟΥ ΜΕ ΜΙΑ ΤΙΜΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

Σύμφωνα με αυτήν την σχέση, η ταχύτητα παραμόρφωσης αυξάνει με την σταθερά επιβαλλόμενη τάση αναλόγως .

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τις συγκεντρωμένες μηχανικές ιδιότητες των αφρών :

Μηχανικές ιδιότητες αφρών	Αφροί ανοικτών κελιών	Αφροί κλειστών κελιών
Μέτρο ελαστικότητας E	$E = (0,1 - 4) * E_s * \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)$	$E = (0,1 \text{ έως } 1) * E_s * \left[0,5 * \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2 + 0,3 * \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)\right]$
Μέτρο διάτμησης G	$G = \left(\frac{3}{8}\right) * E$	$G = \left(\frac{3}{8}\right) * E$
Μέτρο του young Ef		
Λόγος του poisson ν	0,32 έως 0,34	0,32 έως 0,34
Αντοχή συμπίεσης σc	$(0,1 \text{ έως } 1) * \sigma_{c,s} * \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{\frac{3}{2}}$	$(0,1 \text{ έως } 1) * \sigma_{c,s} * \left[0,5 * \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{\frac{2}{3}} + 0,3 * \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)\right]$
Αντοχή εφελκυσμού σf	$(1,1 \text{ έως } 1,4) * \sigma_c$	$(1,1 \text{ έως } 1,4) * \sigma_c$
Παραμόρφωση πυκνοποίησης εD	$\varepsilon_D = (0,9 \text{ έως } 1) * \left[1 - 1,4 * \frac{\rho}{\rho_s} + 0,4 * \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^3\right]$	$\varepsilon_D = (0,9 \text{ έως } 1) * \left[1 - 1,4 * \frac{\rho}{\rho_s} + 0,4 * \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^3\right]$
Συντελεστής απολήων η	$\eta = (0,95 - 1,05) * \frac{\eta_s}{\frac{\rho}{\rho_s}}$	$\eta = (0,95 - 1,05) * \frac{\eta_s}{\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)}$
Σκληρότητα H	$H = \sigma_c * \left(1 + 2 * \frac{\rho}{\rho_s}\right)$	$H = \sigma_c * \left(1 + 2 * \frac{\rho}{\rho_s}\right)$

ΠΙΝΑΚΑΣ 9.1: ΣΥΓΚΕΝΤΡΟΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΑΦΡΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΛΟΙΠΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΩΝ ΤΟΥ ΑΦΡΟΥ

9.6. ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ

Εάν έχουμε μια πλευρά μεγαλύτερης διάστασης από τις άλλες τότε εισάγεται μια ανισοτροπία

Πχ. Αν η πλευρά h βλέπει προς τον άξονα X_3 και οι μικρότερες πλευρές l είναι ιδίων διαστάσεων και βλέπουν στους άξονες X_2, X_1 , η ανισοτροπία ως προς τους άξονες X_3, X_1 είναι $R_{31}=l/h$ και έστω $R_{31}=2$ τότε θα έχω μια εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας καθώς και της τάσης plateau του αφρού σε αυτούς τους άξονες από την ανισοτροπία αυτών σύμφωνα με τις σχέσεις:

9.6.1. ΓΙΑ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΚΕΛΙΑ

$E_3^*/E_1^* = (2R^2) / [1 + (1/R)^3]$ και για την αριθμητική εφαρμογή έχω $E_3^*/E_1^* = 7,111$

$\sigma_{l_3}^*/\sigma_{l_1}^* = 2R / [1 + (1/R)]$.

Αρα έχω $\sigma_{l_3}^*/\sigma_{l_1}^* = 2,666$ για την περιοχή πλαστικής κατάρρευσης.

$$\left[\frac{[G^* 31]}{[G^* 12]} \right] = \frac{2}{1 + R}$$

9.6.2. ΓΙΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΚΕΛΙΑ

$$[E_3^*] \frac{1}{[E_1^*]} = \frac{2 * R^2}{\left[1 + \left(\frac{1}{R} \right)^3 \right]} + (1 - \varphi) * 2 * \frac{R}{\left[1 + \left(\frac{1}{R} \right) \right]}$$

Επειδή η έκταση της μεμβράνης των τοιχωμάτων είναι σημαντική, προσθέτουμε και τον αντίστοιχο δεύτερο όρο.

Όλες οι άλλες ποσότητες που είδαμε πιο πάνω παραμένουν ως έχουν.

9.7. ΠΟΛΥΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

Πολυαξονική καταπόνηση έχω όταν ο αφρός καταπονείται στην γενική περίπτωση από όλες τις κύριες κατευθύνσεις.

Στην περίπτωση της ορθότροπης ανισομετρίας όπου E_1, E_2, E_3 είναι διαφορετικά όπως και τα $\nu_{12}^*, \nu_{13}^*, \nu_{32}^*$, τότε έχω τις ακόλουθες σχέσεις της παραμόρφωσης ανάλογα με τις τάσεις:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \left(\frac{1}{E_1} \right) * (\sigma_1 - [\nu^* 12] * \sigma_2 - [\nu^* 13] * \sigma_3) \\ \varepsilon_2 &= \left(\frac{1}{E_2} \right) * (\sigma_2 - [\nu^* 23] * \sigma_3 - [\nu^* 21] * \sigma_1) \\ \varepsilon_3 &= \left(\frac{1}{E_3} \right) * (\sigma_3 - [\nu^* 31] * \sigma_1 - [\nu^* 32] * \sigma_2) \end{aligned}$$

Στην περιοχή της πλαστικής κατάρρευσης έχω ένα γενικό κριτήριο διαρροής, όπου συμβολίζεται:

$$\sigma d = \{0,5 * [(\sigma 1 - \sigma 2)^2 + (\sigma 2 - \sigma 3)^2 + (\sigma 3 - \sigma 2)^2]\}^{[0,5]}$$

Επίσης η μέση καταπόνηση των κύριων τάσεων είναι :

$$\sigma m = \frac{\sigma 1 + \sigma 2 + \sigma 3}{3}$$

Για μονοαξονική φόρτιση έχω την τάση πλαστικής κατάρρευσης σpl^* :

$$\sigma pl^* = 0,3 * \sigma ys \left([\rho^*] \frac{1}{\rho s} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Για τάσεις $\sigma_1^* = \sigma_2^* = \sigma_3^* = \sigma^*$ δηλαδή $\sigma_d = 0$ και $\sigma_m = \sigma$ προκύπτει:

$\sigma = \sigma ys * \left(\frac{[\rho^*]}{\rho s} \right)$ που είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή της ομοαξονικής καταπόνησης.

Στην γενική περίπτωση της **πολυαξονικής καταπόνησης** προκύπτει:

$$\frac{\sigma d}{\left[0,3 * \sigma ys * \left(\rho * \frac{1}{\rho s} \right)^{\frac{3}{2}} \right]} + \left[\frac{\sigma m}{\sigma ys * \left(\rho * \frac{1}{\rho s} \right)} \right] = 1$$

$$\text{ή } \frac{\sigma d}{[\sigma^* pl]} + 0,09 \left(\rho * \frac{1}{\rho s} \right) * \left(\frac{\sigma m}{\sigma^* pl} \right) = 1$$

Έχοντας υπόψη ότι η εξίσωση αυτή είναι συνάρτηση των $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ και ότι σχηματίζει μια επιφάνεια στον χώρο (ελλειψοειδής) προκύπτει ότι η επιφάνεια διαρροής ορίζεται αν ξέρω δυο από τις ασκούμενες τάσεις.

Υπάρχουν ειδικές περιπτώσεις, στις οποίες εάν ξέρω μια τάση ορίζω την άλλη για να έχω διαρροή. Η πιο απλή περίπτωση είναι η ομοαξονική καταπόνηση κατά την οποία εφόσον έχω το σημείο διαρροής του υλικού η τάση πλαστικής κατάρρευσης είναι ορισμένη.

Εάν έχω υδροστατική καταπόνηση βρίσκω απευθείας, γνωρίζοντας επίσης την τάση διαρροής του υλικού, τις τάσεις για πλαστική κατάρρευση.

Εάν εφαρμόζεται διαξονική καταπόνηση, γνωρίζοντας μια τάση βρίσκω την άλλη για να υπάρξει πλαστική κατάρρευση.

Η επιφάνεια διαρροής στην γενική περίπτωση (τρεις τάσεις) ή οι καμπύλες διαρροής εκτείνονται κατά μήκος της καθαρής υδροστατικής συμπίεσης και εφελκυσμού.

10. ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ – ΑΓΩΓΗ ΣΥΝΑΓΩΓΗ –ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ –ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΣΤΟΛΗ –ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ [1] [2]

Οι μεταλλικοί αφροί έχουν ιδιαίτερα υψηλό σημείο τήξης T_m (melting point) σε σχέση με τα περισσότερα μη μεταλλικά υλικά.

Τα κράματα μετάλλων δεν έχουν ένα συγκεκριμένο σημείο τήξης αλλά ένα εύρος συνάρτησης της σύστασής τους.

Η θερμοκρασία τήξης για κάθε σύσταση βρίσκεται πάνω στα σημεία solidus, όπου κάτω από αυτήν οι ιδιότητες του μετάλλου αλλάζουν δραματικά και λόγω αλλαγής φάσης (υγρή –στέρεα) αλλά και λόγω διάλυσης της ίδιας της δομής του μετάλλου. Επίσης ανάλογα με την ταχύτητα ψύξης έχω διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες (και θερμοδυναμικές κτλ) των μεταλλικών αφρών που σχηματίζονται. Αυτό είναι αποτέλεσμα διαφορετικών μηχανισμών κρυσταλοποίησης, σύνθεσης χημικών ενώσεων, φάσεων μέσα στο κράμα κτλ εκ των οποίων η μοριακή διάχυση παίζει σημαντικό ρόλο.

Ανάλογα με την σύσταση, την κατεργασία και τον χρόνο στερεοποίησης του κραματικού αφρού που θα προκύψει, διαμορφώνονται και αντίστοιχες θερμικές ιδιότητες.

Η θερμική αγωγιμότητα του αφρού αποτελείται από 4 αγωγιμότητες που συνεισφέρουν αθροιστικά στην τελική αγωγιμότητα του υλικού.

1. Θερμική αγωγιμότητα δια μέσου του στερεού κράματος λ_s^*
2. Θερμική αγωγιμότητα διάμεσου του αερίου λ_g^*
3. Θερμική συναγωγιμότητα χωρίς τα κελιά λ_c^*
4. Συνεισφορά αγωγιμότητας λόγω ακτινοβολίας από τοιχώματα κατά μήκος των κελιών λ_r^*

Η συνολική αγωγιμότητα του αφρού είναι :

$$\lambda_s^* + \lambda_g^* + \lambda_c^* + \lambda_r^*$$

Η γενική περίπτωση της εξίσωσης μονοδιάστατης ροής θερμότητας σε ένα σώμα δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha * \frac{\partial^2 T}{\partial X^2}$$

Οπού T η θερμοκρασία σε μια απόσταση X

τ ο χρόνος

X το βάθος του μεταλλικού αφρού

$\alpha = \frac{\lambda}{\rho * C_p}$ η θερμική διαχυτικότητα

Η συμβολή της συναγωγιμότητας του αέρα μέσα στα κελιά συνήθως είναι αμελητέα σε σχέση με τις υπόλοιπες αγωγιμότητες.

Το πόσο υπολογίσιμη μπορεί να γίνει σε έναν αφρό η συναγωγιμότητα, καθορίζεται από τον αριθμό Gr που πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 1000 αρά :

$$Gr > 1000$$

$$Gr = g * \beta * \Delta T c * (l^3) * \frac{\rho^2}{\mu^2} > 1000 \quad \Rightarrow \quad l > \sqrt[3]{\frac{1000 * \mu^2}{g * \beta * \Delta T c * (\rho^2)}}$$

Αν το μήκος l είναι πράγματι μεγαλύτερο τότε θα πάρουμε ως υπολογίσιμο τον παράγοντα λόγο αγωγιμότητας.

Η συνεισφορά της αγωγιμότητας βρίσκεται ικανοποιητικά από την σχέση :

$$[\lambda s *] = a * \lambda s * \left(\frac{[\rho *]}{\rho s} \right)$$

Όπου a είναι ένας συντελεστής

Η συνεισφορά της αγωγιμότητας λόγω του αερίου βρίσκεται από την σχέση :

$$\lambda g * = \left(1 - \frac{[\rho *]}{\rho s} \right) * \lambda a i r$$

(εάν πρόκειται το αέριο που βρίσκεται στα κελιά να είναι αέρας, αλλά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα οποιοδήποτε αέριο)

Η συνεισφορά της ακτινοβολίας βρίσκεται από την σχέση :

$$[\lambda r *] = 4 * \beta 1 * \sigma * [T^3] * t * \exp \left[- \left[K s * \frac{[\rho *]}{\rho s} \right] \right]$$

Όπου $\beta 1 \cong 1$ η είναι μια σταθερά κοντά στην μονάδα

$$\sigma = 5,67 * 10^{-8}$$

\bar{T} η μεση θερμοκρασια μεταξν δυο επιφανειων $\frac{T1 + T0}{2}$ Οπου T1 Η μεγαλη θερμοκρασια και T0

Ks ο συντελεστής απόσβεσης για το στερεό (1/m)

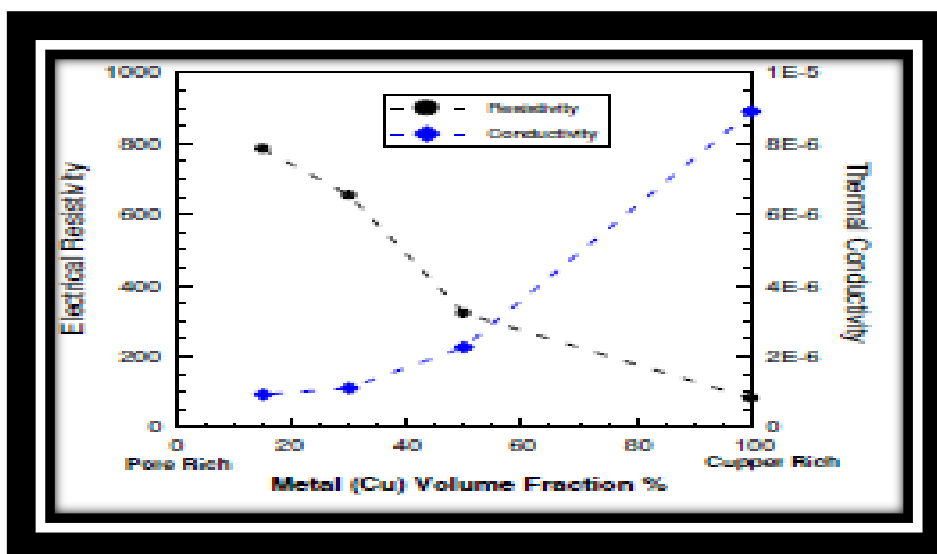
Η αγωγιμότητα του αφρού εν τέλει σύμφωνα με το design guide, εκτιμάται ημιεμπειρικά σύμφωνα με την σχέση για ανοικτά και για κλειστά κελιά:

$$\left(\frac{\rho}{\rho s} \right)^{1,8} < \frac{\lambda}{\lambda s} < \left(\frac{\rho}{\rho s} \right)^{1,65}$$

Βλέπουμε ότι για έναν αφρό συγκεκριμένης πυκνότητας, όταν η πυκνότητά του αυξάνει, μετατοπίζεται πιο ψηλά το εύρος που μπορεί να κινηθεί η αγωγιμότητα του αφρού.

Το σημείο τήξης του αφρού είναι ίδιο με αυτό του μασίφ μετάλλου-κράματος, το ίδιο η ειδική θερμότητα και η θερμική διαστολή.

Η αγωγιμότητα αφρού ανοικτών κελιών από χαλκό που φτιάχτηκε με μέσο απόπλυσης την ανθρακική ποτάσα δίνεται σύμφωνα με την κατ' όγκο αναλογία του χαλκού στο παρακάτω διάγραμμα [33]:



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΥΡΕΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΟΝ ΛΟΓΟ ΚΑΤ ΟΓΚΟ ΧΑΛΚΟΥ ΣΤΟΝ ΑΦΡΟ

Παρατηρούμε ότι η θερμική αγωγιμότητα του αφρού είναι τόσο μεγαλύτερη όσο το πορώδες του μειώνεται, και για 100% χαλκού φτάνει την θερμική αγωγιμότητα του χαλκού. Αυτή η εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας από το πορώδες του αφρού γίνεται γιατί υπάρχουν 1) πολύ μικρές διατομές που εμποδίζουν την μετάδοση θερμότητας διαμέσου του υλικού και 2) υπάρχουν πολλές διακλαδώσεις. Αυτό δεν σημαίνει ότι η ικανότητα για απαγωγή θερμότητας είναι μικρή καθώς αυτό εξαρτάται από την συναγωγιμότητα του ρευστού με το μέταλλο καθώς και από την επιφάνεια επαφής που είναι μεγάλη. Το ρευστό αγκαλιάζει όλες τις ακμές μεταδίδοντας του θερμότητα.

11. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Συμφώνα με το metal foam design guide η μοναδική ενδιαφέρουσα ηλεκτρική ιδιότητα είναι η ηλεκτρική αντίσταση και προσεγγίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$R = R_s * \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{-r}$$

που ισχύει και για αφρούς κλειστού και για ανοικτού κελιού,

όπου $r=1,6$ έως $1,85$

Στην δημοσίευση [33] σε αφρό ανοικτών κελιών με μητρικό μέταλλο τον χαλκό βλέπουμε ότι η ηλεκτρική αντίσταση του αφρού μικραίνει, καθώς ανεβαίνει ο όγκος της σκόνης χαλκού σαν συνολικό ποσοστό των κόνεων και έχει υπολογιστεί από την σχέση $\rho=(R*A)/L$, όπου

A=το εμβαδό της τομής του αφρού σε cm^2

R= Η ηλεκτρική αντίσταση σε Ωm

L= Το μήκος του αφρού σε cm

ρ =η αντίσταση ανά μέτρο σε $\mu\omega*cm$

Οι μετρήσεις της αντίστασης έγιναν με συσκευή μέτρησης μικρό Ωm omega CI8400 και τα αποτελέσματα δίνονται στο διάγραμμα του προηγούμενου κεφαλαίου

Υπάρχει μια σχέση σύμφωνα με τον νόμο των wiedermann-Franz, όπου αν μετρηθεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού, τότε μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά η θερμική αγωγιμότητα (λ):

$$\sigma * \frac{\lambda}{T} = (\pi^2) * \frac{k^2}{3 * e^2} = 2,443 * \frac{10^{-8} J \Omega}{s * K^2} = L$$

όπου $\sigma = 1/\rho$, T η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και k η σταθερά Boltzmann

Η σχέση αυτή μπορεί να συγκριθεί με τα πειραματικά δεδομένα και να ελεγχθεί η απόκλιση της σε σχέση με διάφορους αφρούς διάφορων μεθόδων παρασκευής ποικίλων αναλογιών κόνεων και κραματικών στοιχείων.

12. ΟΙ ΜΕΤΑΛΙΚΟΙ ΑΦΡΟΙ ΩΣ ΥΛΙΚΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ενεργεία απορρόφησης ενός υλικού είναι το εμβαδόν της περιοχής που εσωκλείεται από την καμπύλη τάσης παραμόρφωσης.

Ο μεταλλικός αφρός έχει την ιδιότητα να διατηρεί, μετά την ελαστική του περιοχή (γραμμική και μη γραμμική), την τάση κατάρρευσης των κελιών περίπου σταθερή (η παρεμβολή που διέρχεται από τα σημεία των ζευγών τάσης παραμόρφωσης σε αυτήν την περιοχή έχει μικρή κλίση).

Όπως έχει επισημανθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, κάθε σχετική πυκνότητα αφρού έχει και διαφορετική τάση για την ίδια παραμόρφωση. Αυτό συνεπάγεται και διαφορετικό εμβαδό (ενέργεια).

Επίσης για την ίδια απορρόφηση ενέργειας υπάρχουν διαφορετικές τάσεις και αν θεωρηθεί ότι κάθε τάση plateau είναι σταθερή για ίδιας σχετικής πυκνότητας υλικό και για ίδια απορρόφηση ενέργειας, θα λάβουμε διαφορετικό σ/ρ για κάθε ρ^* .

Επίσης για την ίδια απορρόφηση ενέργειας, διαπιστώνεται ότι τόσο για χαμηλές όσο και για υψηλές σχετικές πυκνότητες, η τάση κατάρρευσης έχει την ίδια τιμή αλλά για διαφορετική παραμόρφωση, ενώ ενδιάμεσα βρίσκεται ένα βέλτιστο, όπου για την ίδια απορρόφηση ενεργείας προκύπτει χαμηλότερη τάση. Αυτό είναι το βέλτιστο σημείο που τα υλικά πακετάρονται με αυτό το υλικό και έχουν την μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης.

Η ενέργεια απορρόφησης δίνεται από την σχέση $W = \sigma \cdot \epsilon$

Περίπτωση αφρού ανοικτού κελιού :

Η συμβολή του αερίου στην παράγωγη έργου που βρίσκεται ανάμεσα στις κυψελίδες και εξωθείται, βρίσκεται για σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης από την σχέση :

$$W_g = C * \mu * \dot{\epsilon} * \left[\frac{L}{l}\right]^2 * \ln \left[\frac{1}{1 - \epsilon f}\right]$$

όπου ϵf = παραμόρφωση

μ = ιξώδες ρευστού

$\dot{\epsilon}$ = ταχύτητα παραμόρφωσης

L = Δείγμα

C = κοντά στην μονάδα

Ενώ για μειούμενο ρυθμό παραμόρφωσης βρίσκεται από την σχέση :

$$W_g = C * \mu * \epsilon_i * \left(\frac{L}{l}\right)^2 * \left(1 + \frac{1 - \epsilon f}{\epsilon f} * \ln(1 - \epsilon f)\right)$$

όπου η ταχύτητα παραμόρφωσης είναι $\dot{\epsilon}_i$ στην αρχή για παραμόρφωση ϵ_i και 0 στο τέλος της παραμόρφωσης, όταν η παραμόρφωση είναι ϵf .

Περίπτωση αφρού κλειστού κελιού

Αντίθετα στην περίπτωση του αφρού κλειστού κελιού, το αέριο δεν εξωθείται άλλα συμπιέζεται ευρισκόμενο στην αρχή σε πίεση p_0 και έπειτα αυξανόμενης παραμόρφωσης, αυξάνει η πίεση και το έργο συμπίεσης του αερίου.

Η πίεση δίνεται από την σχέση :

$$p = p_0 \left\{ \frac{1 - \frac{\rho^*}{\rho_s}}{\left[1 - \varepsilon * (1 - 2 * (v^*)) - \frac{\rho^*}{\rho_s} \right]} \right\}$$

ενώ το έργο του αερίου δίνεται από την σχέση :

$$W_c = \int_0^{\varepsilon f} (p - p_0) * d\varepsilon \Rightarrow$$

$$W_c = p_0 * \left\{ \frac{1 - \frac{\rho^*}{\rho_s}}{1 - 2 * (v^*)} * \ln \left[\frac{1 - [\rho^*]/\rho_s}{(1 - (\rho^*)/\rho_s) - (1 - 2 * v^*) * \varepsilon f} \right] - \varepsilon f \right\}$$

12.1. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΠΟΙΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΟΓΚΟΥ ΑΦΡΟΥ

Πρέπει να επισημανθεί ότι όταν είναι γνωστή η αρχική πυκνότητα του αφρού και επιπλέον το κόστος παράγωγης αφρού ανά μονάδα μάζας, τότε μπορεί να βρεθεί η απορρόφηση ενέργειας ανά μονάδα μάζας και η απορρόφηση ενέργειας ανά μονάδα κόστους, έχοντας καλύτερη εικόνα για τα χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί σε κάθε αφρό, αξιοποιώντας τα κατάλληλα για τις επιθυμητές εφαρμογές.

Είναι χρήσιμο να παρατεθούν τα συμπεράσματα από την δημοσίευση[1] "Compressive and energy absorption properties of closed-cell magnesium foams" που αφορούν αφρούς μαγνησίου (παραγμένους με μεθόδους κονιομεταλλουργίας με χρησιμοποίηση παράγοντα αφροποίησης όταν το κράμα είναι στην ημιστερεά φάση), με αλουμίνιο σαν κραματικό στοιχείο. Στην παραπάνω δημοσίευση λαμβάνονται δείγματα αφρών μαγνησίου παραγμένων με την ίδια μέθοδο τα οποία παρουσιάζουν 4 διαφορετικές πυκνότητες.

Η μέθοδος παραγωγής είναι η αφροποίηση μέσω τήγματος, μέσα στο οποίο υπάρχει ποσότητα παράγοντας σταθεροποίησης για την αύξηση του ιξώδους καθώς και ένα μέσο αφροποίησης. Το μέσο που αυξάνει το ιξώδες ώστε να εμποδιστεί η γρήγορη απόπλυση του αερίου από το υγρό προκειμένου να αποφευχθεί η διαφυγή του αερίου είναι το ασβέστιο (Ca). Ο παράγοντας αφροποίησης είναι το MgCO₃, το οποίο διασπάται δίνοντας CO₂, το οποίο ρίχνεται στο τήγμα μας (**Mg-9wt%Al-3,5wt%Ca**), που έχει θερμοκρασία 640 C° (να υπενθυμίσουμε ότι το σημείο τήξης του καθαρού μαγνησίου είναι 650 C°), ενώ ταυτόχρονα αναδεύουμε συνεχώς μεταφέροντας σε φούρνο θερμοκρασίας 620 C° , όπου και μετά από 5 λεπτά ολοκληρώνεται η αφροποίηση. Έπειτα αφήνουμε το τήγμα μας να στερεοποιηθεί στον αέρα του περιβάλλοντος.

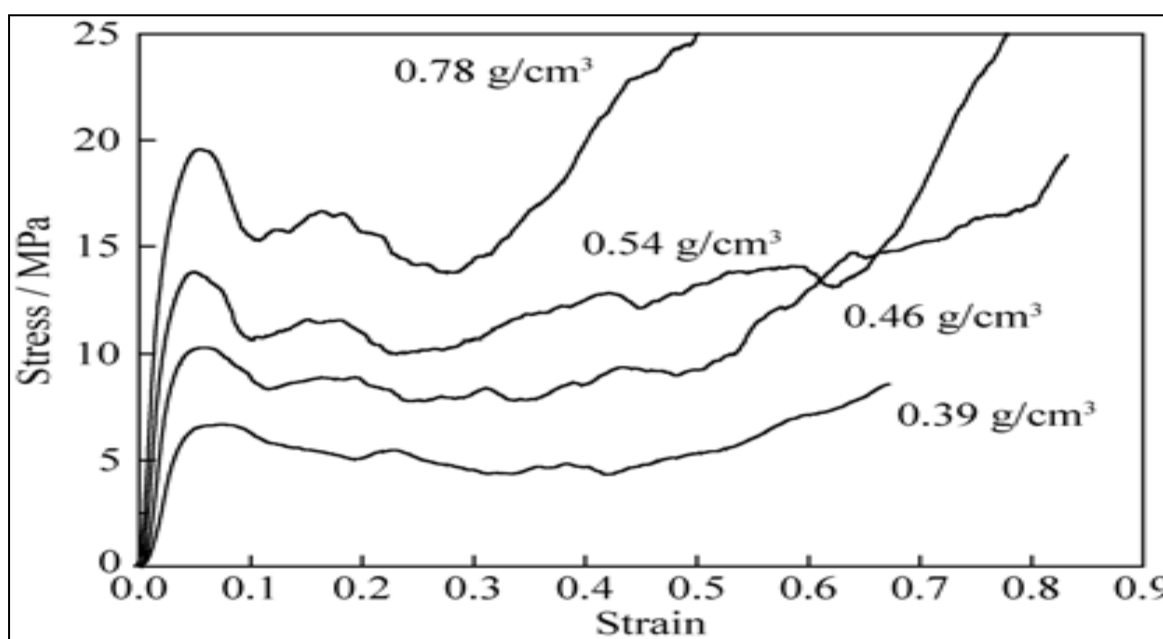
Οι πυκνότητες των δειγμάτων είναι 0.39 , 0.46 , 0.54 , 0.78 $\frac{gr}{cm^3}$ με την σήμανση 1 , 2 , 3, 4 αντίστοιχα.

Στον έλεγχο συμπίεσης των δοκιμών μπορούμε να διακρίνουμε τρία βασικές περιοχές:

Α) Τη βαθμίδα γραμμικά ελαστικής περιοχής με όριο παραμόρφωσης μέχρι 0,05 περίπου. Σε αυτό το σημείο η σχέση μεταξύ τάσης - παραμόρφωσης είναι γραμμική.

Β) Τη βαθμίδα κατάρρευσης, στην οποία η τάση φτάνει σε μια μέγιστη ή αλλιώς οριακή τάση και η παραμόρφωση στο δοκίμιο αρχίζει να γίνεται τοπική, όπου τα κελιά αρχίζουν να καταρρέουν με τις έδρες τους να έρχονται η μια πάνω στην άλλη. Μετά την μέγιστη τάση, η τάση αρχίζει να μειώνεται ξαφνικά. Η τάση παρουσιάζει διακύμανση γύρω από μια τάση η οποία είναι η τάση plateau για σημαντική έκταση παραμόρφωσης. Η κατάρρευση των κελιών συμβαίνει στα πιο αδύναμα στοιχεία, όπου μετά το κελί καταρρέει, τα κελιά αυτού του στρώματος συνενώνονται και η τάση απελευθερώνεται σε αυτό το σημείο περνώντας σε κατάρρευση κελιών σε άλλο στρώμα-επίπεδο με μειωμένη τάση. Σε μακροσκοπικό επίπεδο αυτό σημαίνει την κίνηση γύρω από μια τάση και με αυξανόμενη παραμόρφωση την ελαφρά τάση ανόδου της τάσης.

Γ) Μετά από την κατάρρευση των κελιών, ακολουθεί η περιοχή, κατά την οποία η επιπλέον παραμόρφωση οδηγεί σε πυκνοποίηση του αφρού και αυτό συνεπάγεται την απότομη αύξηση της τάσης για μια μικρή αύξηση της παραμόρφωσης.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12-1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ- ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΦΡΟΥ ΓΙΑ ΑΦΡΟΥΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΩΝ

Το μέτρο ελαστικότητας του αφρού δίνεται από την σχέση :

$$\frac{Ef}{Es} = C1 * (\varphi^2) * \left(\frac{\rho f}{\rho s}\right) + (C1 *) * (1 - \varphi) * \left(\frac{\rho f}{\rho s}\right)$$

όπου το φ εξαρτάται από την γεωμετρία των ακμών και των εδρών και ορίζεται ως το κλάσμα του στερεού που περιέχεται στις ακμές του κελιού ενώ οι σταθερές εξαρτώνται από τον ίδιο αφρό του μαγνησίου (η σχέση είναι γενική).

Το E_f έχει παρθεί στο σημείο της μέγιστης τάσης και ονομάζεται ονομαστικό μέτρο ελαστικότητας και είναι ελαφρώς μικρότερο από το μετρό ελαστικότητας που η

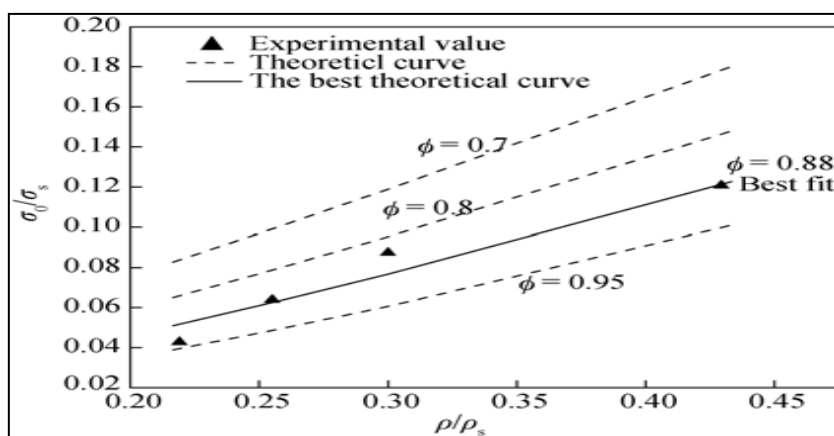
κλίση του είναι ακριβώς πάνω στην γραμμή, όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα.

Η μέγιστη τάση δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_s} = C2 * \frac{\left(\phi * \frac{\rho_0}{\rho_s}\right)^3}{2} + (C2 *) * (1 - \phi) * \frac{\rho_0}{\rho_s}$$

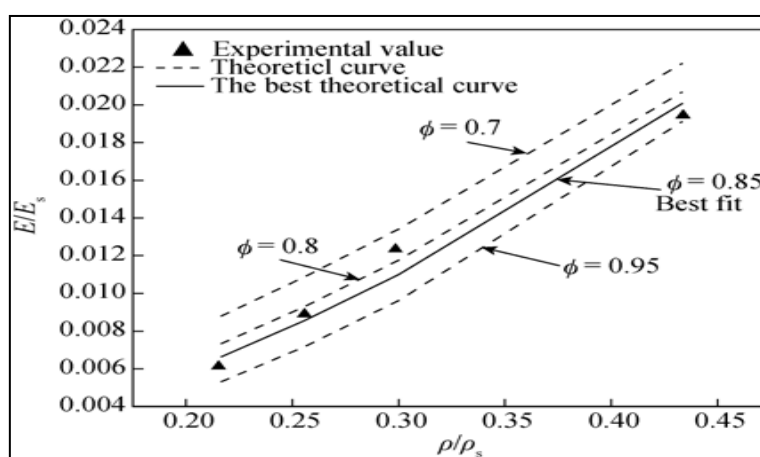
όπου σ_0 η μέγιστη τάση, $C2$, $C2^*$ οι σταθερές σύμφωνα με τον αφρό μαγνησίου.

Τα 4 δοκίμια της παραπάνω δημοσίευσης παρουσιάζουν δεδομένες σχετικές πυκνότητες. Επίσης από τα διαγράμματα λαμβάνονται δεδομένα σ_0/σ_s , κι ως εκ τούτου λαμβάνοντας τα θεωρητικά διαγράμματα $\sigma_0/\sigma_s - \rho_0/\rho_s$ με παράμετρο το ϕ και τοποθετώντας τα πειραματικά δεδομένα, βρίσκουμε ότι από την σχέση σχετικής τάσης σχετικής πυκνότητας τα πειραματικά μας δεδομένα ταιριάζουν για $\phi=0,88$.



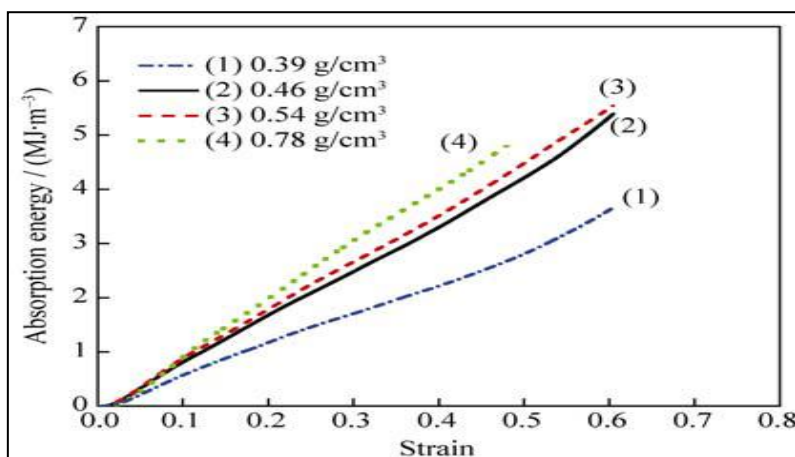
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12-2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΤΑΣΕΩΝ – ΠΥΚΝΟΤΗΤΩΝ ΑΦΡΟΥ ΜΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ ΤΟ ϕ

Επίσης από τις καμπύλες E_0/E_s , ρ_0/ρ_s με παράμετρο το ϕ και τοποθετώντας τα πειραματικά δεδομένα, βρίσκω ότι αυτά ταιριάζουν περισσότερο για $\phi=0,85$



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12-3: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΤΗΚΟΤΗΤΑΣ (ΑΦΡΟΥ- ΜΗΤΡΗΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ) – ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΑΦΡΟΥ

Έτσι λαμβάνουμε τη μέση τιμή $\phi=0,865$ και βρίσκουμε επιπλέον τις σταθερές $C1$, $C1^*$, $C2$, $C2^*$, είναι δε ορισμένες οι θεωρητικές συναρτήσεις σ_0 , E_f . Κατά συνέπεια είναι δυνατή η κατασκευή των διαγραμμάτων ενέργειας - παραμόρφωσης (MJ ανά τετραγωνικό μετρό) – παραμόρφωσης με παράμετρο την πυκνότητα. Η σχέση της ενέργειας ανά κυβικό μετρό δίνεται από την σχέση $W = \int_0^\epsilon \sigma * d\epsilon$, την οποία μέσω της επιλογής των ζευγών σ - ϵ μπορούμε να ολοκληρώσουμε αριθμητικά από τις αναλυτικές σχέσεις που διαθέτουμε και αναλυτικά εφόσον είναι γνωστή η αναλυτική τιμή της σ .



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12-4: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ- ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΩΝ ΑΦΡΩΝ

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι ότι όσο αυξάνει η πυκνότητα αυξάνει και η ενέργεια παραμόρφωσης ανά κυβικό μετρό για παραμόρφωση $\epsilon=45\%$. Επίσης αυξάνει και η μέγιστη τάση (peak) . Για εφαρμογές και ειδικά για εφαρμογές απορρόφησης ενεργείας πακεταρίσματος ασφάλειας σε οχήματα, συσκευασίες κτλ, είναι σημαντική αυτή η τάση καθώς και η τάση που κυμαίνεται γύρω από την παραμόρφωση, όπου συμβαίνει κατάρρευση.

12.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΦΡΟΥ ΓΙΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΕΣΩΚΛΕΙΟΜΕΝΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΑΠΟ ΘΡΑΥΣΗ, ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗ, ΤΡΑΥΜΑΤΙΣΜΟ ΜΕ ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟ ΟΓΚΟ, ΜΑΖΑ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΣ

Έχουμε δει στην πράξη ότι, όταν ένα αντικείμενο που περιέχεται σε κάποιο κουτί, προσκρούει, για παράδειγμα στο έδαφος, ή οπουδήποτε, τότε, ανάλογα με το πόσο γρήγορα χάνει την κινητική του ενέργεια, δηλαδή με το πόσο γρήγορα επιβραδύνεται η σχετική του κίνηση σε σχέση με το επίπεδο, όπου προσκρούει, τότε ασκείται πάνω του μια δύναμη που είναι ανάλογη της μάζας του και της επιβράδυνσής του. Αν η δύναμη αυτή ξεπεράσει κάποιο όριο, τότε το αντικείμενο

‘αστοχεί’. Αστοχία μπορεί να σημαίνει σπάσιμο (υαλικά), τραυματισμό (επιβάτες σε κάποιο όχημα), μη επιθυμητή παραμόρφωση αντικείμενου (βαθούλωμα, λυγισμός σε μια επιφάνεια) κτλ. Επισημαίνεται ότι η δύναμη η οποία θα λαμβάνεται στους υπολογισμούς μας κανονικά θα πρέπει να έχει κάποιο περιθώριο ασφαλείας, ως προς τα πραγματικά καταστρεπτικά αποτελέσματα, αλλά στην παρούσα διπλωματική εργασία, δεν θα μας απασχολήσει αυτό.

Την δύναμη αυτή θα την ορίσουμε ως F_d , (d από το destruction) και την επιτάχυνση για την οποία επιτυγχάνεται αυτή η καταστρεπτική δύναμη ως a^* (από το acceleration), (ή negative acceleration, deceleration για επιβράδυνση, που συμβαίνει στην πρόσκρουση) και δίνεται από την σχέση :

$$F_d = m * (a^*)$$

Για διάφορα αντικείμενα ορίζεται η επιτάχυνση ή επιβράδυνση αυτή σαν ένα πολλαπλάσιο της επιτάχυνσης βαρύτητας g .

Επανερχόμενοι στους αφρούς και γνωρίζοντας ότι η ιδανική μοντελοποίηση ή αλλιώς ο ιδανικός αφρός είναι αυτός που έχει μια σταθερή τάση στην περιοχή της πλαστικής κατάρρευσης μέχρι να επέλθει η πυκνοποίηση του, θα θεωρήσουμε τη δύναμη που ασκείται στο εσωκλειόμενο αντικείμενο ως δράση - αντίδραση :

$$F = [\sigma_{pl}^*] * A$$

όπου A το εμβαδόν επαφής του αντικείμενου με τον αφρό.

ϵ_D = η μέγιστη παραμόρφωση όπου για τον ιδανικό αφρό η τάση plateau παραμένει σταθερή

σ_{pl} = η σταθερή τάση plateau

Οι δύο δυνάμεις είναι ίσες στην περίπτωση που η επιταχυνση a γίνει οριακά a^* , έτσι σε αυτήν την περίπτωση :

$$F_d = F = \sigma_{pl} * A = m * (a^*) \Rightarrow [\sigma_{pl}^*]_{max} = m * \frac{[a^*]}{A}$$

Για να προστατευτεί το αντικείμενο από την πρόσκρουση, ο αφρός πρέπει να έχει τάση plateau μικρότερη από αυτήν που βρίσκεται από τον ανωτέρω υπολογισμό για δεδομένη καταστρεπτική επιβράδυνση (δίνεται από πινάκες), μάζα (η μάζα του αντικείμενου) και επιφάνεια επαφής αντικείμενου αφρού (μπορεί να καλύπτει μια επίπεδη επιφάνεια του αντικείμενου ολοκληρωτικά ή επί μέρους).

Αρά πρέπει:

$$[\sigma_{pl}^*] \leq m * [a^*]/A$$

Γίνεται δεκτό ότι στις πρακτικές εφαρμογές για ασφάλεια πρόσκρουσης, όπως πακετάρισμα προϊόντων, σύγκρουση οχημάτων κτλ, η κινητική ενέργεια του αντικείμενου πρέπει να απορροφηθεί όλη, καθώς αυτό έτσι ή αλλιώς συμβαίνει, αφού το σύστημα αντικείμενου περιβλήματος στο τέλος είναι ακινητοποιημένο (σε άλλες εφαρμογές δεν συμβαίνει αυτό αλλά ένα μέρος της κινητικής ενέργειας απορροφάται). Η εξίσωση της κινητικής ενέργειας με μεταβλητή την ταχύτητα έχει ως εξής :

$$U = 0,5 * m * u^2$$

Η απορρόφηση της ενέργειας αυτής στον αφρό είναι

$$E_{ab} = [\sigma_{pl} *] * \epsilon D * A * h$$

όπου ϵD είναι η παραμόρφωση μέχρι την αρχή της πυκνοποίησης (περιοχή όπου ανεβαίνει απότομα η τάση), αφού θεωρούμε ότι το αντικείμενο παραμορφώνει τον αφρό μέχρι το τέλος της περιοχής αυτής, υπό την επίδραση της δύναμης λόγω της επιβράδυνσης πάνω στην έδρασή του με τον αφρό.

Το h είναι το ύψος του αφρού

Από την σχέση αυτή εξάγουμε το μέγιστο μήκος παραμόρφωσης του αφρού διαστατοποιημένο:

$$\delta h_{max} = \epsilon D * h_{min}$$

Αν δεχτούμε ότι δεν παραμένει αξιόλογη πλαστική παραμόρφωση στο αντικείμενο ή ότι η ενέργεια που απορρόφησε το αντικείμενο με διάφορες μορφές είναι πολύ μικρή, έχουμε :

$$E_{ab} = U = 0,5 * m * u^2 = [\sigma_{pl} *] * \epsilon D * A * h \quad \Rightarrow$$

$$h_{min} = \frac{0,5 * m * u^2}{[(\sigma_{pl} *) * \epsilon D * A]}$$

Εναλλακτική σχέση για το πάχος είναι η εξής:

$$h_{min} = 0,5 * \frac{u^2}{[(a *) * \epsilon D]}$$

Το h είναι το ελάχιστο πάχος που πρέπει να έχει ο αφρός ώστε να μπορεί να γίνει με ασφάλεια η απορρόφηση ενέργεια, φτάνοντας οριακά στην περιοχή πυκνοποίησης αλλά χωρίς να την ξεπεράσει. Για δεδομένη κινητική ενέργεια βλέπουμε ότι το πάχος h εξαρτάται από τα σ_{pl}^* , ϵD .

Από την σχέση αυτή βρίσκοντας το h μπορεί να βρεθεί:

α) το μήκος παραμόρφωσης του αφρού διαστατοποιημένο :

$$\delta h_{min} = \epsilon D * h_{min}$$

β) ο όγκος του αφρού που απαιτείται :

$$V = A * h_{min}$$

γ) η ενέργεια ανα μονάδα όγκου που απορροφάει ο αφρός :

$$W_v = (\sigma_{pl} *) * \epsilon D$$

Όπως έχει ήδη επισημανθεί, ο περιορισμός μας όσον αφορά την αστοχία του αντικειμένου, είναι αυτός που κάνει την τάση plateau μικρότερη από μια τιμή, όμως δεν αρκεί μόνο αυτό ειδικά όταν υπάρχουν περιορισμοί βάρους, όγκου, κόστους ή και συνδυασμός τους. Αλλά και χωρίς περιορισμούς, είναι λογικό για παράδειγμα να επιλεγεί μεταξύ αφρών που μας παρέχουν το ίδιο αποτέλεσμα, όσον αφορά την ασφάλεια για αστοχία, αυτόν με το μικρότερο κόστος με ικανοποιητικό συνολικό όγκο.

Οι συναρτήσεις απορρόφησης ενέργειας ανηγμένες κατ' αντιστοιχία στην μονάδα όγκου, μάζας, κόστους είναι :

- $Wv = (\sigma pl *) * \epsilon D$ απορρόφηση ενέργειας ανά μονάδα όγκου
- $Ww = (\sigma pl *) * \frac{\epsilon D}{\rho}$ απορρόφηση ενέργειας ανά μονάδα μάζας
- $Wc = (\sigma pl *) * \frac{\epsilon D}{\rho * Cm}$ απορρόφηση ενέργειας ανά μονάδα κόστους

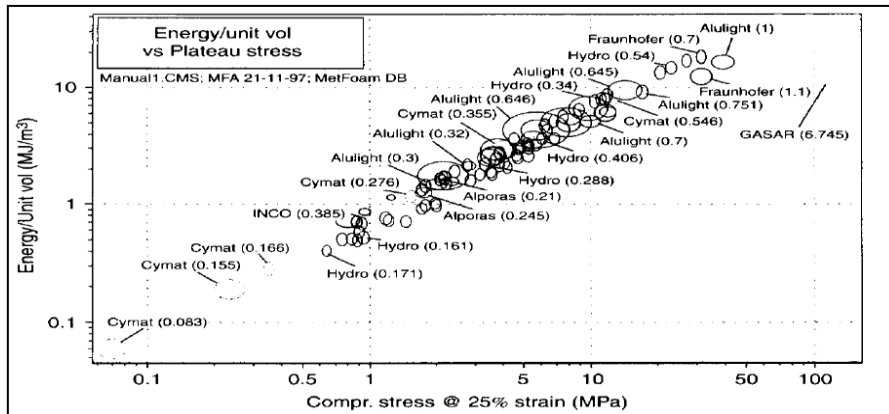
Μια καλή ημιεμπειρική προσέγγιση της παραμόρφωσης πυκνοποίησης είναι η εξής :

$$\epsilon D = 0,8 - 1,75 * \left(\frac{\rho}{\rho s} \right)$$

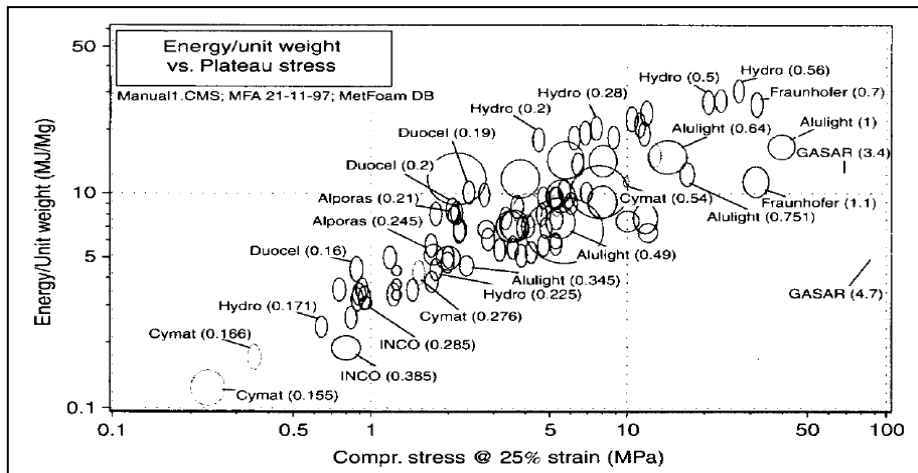
Υπάρχουν διαγράμματα, στα οποία για κάθε διαθέσιμο αφρό δίνεται το εύρος, στο οποίο κινείται στην τεταγμένη η ενέργεια απορρόφησης ανά μονάδα όγκου, βάρους, κόστους και στην τετμημένη η τάση plateau. Επιπλέον αναγράφεται η σχετική πυκνότητα για κάθε διαθέσιμο αφρό. Επίσης υπάρχουν πίνακες για την μέγιστη ταχύτητα πρόσκρουσης και την μέγιστη επιβράδυνση. Εφόσον υπολογιστεί η μέγιστη επιτρεπτή τάση plateau, ώστε το αντικείμενο να είναι ασφαλές, εξετάζουμε τα 3 διαγράμματα ανηγμένης απορρόφησης ενεργείας ανά μονάδα όγκου, μάζας, κόστους –τάσης plateau και επιλέγουμε αφρούς που βρίσκονται οπωσδήποτε στα αριστερά αυτής της τάσης. Δηλαδή η τάση αυτή πρέπει να είναι μικρότερη της υπολογισθείσας θεωρητικά. Τα κριτήρια επιλογής μας σίγουρα θα είναι ένας συμβιβασμός κόστους, όγκου, μάζας, αλλά σίγουρα πρέπει η απορρόφηση ενεργείας να είναι σημαντική (θεωρητικά όσο πιο μεγάλη γίνεται), ώστε να μεγαλώνει όσο το δυνατόν το γινόμενο $(\sigma pl *) * \epsilon D$ μειώνοντας το απαιτούμενο πάχος του χρησιμοποιούμενου αφρού.

Όσο πιο δεξιά στο διάγραμμα κινούμαστε, τόσο η τάση plateau μεγαλώνει και για αφρό έστω ίδιας ίδιας πυκνότητας αρά δεδομένης ϵD θα λαμβάνεται μεγαλύτερο απαιτούμενου πάχος αφρού.

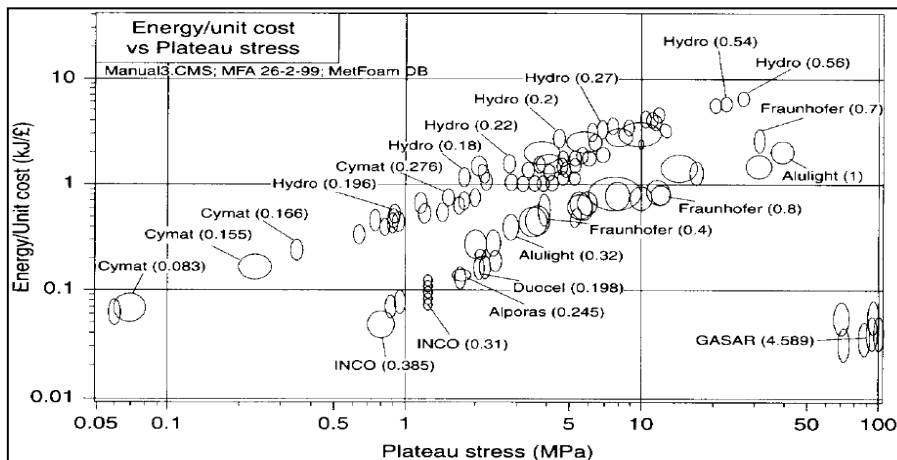
Τα παρακάτω τρία σχήματα δείχνουν τις ανηγμένες απορροφήσεις ενέργειας και τις τάσεις plateau καθώς και τις πυκνότητες διαθεσίμων και μελετημένων αφρών ενώ τα επόμενα δυο δείχνουν την επιτρεπόμενη επιβράδυνση καθώς και τις τυπικές ταχύτητες πρόσκρουσης.



ΕΙΚΟΝΑ-12-1: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟΡΟΦΗΣΗΣ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΟΓΚΟΥ –ΤΑΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΓΙΑ 25% ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ, ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ ΑΦΡΩΝ



ΕΙΚΟΝΑ-12-2: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟΡΟΦΗΣΗΣ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΒΑΡΟΥΣ –ΤΑΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΓΙΑ 25% ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ, ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ ΑΦΡΩΝ



ΕΙΚΟΝΑ-12-3: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟΡΟΦΗΣΗΣ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΚΟΣΤΟΥΣ –ΤΑΣΗΣ ΠΛΑΤΕΑΥ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ, ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ ΑΦΡΩΝ

Table 11.1 *Limiting g-factors, a*, for a number of objects*

<i>Object</i>	<i>Limiting g-factor, a*</i>
Human body, sustained acceleration	5–8
Delicate instruments; gyroscopes	15–25
Optical and X-ray equipment	25–40
Computer displays, printers, hard disk drives	40–60
Human head, 36 ms contact time	55–60
Stereos, TV receivers, floppy disk drives	60–85
Household appliances, furniture	85–115
Machine tools, engines, truck and car chassis	115–150

ΠΙΝΑΚΑΣ 12.1 : ΟΡΙΑΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΕΠΙΒΡΑΔΥΝΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ

<i>Condition</i>	<i>Velocity (m/s)</i>
Freefall from forklift truck, drop height 0.3 m	2.4
Freefall from light equipment handler, drop height 0.5 m	3.2
Freefall of carried object or from table, drop height 1 m	4.5
Thrown package, freefall	5.5
Automobile, head impact, roll-over crash in car ^a	6.7
High drag parachute, landing velocity	7
Low drag parachute, landing velocity	13
Automobile, side impact, USA ^a	8.9
Europe ^a	13.8
Automobile, front impact, USA ^a	13.4
Europe ^a	15.6

ΠΙΝΑΚΑΣ 12.2: ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΠΟΙΕΣ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΟΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΟΡΙΣΜΕΝΑ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ

13. ΟΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΙ ΑΦΡΟΙ ΩΣ ΥΛΙΚΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ (ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ)

Η στάθμη του ήχου μετριέται σε decibel, όπου η κλίμακα δείχνει αλλαγή στάθμης πίεσης ηχητικών κυμάτων και αριθμητικά ορίζεται ως (Sound Pressure Level) :

$$SPL = 10 * LOG_{10} \left(\frac{Prms}{Po} \right)^2 = 20 * LOG_{10} \left(\frac{Prms}{Po} \right)$$

Αυτή η κλίμακα συγκρίνει το επίπεδο δύο ήχων, όπου Prms είναι ο τετραγωνικός μέσος όρος της πίεσης του ήχου, ενώ η πίεση Po είναι η πίεση αναφοράς και ορίζεται αυτή για την οποία αρχίζει να την αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο αφτί και είναι σε απολυτή τιμή $Po = 20 * 10^{-6} \text{ Pa}$.

Αρά 10-πλάσια πίεση ηχητικού κύματος σημαίνει ότι SPL=20, έτσι για 10-πλασιασμό του ηχητικού επιπέδου, υπάρχει αύξηση 20 decibel.

Κατά την είσοδο των ηχητικών κυμάτων σε ένα στερεό μέσο απορροφάται ενέργεια και συμβαίνει μείωση της πίεσης του εξερχόμενου κύματος. Για την απόδοση της απορρόφησης ηχητικής ενέργειας και κατά συνέπεια της μείωσης της πίεσης, λαμβάνουμε τον συντελεστή απορρόφησης του ήχου, ο οποίος ορίζεται ως :

$$\alpha = 1 - \left(\frac{B}{A} \right)^2$$

όπου **B** = το εύρος διακύμανσης του ηχητικού κύματος που δεν απορροφάται

A = Το εύρος διακύμανσης της αρχικής πίεσης του ηχητικού κύματος

Η διάφορα του ηχητικού επιπέδου των δυο κυμάτων ορίζεται ως :

$$\Delta(SPL) = -10 * \log_{10} \left[\left(\frac{B}{A} \right)^2 \right] = 10 * \log_{10}(1 - \alpha)$$

Για συντελεστή απορρόφησης 90%, σημειώνεται μείωση κατά 10 decibel.

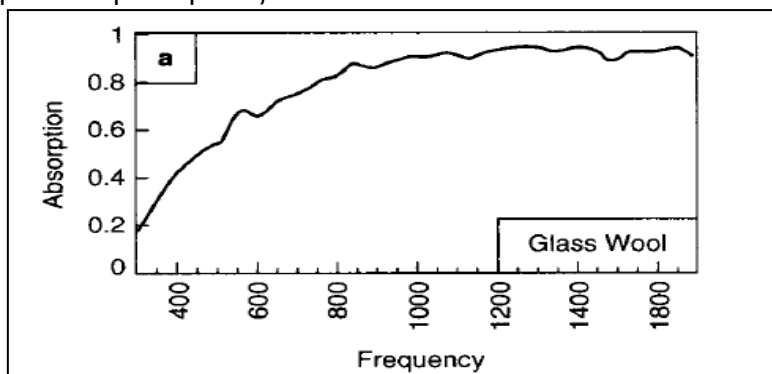
Σύμφωνα με το: METAL FOAMS: design guide, προκύπτει ότι οι μεταλλικοί αφροί μπορούν επίσης να απορροφήσουν ηχητική ενέργεια αρκετά αποτελεσματικά, κυρίως όμως όταν κάποιες έδρες κελιών έχουν σπάσει λόγω παραμόρφωσης συμπίεσης 10 %, σε σχέση με αφρό, όπως ακριβώς ελήφθη από τη διαδικασία αφροποίησης.

Τα παρακάτω διαγράμματα μας δείχνουν την σύγκριση απορρόφησης ενέργειας για 3 μέσα, όπου στην τεταγμένη βλέπουμε τον συντελεστή απορρόφησης ήχου και στην τετμημένη τις συχνότητες στις οποίες συμβαίνει η απορρόφηση:

Υλικά ηχητικής απόσβεσης:

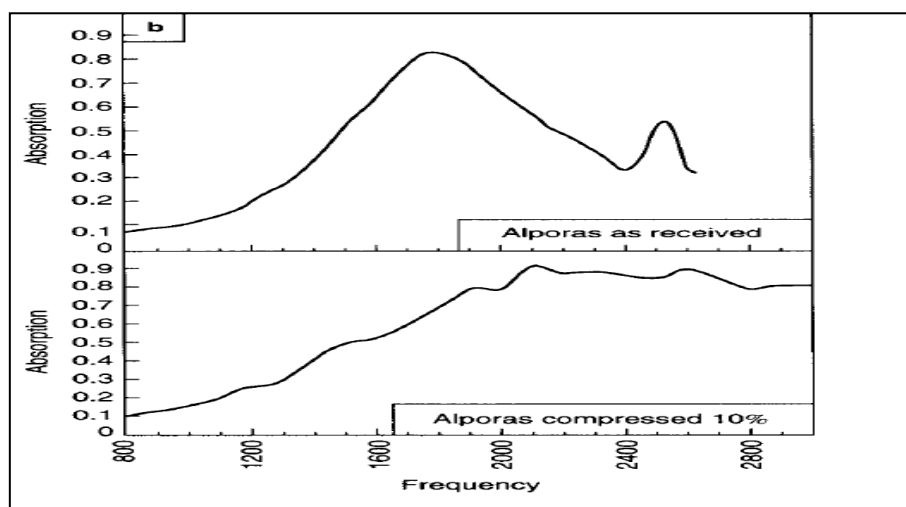
a) Υαλοβάμβακας

- b) Αφρός Αλργορας, όπως ελήφθη
 c) Αφρός Αλργορας συμπιεσμένος κατά 10 %



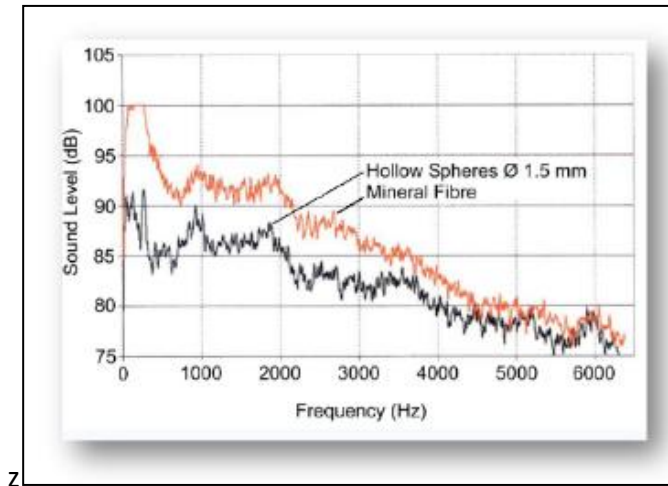
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13-1 : ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟΡΟΦΗΣΗΣ ΗΧΟΥ ΥΑΛΟΒΑΜΒΑΚΑ

Όπως βλέπουμε, από τα τρία υλικά ο υαλοβάμβακας παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά όσον αναφορά την απορρόφηση ήχου και κυρίως για πολύ χαμηλότερες συχνότητες σε σχέση με τον αφρό αλουμινίου Αλργορας. Για τον αφρό, καλύτερη απορρόφηση έχει εκείνος, του οποίου οι έδρες έχουν σπάσει λόγω συμπίεσης, αλλά και πάλι δεν προσεγγίζει τις ιδιότητες απορρόφησης ήχου του υαλοβάμβακα που είναι και αυτός επίσης αφρώδες μη μεταλλικό υλικό.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13-2: ΑΠΟΡΟΦΗΣΗ ΗΧΟΥ ΑΦΡΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ , ΤΟΥ ΙΔΙΟΥ ΑΦΡΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΚΑΤΑ 10 %

Σε μια άλλη μελέτη, στην οποία ο αφρός ήταν από χάλυβα, με την μέθοδο των κοίλων σφαιρών διαμέτρου 1,5 mm και συγκρινόμενος με το φυσικό υλικό νιτροβάμβακα που επίσης έχει ιδιότητες ηχομόνωσης, παρατηρείται ότι ο μεταλλικός αφρός έχει καλύτερες ιδιότητες ηχομόνωσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13-3:ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΡΟΦΗΣΗΣ ΗΧΟΥ ΑΠΟ ΑΦΡΟ ΚΟΙΛΩΝ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΣΦΑΙΡΩΝ , ΝΙΤΡΟΒΑΜΒΑΚΑ

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε ότι ο εν λόγω αφρός έχει πολύ καλύτερες ιδιότητες απορρόφησης ήχου για χαμηλές και μέτριες συχνότητες, ενώ για υψηλές η ηχητική απόσβεση γίνεται περίπου η ίδια.

Στην δημοσίευση με τίτλο “ Acoustic absorption behavior of an open-celled aluminium foam” εξετάζεται ο βαθμός απορρόφησης ήχου σε αφρούς κράματος αλουμινίου ανοιχτού κελιού, με παραμέτρους το μέγεθος των κελιών με μεγέθη 0,5mm, 1,5mm, 2,5 mm, 3,5mm την απόσταση του κενού μεταξύ του αφρού και της πηγής 0mm μέχρι 20 mm καθώς και το πάχος του αφρού. Επίσης λαμβάνουμε αφρό κλειστού κελιού με μεγεθος πόρων 3 mm.

Τα χαρακτηριστικά των αφρών αλουμινίου δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

FOAM	Nominal pore size(mm)	Porosity (%)	Pore type
A	0,5	57	Open
B	1,5	60	Open
C	2,5	59	Open
D	3,5	61	Open
E	3	88	Close

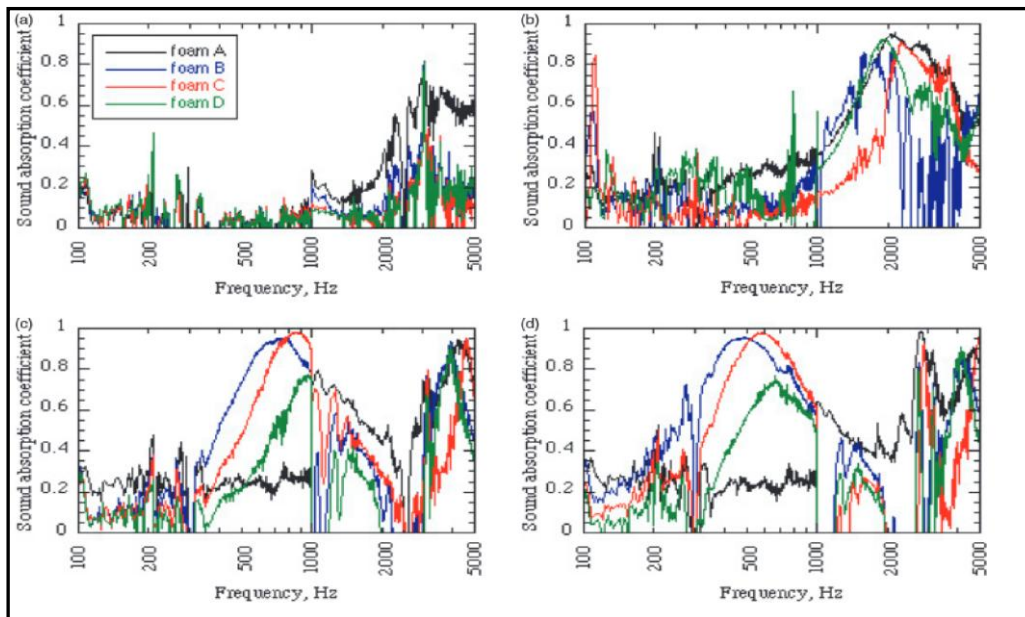
ΠΙΝΑΚΑΣ 13-1: ΑΦΡΟΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΠΟΡΩΝ ,ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΚΑΙ ΤΥΠΟΥ ΓΙΑ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΗΧΗΤΗΚΗΣ ΑΠΟΡΟΦΗΣΗΣ

Στα παρακάτω διαγράμματα που βρίσκονται στην παραπάνω δημοσίευση, μελετήθηκε ο συντελεστής απορρόφησης ήχου με ανεξάρτητη μεταβλητή την συχνότητα των κυμάτων και παραμέτρους το μέγεθος των πόρων, το πάχος των δοκιμίων, το βάθος του κενού.

Στις παρακάτω τέσσερις εικόνες, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για αφρούς ανοικτών κελιών και διάφοροι συνδυασμοί βάθους κενού (αέρας) και πάχους δοκιμίων, έχοντας τα εξής ζευγάρια που για καθένα παίρνουμε και ξεχωριστό διάγραμμα.

Αφροί ανοικτού κελιού	ΠΑΧΟΣ (mm)	ΚΕΝΟ (mm)
A , B , C , D (a)	5	0
A, B, C, D (b)	20	20
A, B, C, D (c)	20	30
A, B, C, Dv (d)	20	60

ΠΙΝΑΚΑΣ 13-2: ΠΑΧΟΣ ΑΦΡΩΝ – ΚΕΝΟ ΑΦΡΟΥ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13-4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΗΧΟΥ ΤΩΝ ΑΦΡΩΝ Α, Β, Γ, Δ

Διακριτοποιείται το πεδίο της συχνότητας κατά 100 HZ (για παράδειγμα, όσο πιο μικρή είναι η διακριτοποίηση, τόσο πιο καλά θα προσεγγιστεί η μέση τιμή) και για κάθε διακριτή τιμή της συχνότητας προκύπτει ένας συντελεστή απορρόφησης για κάθε αφρό. Έπειτα βρίσκουμε τη μέση τιμή από την σχέση $mean = \frac{[\sum_1^y (f * a)]}{\sum_1^y f}$. Από αυτή τη μεση τιμή προκύπτει ποιος αφρός έχει την μεγαλύτερη ηχοαπορρόφηση. Αν μας ενδιαφέρει η ηχοαπορρόφηση συγκεκριμένων συχνοτήτων εφαρμόζουμε την ίδια σχέση αλλά για το πεδίο ή τα πεδία που μας ενδιαφέρουν.

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η αύξηση του πάχους αυξάνει καθολικά την ηχοαπορρόφηση, ενώ καθώς αυξάνεται το κενό υπάρχουν αφροί, οι οποίοι έχουν καλύτερα αποτελέσματα όπως οι b , c με πιο μεγάλο peak αλλά είναι και πιο πεπλατυσμένο το σημείο γύρω από το peak.

14. ΥΛΙΚΑ ΑΥΞΗΜΕΝΗΣ ΑΚΑΜΨΙΑΣ – ΔΟΜΕΣ ΣΑΝΤΟΥΙΤΣ [1], [2]

14.1. Βελτιστοποίηση ως προς μάζα με καθορισμένη η ακαμψία η δύναμη

Πριν εξεταστούν οι δομές σάντουιτς, θα παρατεθούν δυο παραδείγματα που δείχνουν, το μεν ένα βελτιστοποίηση για μικρότερη μάζα με δεδομένη δυσκαμψία, το μεν άλλο βελτιστοποίηση για καθορισμένη δύναμη για μικρότερη επίσης μάζα εφαρμοζόμενα πάνω σε ορθογώνιες πλάκες.

Στην περίπτωση της καθορισμένης ακαμψίας, λαμβάνεται η αντικειμενική συνάρτηση που είναι η συνάρτηση της μεταβλητής που επιδιώκεται να είναι μέγιστη ή ελάχιστη, εν προκειμένω επιδιώκεται μικρότερη μάζα αρά :

$$m = \rho * t * b$$

Όπου t = πάχος πλακάς , b =πλάτος , ρ =πυκνότητα του υλικού
Η συνάρτηση της **δυσκαμψίας** είναι :

$$S = F * \frac{b}{\delta} = B1 * I * \frac{E}{L^3} \geq S^*$$

οπού S^* είναι η ακαμψία που θέλουμε να παραμένει σταθερή

$I = \frac{b*t^3}{12}$ είναι η δεύτερη ροπή επιφάνειας της διατομής

F η δύναμη ανά μονάδα μήκους

$B1$ μια σταθερά χαρακτηριστική της φόρτισης.

Με βάση αυτές τις σχέσεις η συνάρτηση που θα ελαχιστοποιηθεί είναι :

$$m = \left[12 * (S^*) * \frac{b^2}{B1} \right] * (L^2) * \left[\frac{\rho}{E^{\frac{1}{3}}} \right]$$

Αυτό που μεταβάλλεται είναι ο όρος $\frac{\rho}{E^{\frac{1}{3}}}$.

Στην συνάρτηση αυτή έχει αντικατασταθεί το t από την συνάρτηση μάζας.

Λαμβάνοντας ως δεδομένο το υλικό, την πυκνότητά του και το E του υλικού, ο όρος αυτός είναι ορισμένος. Για αφρούς, το μέτρο ελαστικότητας του αφρού είναι συνάρτηση της πυκνότητας του αφρού, οπότε καταλήγουμε σε μια συνάρτηση που έχει το μέτρο ελαστικότητας του μασίφ υλικού και την πυκνότητα του αφρού.

Η βέλτιστη μάζα μπορεί να βρεθεί παραγωγίζοντας ως προς ρ , έτσι προκύπτει το $\rho_{opt} \Rightarrow t_{opt}$ (από την συνάρτηση της $m = \rho * t * b$) για m_{min}

Επιλέγοντας διάφορα υλικά και κάνοντας την ίδια διαδικασία για κάθε υλικό μπορούμε να βρούμε ποιο υλικό έχει την μικρότερη μάζα για το ίδιο αποτέλεσμα δυσκαμψίας.

Στην περίπτωση που ασκείται καθορισμένη δύναμη και μέγεθος βελτιστοποίησης της μάζας προκύπτει:

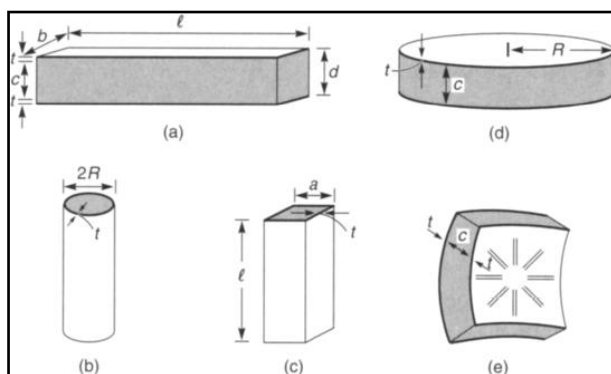
$$m = \left\{ \frac{[6*(Ff^*)*b^2]}{B2} \right\} * \left[L^{\frac{3}{2}} \right] * \left[\frac{\rho}{\sigma y^{\frac{1}{2}}} \right],$$

οπού Ff^* = η δύναμη ανά μονάδα πλάτους.

Μηδενίζοντας την παράγωγο της μάζας ως προς την πυκνότητα, βρίσκουμε την πυκνότητα για μικρότερη μάζα και έπειτα δοκιμάζουμε διαφορά υλικά που προφανώς έχουν διαφορετικά σγ.

14.2. ΔΟΜΕΣ Σ'ΑΝΤΟΥΙΤΣ

Οι δομές αυτές αποτελούνται από πυρήνα αφρού με δύο φύλλα απόφιδου υλικού .



ΕΙΚΟΝΑ 14-1: ΣΧΗΜΑΤΑ ΑΦΡΩΝ ΔΟΜΗΣ ΣΑΝΤΟΥΙΤΣ, c : ΠΑΧΟΣ ΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ , t : ΤΟ ΠΑΧΟΣ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΦΥΛΛΟΥ

Το προτέρημα αυτής της δομής είναι ότι για την ίδια ακαμψία, οδηγούμαστε σε υλικά με μικρότερη μάζα ή εναλλακτικά για σημαντικά μεγαλύτερη ακαμψία έχουμε μικρή αύξηση της μάζας.

14.2.1. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΗ ΑΚΑΜΨΙΑ

Η βασική μοντελοποίηση γίνεται με δυο βασικές σχέσεις:

1) Η σχέση της ακαμψίας:

$$\frac{\delta}{P} = \left[\frac{2 * [I^3]}{B1 * Ef * b * t * c^2} + \frac{l}{B2 * b * c * Gs * } \right]$$

2) Η σχέση του βάρους

$$W = 2 * \rho f * g * b * l * t + (\rho c *) * g * b * l * c$$

Η πρώτη σχέση δείχνει ότι η ακαμψία συντίθεται από δυο όρους:

A) Τον όρο της κάμψης

B) Τον όρο της διάτμησης

Η δεύτερη σχέση αποτελείται και αυτή από δυο όρους :

A) Τον όρο του βάρους των δυο φύλλων

B) Τον όρο του βάρους του πυρήνα

Ο στόχος μας είναι να αναπτύξουμε μια γενική μεθοδολογία που να βελτιστοποιεί ως προς ένα επιθυμητό μέγεθος, κάποιες μεταβλητές που δεν έχουν οριστεί.

Η ακαμψία πολλές φορές είναι η σταθερή μεταβλητή που επιζητείται να επιτευχθεί με έναν συνδυασμό ρc^* , t , c . Προφανώς το πρόβλημα είναι θέμα βελτιστοποίησης.

Εφ' όσον οριστεί μία από τις δυο παραμέτρους, τότε η βελτιστοποίηση συνδέεται με την ελαχιστοποίηση ή τη μεγιστοποίηση μιας άγνωστης παραμέτρου, οπότε ορίζεται η άλλη.

Αν τρεις παράμετροι είναι άγνωστοι τότε θέλουμε να κάνουμε μια διπλή βελτιστοποίηση ώστε να ελαχιστοποιηθεί ή να μεγιστοποιηθεί η επιθυμητή ιδιότητα.

Αναδιατάσσοντας τους ορούς της ακαμψίας και του βάρους ώστε να πάρουμε τους αγνώστους έχουμε :

1) Από την σχέση βάρους προκύπτει:

$$\left(\frac{t}{l}\right) = \frac{W}{2 * b * l * l * \rho f * g} + \left[\frac{\rho c^*}{2 * \rho f}\right] * \left(\frac{c}{l}\right)$$

(οπού οι ποσότητες $W, l, b, g, \rho f, \rho c^*$ είναι γνώστες)

2) Από την σχέση της ακαμψίας προκύπτει:

$$\frac{t}{l} = \left\{ 2 * B2 * \frac{Gc^*}{[B1 * Ef * \left(\frac{c}{l}\right)]} \right\} * \frac{1}{[b * B2 * (Gc^*) * \left(\frac{\delta}{P}\right) * \left(\frac{c}{l}\right) - 1]}$$

Αυτές οι δυο σχέσεις δείχνουν ότι εάν άγνωστοι είναι το c , t το βάρος W τότε αν ορίσουμε παράμετρο το W , υπάρχει ένα σημείο, στο οποίο με σταθερή την δυσκαμψία δ/P υπάρχει ένα ελάχιστο βάρος και κάποιες βέλτιστες διαστάσεις παχών t, c, t_{opt}, c_{opt} . Με αυτή την βελτιστοποίηση παίρνουμε τον συνδυασμό πάχους φύλων μέταλλου και πυρήνα αφρού που οδηγούν για συγκεκριμένη δυσκαμψία στο μικρότερο δυνατό βάρος.

Μια άλλη μοντελοποίηση καλύτερη είναι να θεωρηθεί η πυκνότητα του αφρού ως η παράμετρος που επιδιώκεται να βελτιστοποιηθεί. Έτσι αντικαθιστώντας στην συνάρτηση της ακαμψίας την έκφραση της σχετικής πυκνότητας, τότε για να έχουμε το μικρότερο βάρος για το ίδιο αποτέλεσμα της ακαμψίας θα διαφορήσουμε δυο φορές την έκφραση του βάρους ως προς c και ως προς t , ώστε να βγαίνουν και τα δυο διαφορικά μηδενικά, λαμβάνοντας δυο εξισώσεις με δυο αγνώστους t, c , των οποίων η λύση δίνει τα t_{opt}, c_{opt} . Έπειτα αντικαθιστούμε αυτές τις τιμές στην έκφραση του ρc^* βρίσκοντας το ρc^*_{opt} .

$$\frac{\partial W}{\partial c} = \frac{\partial W}{\partial t} = 0 \quad (a) \Rightarrow c_{opt}, t_{opt}$$

Η σχέση της πυκνότητας του αφρού είναι:

$$[\rho c^*] = \left(B1 * \frac{Ef}{c2} * B2 * Es \right) * \left\{ l * t * \frac{c}{[B1 * b * t * (c^2) * Ef * \left(\frac{\delta}{P}\right) - 2 * l^3]} \right\} \quad (b)$$

όπου $C_2=0,4$ περίπου

$a, b \Rightarrow \rho c^*_{opt}$

Οι σταθερές B_1, B_2 είναι σταθερές που προκύπτουν από την γεωμετρία της φόρτισης.

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας που δείχνει τους συντελεστές B_1, B_2 για διάφορες γεωμετρίες φόρτισης:

Τρόπος φόρτισης	B_1	B_2	B_3	B_4
ΚΑΜΨΗ ΤΡΕΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ –ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΔΙΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ P/I	384/5	8	8	2
ΠΑΚΤΟΜΕΝΑ ΑΚΡΑ – ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ P	192	4	8	2
ΠΑΚΤΟΜΕΝΑ ΑΚΡΑ- ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΔΙΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ P/L	384	8	12	2
ΜΟΝΟΠΑΚΤΟ ΜΕ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΑΚΡΟ-ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ P	3	1	1	1
ΜΟΝΟΠΑΚΤΟ ΜΕ ΔΙΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ P/L	8	2	2	1
ΜΟΝΟΠΑΚΤΗ ΣΤΗΡΙΞΗ ΜΕ ΦΟΡΤΙΣΗ ΡΟΠΗΣ	2	1		
ΣΤΗΡΙΞΗ ΚΥΛΙΣΗΣ-ΑΡΘΡΩΣΗΣ ΜΕ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	384/5	24		

ΠΙΝΑΚΑΣ 14-2: ΤΙΜΕΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ B_1, B_2, B_3, B_4 , ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΜΙΑΣ ΔΟΚΟΥ ΔΟΜΗΣ ΣΑΝΤΟΥΙΤΣ

Το μέγιστο βέλος της μετατόπισης δίνεται από την σχέση :

$$\delta = F * \frac{L^3}{B_1 * E * I} = M * \frac{L^2}{B_1 * E * L}$$

Κάθε γεωμετρία δομής σάντουιτς έχει και διαφορετική συνάρτηση βάρους λόγω της αλλαγής της γεωμετρίας.

Παρακάτω παραθέτουμε τα $c_{opt}, t_{opt}, \rho^*c_{opt}$ για ελάχιστο βάρος για δυο περιπτώσεις φόρτισης δυο κυκλικών πλακών και μιας ορθογώνιας διατομής για κάμψη τριών σημείων με κεντρική φόρτιση :

Περίπτωση ορθογώνιας ράβδου με κεντρική φόρτιση σε κάμψη τριών σημείων:

$$C_{opt} = \left\{ 4,3 * C2 * B2 * Es * P * \frac{\left[\left(\frac{\rho f}{\rho s} \right)^2 \right]}{b * \delta} \right\} * l$$

$$\left(\frac{t}{l} \right)_{opt} = 0,32 * \left\{ \frac{1}{B1 * (B2^2) * C2^2 * \left(\frac{\rho s}{\rho f} \right)^4} \right\} * \left\{ \frac{1}{[(Es^2) * Ef]} \right\} * \frac{P}{(b * \delta)^{\frac{1}{5}}}$$

$$(\rho c^*/\rho s)_{opt} = \frac{0,59 * \left\{ \frac{B1}{[(B2^3) * C2^3]} * \left(\frac{\rho s}{\rho f} \right) * \left[\left(\frac{Ef}{Es} \right)^3 \right] * \left[\frac{P}{b * \delta} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{5}}}{5}$$

Περίπτωση κυκλικής πλάκας με διανεμημένο φορτίο στην επιφάνειά του με περιμετρική φόρτιση στήριξης στην άλλη πλευρά:

$$(c/R)_{opt} = (1/2) * [48 * C2 * (5 + \nu f)^2] * [1 - \nu f]^2 * \{ (\rho f / \rho s)^2 * (Es * Ef^2) * (q * R/w) \}^{(1/5)}$$

$$(t/l)_{opt} = (1/16) \{ 27 * (5 + \nu f) * (1 - \nu f) / [8 * C2^2] * \left[\left(\frac{\rho s}{\rho f} \right)^4 \right] * \frac{1}{\left(Es^2 * Ef * \left(q * \frac{R}{w} \right)^3 \right)^{\frac{1}{5}}} \right\}$$

$$(Pc^*/\rho s)_{opt} = 0,5 * \left\{ \left(\frac{9}{[4 * (5 + \nu f) * (1 - \nu f) * C2^3]} \right) * \left(\frac{\rho s}{\rho f} \right) * \left[\frac{Ef}{Es^2} \right] * \left(q * \frac{R}{w} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{5}}$$

14.2.2. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Εκτός από την βελτιστοποίηση για την ακαμψία, μια άλλη παράμετρος που είναι απαραίτητο να εισαχθεί, ώστε να γνωρίζουμε αν η δομή σαντουιτς μπορεί να αντέχει τα επιβαλλόμενα φορτία είναι ο έλεγχος αστοχίας της.

Ορίζουμε:

- Το ανηγμένο ως προς το μήκος πάχος των φύλλων (για ορθογώνιες διατομές δομών σάντουιτς): $\frac{t}{l}$
- Την ανοιγμένη πυκνότητα του πυρήνα ως προς την πυκνότητα των φύλλων : $\frac{\rho c^*}{\rho s}$

Οι 5 περιπτώσεις αστοχίας του υλικού μας είναι οι εξής για την ειδική περίπτωση που συμβαίνει:

Αστοχία από διαρροή του υλικού του φύλλου :

$$P = B3 * b * c * \left(\frac{t}{l}\right) * \sigma_{ys}$$

Αστοχία από πτύχωση των φύλλων της δομής:

$$P = 0,57 * B3 * c * b * \left(\frac{t}{l}\right) * \left(Ef^{\frac{1}{3}}\right) * \left(Es^{\frac{2}{3}}\right) * \left(\rho c * \frac{1}{\rho s}\right)^{\frac{4}{3}}$$

Αστοχία διάτμησης πυρήνα:

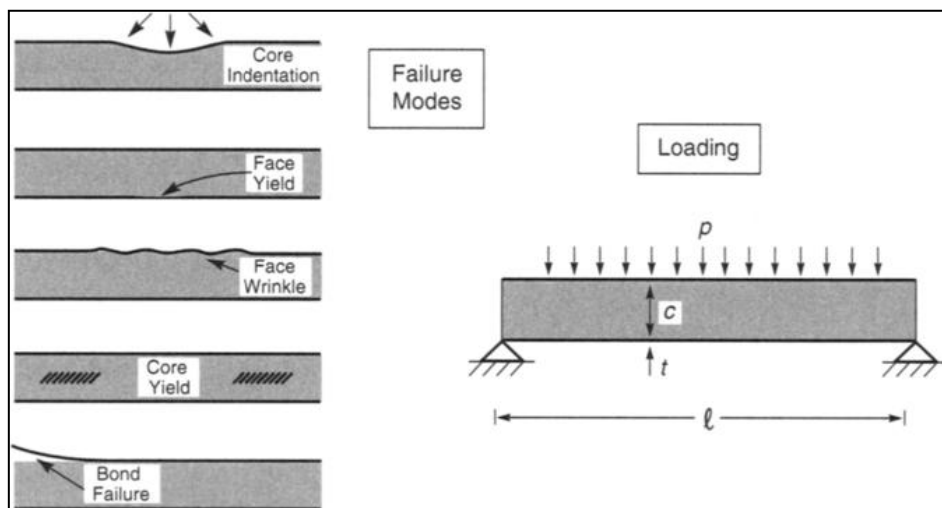
$$P = C11 * B4 * b * c * \sigma_{ys} * \left(\frac{\rho c *}{\rho s}\right)^{\frac{3}{2}}$$

Αστοχία από διαρροή (ρηγματώσεις) του πυρήνα:

$$P = C8 * B4 * b * c * \sigma_{fs} * \left[\left(\frac{\rho c *}{\rho s}\right)^{\frac{3}{2}}\right] * \left(\frac{l}{\alpha}\right)^{0,5}$$

Αστοχία από σπάσιμο της σύμφυσης φύλλων πυρήνα:

$$P = B3 * b * c * \left(\frac{t}{l}\right) * \left(Gc * \frac{Ef}{t}\right)^{0,5}$$



ΕΙΚΟΝΑ 14-2: ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΑΦΡΩΝ ΔΟΜΗΣ ΣΑΝΤΟΥΙΤΣ (ΔΙΑΡΡΟΗ ΠΥΡΗΝΑ, ΔΙΑΡΡΟΗ ΦΥΛΛΩΝ, ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΠΥΡΗΝΑ, ΠΤΥΧΩΣΗ ΦΥΛΛΩΝ, ΣΠΑΣΙΜΟ ΔΕΣΜΩΝ ΦΥΛΛΩΝ - ΠΥΡΗΝΑ)

Η αστοχία του υλικού μας στην γενικότερη περίπτωση εξαρτάται από τρεις ομάδες παραμέτρων, ως εξής:

Α) τη γεωμετρία και τη δομή του σάντουιτς :

$$\frac{t}{l} , \frac{b}{l} , \frac{[\rho * c]}{\rho s}$$

Β) τα υλικά του πυρήνα και των φύλλων καθώς και τις ιδιότητες των μασίφ υλικών τους

Pf , Ef , σyf , σys , ρs , Es

Γ) Τις συνθήκες φόρτισης

B3 , B4

Η παραπάνω 5 τρόποι αστοχίας έχουν καθορισθεί για μια περίπτωση με καθορισμένη γεωμετρία την ορθογώνια διατομή (rectangular beam)

Στην βελτιστοποίηση με δεδομένη ακαμψία, το ζητούμενο ήταν να βρούμε εκείνες τις γεωμετρικές διαστάσεις για βέλτιστο (t,c)opt μέσω των ανηγμένων τιμών τους ως προς το μήκος (t/l , c/l) (η βελτιστοποίηση αυτή μπορεί εφαρμοστεί για κάθε μήκος), ορίζοντας το γενικό σχήμα της γεωμετρίας που θέλουμε να μελετήσουμε και επιλέγοντας τα υλικά με βάση κάποια κριτήρια που επιλέγονται βάσει των καλών (ανάλογα με την εφαρμογή) ιδιοτήτων τους E, G , σy, με στόχο να επιτευχθεί το ίδιο αποτέλεσμα ως προς την ακαμψία, το μικρότερο βάρος (wmin) κτλ.

Σχηματικά η επίτευξη του μικρότερου βάρους, όπως είδαμε, για συγκεκριμένη ακαμψία είναι η επαπτόμενη της καμπύλης της ακαμψίας με την καμπύλη του βάρους .

Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης δομής για να επιτευχθεί το μικρότερο βάρος με την ίδια ακαμψία αλλά με ένα επιπλέον κριτήριο, την αστοχία της δομής σάντουιτς, σε μια από τις παραπάνω πέντε περιπτώσεις, με ορισμένο τώρα φορτίο θεωρώντας σταθερό δ/P αλλά επιπλέον σταθερή επιλεγμένη φόρτιση P , επιλέγουμε την μικρότερη μάζα που πληροί την σταθερή ακαμψία και δεν αστοχεί σε αυτό το φορτίο.

Σε κάθε ζεύγος επιλεγμένης ακαμψίας και φόρτισης παίρνουμε διαστάσεις που βελτιστοποιούν το βάρος με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του .

Εάν οριστούν επιπλέον το πλάτος, οι συνθήκες φόρτισης, και τα υλικά που θα αποτελούν τις δομές σάντουιτς, τότε είναι να αναπαρασταθεί γραφικά το βέλτιστο σημείο ως προς τον τρόπο αστοχίας από την τομή της καμπύλης της ακαμψίας με την καμπύλη της αστοχίας.

Όπως εκτέθηκε παραπάνω, υπάρχουν 5 τρόποι αστοχίας με διαφορετική καμπύλη στο διάγραμμα t/l , c/l , με συνέπεια άθε ένας από αυτούς να τέμνει σε διαφορετικό σημείο την καμπύλη σταθερής ακαμψίας ή και να μην την τέμνει καθόλου καθώς κάποιες καμπύλες για το εν λόγω φορτίο και ακαμψία βρίσκονται για διαστάσεις που είναι στα αριστερά της καμπύλης ακαμψίας.

Επίσης θεωρητικά μπορεί να τέμνουν όλες οι καμπύλες των διαφόρων τρόπων φορτίσεων –αστοχίας την καμπύλη της ακαμψίας. Εν πάση περιπτώσει, αυτό που ενδιαφέρει είναι να λάβουμε το μικρότερο βάρος της δομής σάντουιτς για την επιθυμητή ακαμψία και φόρτιση, με δεδομένα υλικά, πλάτη, μήκη και τρόπο φόρτισης και αγνώστους την σχετική πυκνότητα του πυρήνα, το πάχος των φύλλων και του πυρήνα. Εκείνη η καμπύλη φόρτισης που τέμνει την καμπύλη ακαμψίας σε σημείο που να προκύπτει το μικρότερο βάρος σε σχέση με όλες τις άλλες τομές, είναι αυτή για την οποία το επιθυμητό αποτέλεσμα επιτυγχάνεται με το μικρότερο

βάρος, η καμπύλη του οποίου διαβάζεται πάνω στην εν λόγω τομή, εφόσον η συνάρτηση του βάρους εξαρτάται από το πάχος και το φύλλο και του πυρήνα.

Έτσι με αυτό τον τρόπο προκύπτει το βέλτιστο βάρος στον επιθυμητό συνδυασμό ακαμψίας φόρτιση που όμως είναι μεγαλύτερο από το βέλτιστο βάρος που προκύπτει αν είχαμε μονό ως κριτήριο την ακαμψία(λογικό) καθώς κατά κανόνα η καμπύλη της φόρτισης δεν θα τέμνει την καμπύλη ακαμψίας κάθετα.

Εφόσον βρούμε στο διάγραμμα τα $(t/l, c/l)_{opt}$ τότε θα έχει οριστεί ακριβώς η γεωμετρία του αφρού με τις συγκεκριμένες ηδύτητες του υλικού στην συγκεκριμένη φόρτιση και ακαμψία που εμείς έχουμε ορίσει .

Στην περίπτωση που περιγράψαμε παραπάνω η πυκνότητα του αφρού ήταν δεδομένη (την είχαμε ορίσει εμείς). Μπορούμε όμως να παραλάξουμε τη βελτιστοποίηση, όπου ως άγνωστοι θεωρούνται το βάρος του αφρού, το πάχος του πυρήνα και των φύλλων .

Σε αυτή την περίπτωση είναι βολικό να επιλεχθεί η δομή να αστοχεί ταυτόχρονα σε δύο περιπτώσεις αστοχίας πχ διαρροή φύλλων και αστοχία διάτμησης πυρήνα. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι άγνωστοι κατά μία μεταβλητή, η οποία θα υπολογιστεί στο τέλος της μεθόδου που περιγράφεται.

Αρχικά υπολογίζεται από την σχέση διαρροής, το t ή το c από την σχέση διαρροής του φύλλου, έπειτα αντικαθίσταται η σχέση του πάχους t , που υπολογίστηκε παραπάνω στο κριτήριο αστοχίας λόγω διάτμησης του πυρήνα και λύνουμε ως προς ρ^*c , όπου πλέον έχουμε μια σχέση που δίνει την σχετική πυκνότητα του πυρήνα με μοναδική μεταβλητή το πάχος c του πυρήνα. Έτσι έχουμε δυο σχέσεις με μοναδική μεταβλητή στο δεύτερό τους μέλος το πάχος του πυρήνα .

Αντικαθίστανται οι σχέσεις της σχετική πυκνότητας και του πάχους των φύλλων στην σχέση του βάρους της δομής σάντουιτς και παραγωγίζεται ως προς το πάχος του πυρήνα το βάρος για να ελαχιστοποιηθεί και ως γνωστόν αυτό συμβαίνει όταν η παράγωγος αυτή είναι 0, εφόσον η μοναδική μεταβλητή μέσα στην σχέση του βάρους είναι το πάχος του πυρήνα. Με αυτόν τον τρόπο διατυπώνεται η τρίτη εξίσωση και μένει να υπολογιστούν οι τρεις άγνωστοι που εμπεριέχονται στις παραπάνω εξισώσεις.

Από την σχέση $\frac{dW}{dc} = 0$ βρίσκουμε το $(c/l)_{opt}$ και έπειτα αντικαθιστούμε αυτό το πάχος στην σχέση της αστοχίας διαρροής του φύλλου παίρνοντας το πάχος $(t/l)_{opt}$ όπως και στην σχέση της αστοχίας λόγω διάτμησης βρίσκοντας το ρ^*c .

Ο βέλτιστος συνδυασμός $(\rho^*c, t, c)_{opt}$ αντικαθίσταται στην σχέση του βάρους δίνοντας το χαμηλότερο βάρος W_{opt} για το φορτίο και την ακαμψία που επιλέχθηκαν με την επιλογή που προηγήθηκε να αστοχεί η δομή σάντουιτς λόγω διάτμησης πυρήνα και λόγω διαρροής υλικού του φύλλου.

Το ίδιο μπορεί να επιτευχθεί και για άλλα ζεύγη συνδυασμών φορτίσεων αστοχίας, αρκεί οι εξισώσεις να είναι συμβατές για ένα φορτίο (μπορεί για παράδειγμα για ένα φορτίο να μην υπάρχουν πάχη που να δίνουν τα εν λόγω ζεύγη αστοχίας).

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται για τις κύριες περιπτώσεις αστοχίας έχοντας οποιονδήποτε συνδυασμό ζευγαριών από τις αστοχίες λόγω διάτμησης πυρήνα, διαρροής υλικού φύλλων, πτύχωσης φύλλου (είναι συμβατή με κάθε συνδυασμό 2 από τις 3 περιπτώσεις).

Έτσι ακολουθείται η ίδια διαδικασία και για το συνδυασμό, όπου η δομή μας αστοχεί για ζεύγος διάτμησης πυρήνα και πτύχωσης φύλλων. Λύνουμε τη σχέση

της αστοχίας λόγω διάτμησης φύλλων ως προς t , με την σχέση αυτή να περιέχει τον όρο ρ^*c . Έπειτα λύνουμε την σχέση για αστοχία λόγω διαρροής φύλλων ως προς ρ^*c έχοντας αντικαταστήσει το t που περιέχεται σε αυτήν την σχέση και συμπύσσοντας τα ρ^*c . Αντικαθιστούμε το t και το ρ^*c που βρίσκεται στην σχέση του βάρους W και η σχέση αυτή έχει μόνο άγνωστο το c . Στη συνέχεια μηδενίζοντας την παράγωγο του βάρους ως προς c , βρίσκουμε το C_{opt} για ελάχιστο βάρος. Στην συνέχεια αντικαθιστούμε το C_{opt} στις πρώτες σχέσεις βρίσκοντας τα t_{opt} , ρ^*c_{opt} , αντικαθιστώντας τις τρεις αυτές ορισμένες τώρα μεταβλητές και βρίσκουμε το ελάχιστο βάρος για αυτόν το συνδυασμό ταυτόχρονων αστοχιών.

$$\rho^*c^* = \frac{\left[P * \rho s^2 \right]}{C11 * B4 * b * c * \sigma_{ys}} \quad \text{από διάτμηση πυρήνα}$$

$$t_{opt} = \frac{\left[l * P * \rho s^3 \right]}{\left[0,57 * B3 * b * (\rho^*c) * t * E f^{\frac{1}{3}} * E s^{\frac{2}{3}} \right]} \quad \text{από πτύχωση φύλων}$$

Στην τελευταία σχέση έχει αντικατασταθεί η σχετική πυκνότητα του αφρού του πυρήνα με το ρ^*c της πρώτης σχέσης λόγω διάτμησης πυρήνα.

$$W = \left\{ 2 * \rho f * g * P * l * \frac{l}{\left\{ 0,57 * B3 * C1^{\frac{2}{3}} * E f^{\frac{1}{3}} * E s^{\frac{2}{3}} * \left[\frac{\rho * c}{\rho s} \right]^{\frac{4}{3}} \right\}} \right\} + \left[\left(\frac{P}{B4} * C11 * \sigma_{ys} \right)^{\frac{2}{3}} \right] * \left[(b * c)^{\frac{1}{3}} \right] * l * \rho s * g$$

Για να προκύψει το βέλτιστο βάρος :

$$\frac{dw}{dc} = 0 \Rightarrow c_{opt} = \left\{ \left\{ \left[3 * \rho f * \frac{P}{\rho s * b * l * E'} \right] \left(C11 * B4 * b * l * \frac{\sigma_{ys}}{P} \right)^{\frac{14}{9}} \right\}^{\frac{9}{4}} \right\}$$

$$\text{όπου } E' = 0,57 * B3 * \left[C1^{\frac{2}{3}} \right] * \left[E f^{\frac{1}{3}} \right] * \left[E s^{\frac{2}{3}} \right]$$

Έτσι $C_{opt} \Rightarrow \rho^*c_{opt}$, $C_{opt} \Rightarrow W_{opt}$

15. ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ

[1], [2] [4] [5] [6] [7] [8] [11] [33] [32] [34] [38] [39] [40], [41], [43], [44], [45]

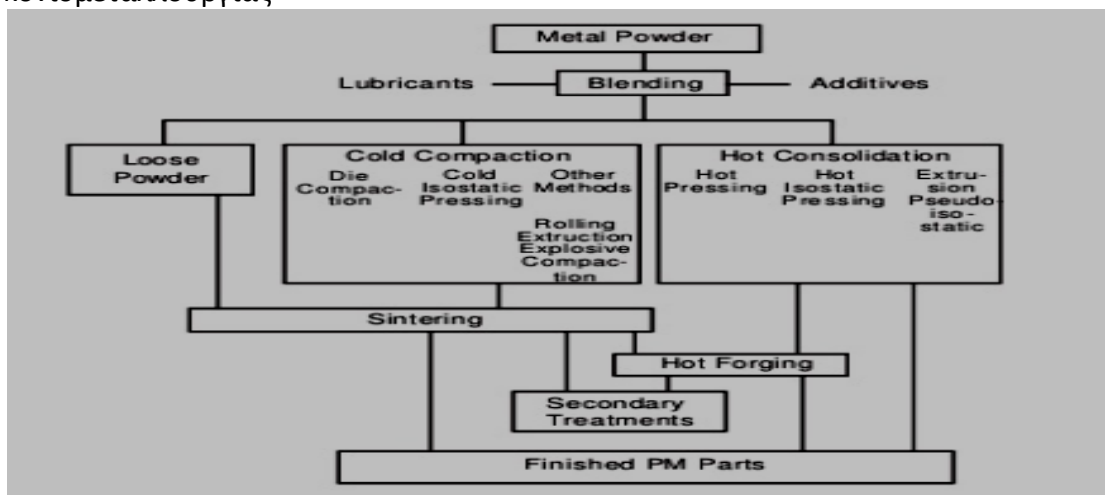
Κονιομεταλλουργία ορίζεται η διαδικασία για σχηματισμό μεταλλικών μερών μέσω θερμικά συνενωμένων μεταλλικών πουδρών, ελάχιστα πιο κάτω από το σημείο τήξης τους, ή με άλλα λόγια είναι μια διαδικασία σχηματισμού μεταλλικών ημιτελών κομματιών από κονιορτοποιημένο μέταλλο.

Τα μέταλλα ή τα κράματα που παράγονται με διαδικασίες ώστε να εξαχθούν υπό τη μορφή λεπτής πούδρας, πιέζονται ώστε να πάρουν ένα σχήμα που έχουμε αποφασίσει (μέσω συμπίεσης) και έπειτα θερμαίνοντας το συμπιεσμένο υλικό σε μια ελεγχόμενη ατμόσφαιρα για να αποκτήσει αυτό ισχυρό μεταλλικό δεσμό, ενισχύοντας την αντοχή του, βελτιώνοντας τις μηχανικές του ιδιότητες (πυροσυσσωμάτωση), παράγονται υλικά με τις επιδιωκόμενες.

Η διαδικασία της κονιομεταλλουργίας περιλαμβάνει 4 βασικά βήματα :

- Την παρασκευή της πούδρας
- Την ανάμιξη των πουδρών
- Την συνένωση
- Την πυροσυσσωμάτωση

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται η γενική διαδικασία παραγωγής κομματιών μέσω κονιομεταλλουργίας



Η συνένωση εφαρμόζεται γενικά σε συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου και η υψηλή θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης εφαρμόζεται σε ατμοσφαιρική πίεση αν και οι συνθήκες αυτές μπορούν να διαφοροποιούνται. Εφαρμόζεται προαιρετικά δευτεροβάθμια διαδικασία για να αποκτήσουν τα κομμάτια ειδικές ιδιότητες ή ενισχυμένη ακρίβεια.

Με την μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται παραγωγή τεμαχίων σε ημιτελή μορφή πολύπλοκων σχημάτων και με καλή ακρίβεια διαστάσεων.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου παραγωγής μεταλλικών μερών είναι

- Η σχέση αποτελεσματικότητας - κόστους
- Ευελιξία σχήματος και υλικού
- Ευελιξία εφαρμογών
- Ομοιομορφία κομμάτι το κομμάτι

Η κονιομεταλλουργία αναγνωρίζεται σαν πράσινη τεχνολογία.

Διάφορες σχέσεις για εκτίμηση της πράσινης πυκνότητας συναρτήσει της πίεσης συμπίεσης σε πρέσα μονής ενέργειας :

Μια διαδεδομένη σχέση που περιλαμβάνει και την προφανή πυκνότητα των κόνεων είναι η σχέση των Van Der Zwan , Siskens και έχει ως εξής :

$$\ln(D) = \ln(1 - D_0) + \ln B + Ag/P + \ln(D_0)$$

D= Η πράσινη πυκνότητα του δοκιμίου

D₀=Η προφανής πυκνότητα των κόνεων

B , Ag : σταθερές

P = Η πίεση συμπίεσης

Δυο σημεία που καταδεικνύουν δυο ζεύγη σχετικής πυκνότητας- πίεση συμπίεσης είναι ικανά να καθορίσουν τις σταθερές και σύμφωνα με την παραπάνω σχέσεις η σχετική πυκνότητα καθορίζεται πλέον μονοσήμαντα από την πίεση συμπίεσης

15.1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΦΡΩΝ ΜΕΣΩ ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ

Η κονιομεταλλουργία χρησιμοποιείται για την παράγωγη μεταλλικών αφρών, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, στις μεθόδους παραγωγής μεταλλικών αφρών.

Δύο μέθοδοι που χρησιμοποιούνται τόσο σε πειραματικό όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο είναι :

1. Η μέθοδος σχηματισμού πρόδρομου υλικού, κατά την οποία σκόνη του κράματος και σκόνη του παράγοντα αφροποίησης συνενώνονται μέσω συμπίεσης ενώ έπειτα θερμαίνεται με αποτέλεσμα την διάσπαση του παράγοντα αφροποίησης, την παραγωγή αέριου και την διαστολή του, δημιουργώντας αφρό.
2. Η μέθοδος της ανάμιξης σκόνης κράματος με ένα πληρωτικό μέσο (πχ αλάτι, ζάχαρη, baking powder). Η σκόνη μαζί με το πληρωτικό μέσο μετά την ανάμιξη τήκονται υπό κενό και στην συνέχεια μετά την απόψυξη και στερεοποίηση του κράματος, το πληρωτικό μέσο αποπλένεται ή/και αποσυντίθεται. Μια εναλλακτική παραγωγή αφρού με τη χρήση πληρωτικού μέσου είναι η ανάμιξη κόνεων μετάλλου ή μετάλλων με κόνεις αποπλενόμενου η/και θερμοδιασπώμενου πληρωτικού μέσου, στην συνέχεια συμπιέζονται και ακολουθεί διάλυση του πληρωτικού μέσου με

κατάλληλο διαλύτη. Το αποπλενόμενο μέσο μπορεί να αποσυντεθεί στην απαραίτητη διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης μετά τη διάλυση ή και να αποσυντεθεί και χωρίς να προηγηθεί διάλυση μέσω διαλύτη.

Με την πρώτη μέθοδο παράγονται συνήθως κλειστού κελιού αφροί ενώ με την δεύτερη μέθοδο ανοιχτού κελιού αφροί.

Σε κάθε περίπτωση χρειάζεται πολύ καλή ανάμιξη, οπότε χρησιμοποιούμε έναν καλό αναδευτήρα για όσο το δυνατόν καλύτερη ομογενοποίηση του κράματος – παράγοντα αφροποίησης ή του κράματος – πληρωτικού μέσου.

Με την πρώτη μέθοδο επιτυγχάνεται αφροποίηση μέσω υγροποίησης του βασικού κράματος ή αφροποίηση όταν το κράμα είναι στη στερεά του φάση, άλλα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας είναι μαλακό και λόγω της πίεσης που ασκεί το αέριο του αποσυντεθημένου παράγοντα αφροποίησης σε αυτό διαρρέει. Με την παραλλαγή της μεθόδου επιτυγχάνεται αφροποίηση από την στερεά φάση σε υψηλή θερμοκρασία, καθώς το υλικό γίνεται πολύ μαλακό και η πίεση του σχηματιζόμενου αέριου που αποσυντίθεται γίνεται όλο και μεγαλύτερη, αυξάνοντας την εσωτερική πίεση του αερίου με την άνοδο της θερμοκρασίας.

Η δομή του αφρού στην περίπτωση της συμπίεσης κονιών καθώς και η πυκνότητα του αφρού εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες.

- Μέγεθος κόκκων βασικού κράματος
- Μέγεθος κόκκων παράγοντα αφροποίησης
- Κατά βάρος ποσότητα παράγοντα αφροποίησης
- Μέθοδος δημιουργίας πρόδρομου μέσου
- είδος παράγοντα αφροποίησης
- θερμική εξέλιξη (θέρμανση ψύξη) παράγοντα αφροποίησης
- πίεση στην οποία συντελείται η αφροποίηση
- Περιβάλλον που λαμβάνει αυτή χωρά

Μια διαδεδομένη εφαρμογή κonioμεταλλουργίας είναι τα αυτολιπαινόμενα Ρουλεμάν (self-lubricated bearings) [46], [47], [48], [49]

Τα αυτολιπαινόμενα έδρανα χρησιμοποιούν πορώδη μέταλλα ή κράματα όπως το μπρούτζο ή Κράμα σίδηρου εμποτισμένα με ένα λιπαντικό έλαιο (oilite). Η κατασκευή αυτών των κραμάτων γίνεται με την τεχνική της κonioμεταλλουργίας όπου μετά την συμπίεση και την συνένωση των κόνεων το υλικό έχει ανοικτούς μακροπόρους και στην συνέχεια εμβαπτίζονται με λάδι και συγκρατούν περίπου 20% λιπαντικό μέσο κατ' όγκο.

Τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται ως αυτολιπαινόμενα μέσα κατασκευάζονται με την διαδικασία της ανάμιξης κόνεων ώστε να επετευχθή η επιθυμητή σύσταση του κράματος για να αποκτηθούν κατάλληλες ιδιότητες συμπιέζονται στην επιθυμητή πίεση ώστε να αποκτήσουν το επιθυμητό μικροπορόδες και πυροσυσσωματώνονται για να αποκτήσουν τις επιθυμητές ιδιότητες σε αντοχή κτλ. Μετά την πυροσυσσωμάτωση ακολουθεί επεξεργασία του εξαρτήματος για να

αποκτήσει τις επιθυμητές διαστάσεις και σχήμα κατά την οποία επιβάλλεται να χρησιμοποιηθούν κοφτερά και όχι λεία εξαρτήματα προκειμένου να μην καλυφτούν οι ανοικτοί πόροι.

Η αυτολίπανση και η χρήση των ποροδων υλικών ως μεσο επίτευξης αυτής είναι ένα πεδίο προς έρευνα. Το λιπαντικό μέσο μπορεί η να εμβαπτιστεί στο πορώδες υλικό η να αποτελεί συστατικό στοιχείο που υπάρχει ως σκόνη εφόσον είναι στέρεο.

Το κράμα oilite παράγεται εμπορικά σε τρεις διαφορετικές συστάσεις με τις μηχανικές ιδιότητες που αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

TYPICAL PROPERTIES* OILITE BEARING MATERIALS			
PROPERTIES	OILITE BRONZE†	SUPER OILITE	SUPER OILITE 16
Composition — Percent			
COPPER	87.2 - 90.5	18.0 - 22.0	18.0 - 22.0
IRON	1.0 MAX	BALANCE	BALANCE
LEAD	—	—	—
GRAPHITE	0 - 0.3	—	0.6 - 1.0
TIN	9.5 - 10.5	—	—
ACID INSOLUBLES (MAX.)	—	—	—
MAGNESIUM	—	—	—
TOTAL OTHER ELEMENTS (MAX.)	1.0	2.0	2.0
BALANCE	—	—	—
Physical & Mechanical Properties			
DENSITY (GM PER CU. CM.)	6.4 - 6.8	5.8 - 6.2	6.0 - 6.4
POROSITY (% OIL BY VOLUME)	19 MIN.	19 MIN.	15 MIN.
"K" STRENGTH CONSTANT	26,500	40,000	60,000
TENSILE STRENGTH (PSI)	14,000	22,000	32,000
ELONGATION (% IN ONE INCH)	1	1	0.5
YIELD STRENGTH IN COMP. (PSI)**	11,000	22,000	40,000

ΕΙΚΟΝΑ 15.1. ΣΥΣΤΑΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΕΔΡΑΝΩΝ OILITE

Ενώ τα φόρτια στατικά και δυναμικά, οι ταχύτητες, το γινόμενο φορτίου ταχύτητας σαν ανώτατα όρια για την αντοχή εδράνων κατασκευασμένων από oilite δίνονται στον παρακάτω πίνακα :

NORMAL UPPER LIMITS FOR OILITE BEARING MATERIALS				
MATERIAL	PV	P(psi) STATIC	P(psi) DYNAMIC	V (fpm)
OILITE BRONZE	50,000	8,000	2,000	1,200
SUPER OILITE	35,000	20,000	4,000	225
SO-16	75,000	50,000	8,000	35

ΕΙΚΟΝΑ15.2 ΟΡΙΑ ΧΡΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ OILITE ΓΙΑ ΕΔΑΝΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Ο καλλίτερος τρόπος για να εκτιμηθεί η αποδοχή ενός εδράνου είναι ο συντελεστής :

$$PV = 3,14 * W * \frac{N}{12 * L}$$

Όπου W= το συνολικό φορτίο του εδράνου (pounds)

L=το συνολικό μήκος του εδράνου (ίντσες)

D = εσωτερική διάμετρος εδράνου (ίντσες)

N= Ταχύτητα άξονα (rpm)

Άλλες εφαρμογές αφρων ανοικτού κελιού χαλκού (για να γίνει συσχέτιση με το πειραματικό μέρος) είναι :

Εναλλάκτες θερμότητας :



Φίλτρα αφρού χαλκού

αυτολιπαινόμενοι δακτύλιοι



Ηλεκτρόδια:



Επίσης εφαρμογές αφρών χαλκού μέσω κόνεων μπορούμε να βρούμε στην απορρόφηση ενέργειας, στην κατάλυση, στην διακόσμηση

Θα εξετάσουμε δυο μεθόδους παραγωγής αφρών από σκόνες μετάλλων :

- Παράγωγή αφρού με πληρωτικό αποπλενόμενο μέσο
- Παράγωγή αφρού από συμπιεσμένη σκόνη κραμάτων με παράγοντα αφροποίησης που αποσυντίθεται διαστέλλοντας το κράμα από την ημιστερεά κατάσταση

Σε αυτήν την εξέταση θα δούμε πως επιδρούν οι συνθήκες, η σύνθεση, το μέγεθος κόκκων βασικού μετάλλου κράματος, παράγοντα αφροποίησης, η παροχή θερμότητας και η θερμοκρασία, η ψύξη καθώς και η κατεργασία του πρόδρομου υλικού.

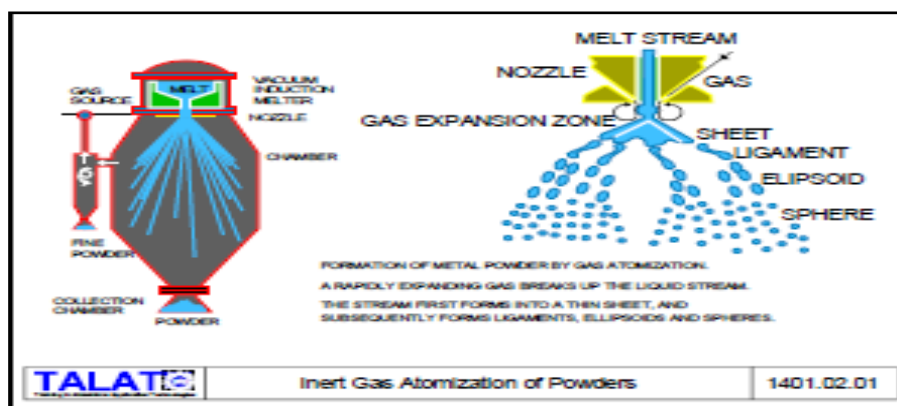
Στη δεύτερη περίπτωση πρέπει το αποπλενόμενο πληρωτικό μέσο να έχει καλή ικανότητα απομάκρυνσης με το διαλυτικό μέσο που θα χρησιμοποιηθεί.

Στην πρώτη μέθοδο παίρνουμε αφρούς κλειστών κελιών ενώ στην δεύτερη αφρούς ανοικτών κελιών όταν έχουμε ικανοποιητικό όγκο αποπλενόμενου ή/και αποσυντιθέμενου πληρωτικού μέσου.

Παρενθετικά θα αναφερθούν δυο μέθοδοι παραγωγής κόνεων μετάλλων που συναντώνται σε πολλές παραλλαγές και δεν είναι οι μοναδικές αλλά δεν θα επεκταθούμε [50], [51]:

Παράγωγή διασκορπισμού : ένα ρεύμα λιωμένου μετάλλου ή κράματος σχηματίζει σταγονίδια προσκρούοντας σε ρευστό υγρό ή αέριο (αέριος διασκορπισμός), επίσης συναντώνται ο διασκορπισμός κενού και ο φυγοκεντρικός, διαδεδομένες επίσης είναι η ηλεκτρολυτική παρασκευή κόνεων.

Στις παρακάτω εικόνες διακρίνονται **οι τεχνικές παραγωγής κόνεων αερίου, υδατικού διασκορπισμού:**



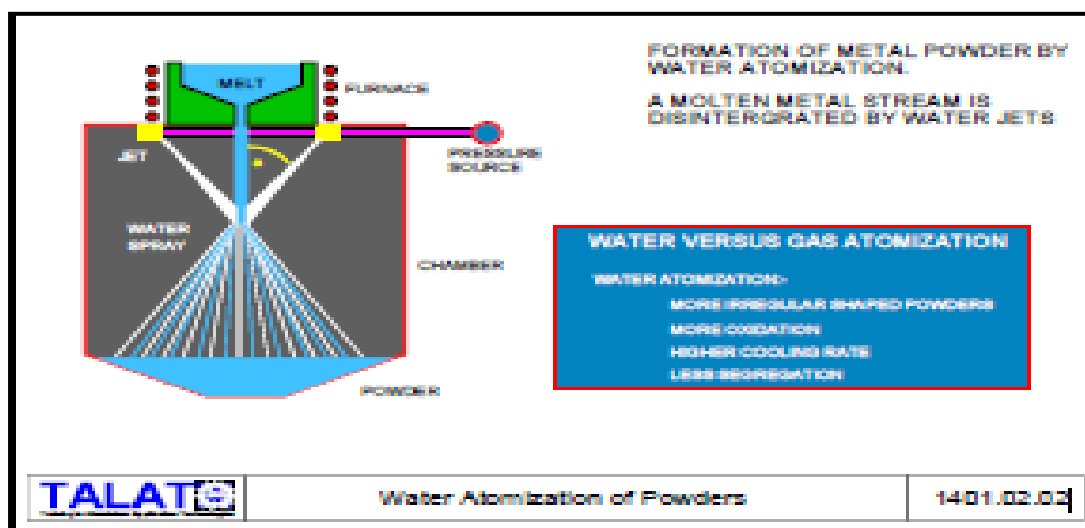
ΕΙΚΟΝΑ 15.3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΟΝΗΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΔΙΑΣΚΟΡΠΙΣΜΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Στην **μέθοδο διασκορπισμού με νερό** το μέγεθος των κόκκων έχει αντίστροφη εξάρτηση από την ταχύτητα του ρευστού και την γωνία πρόσκρουσης της δέσμης

που είναι αυτή που σχηματίζεται μεταξύ ρευστού και μετάλλου με μια σχέση της μορφής :

$$D = \frac{C}{V * SIN(\alpha)}$$

που D η διάμετρος C μια σταθερά , V η ταχύτητα και α η γωνία πρόσκρουσης.



ΕΙΚΟΝΑ 15.3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΟΗΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΔΙΑΣΚΟΡΠΙΣΜΟΥ ΝΕΡΟΥ

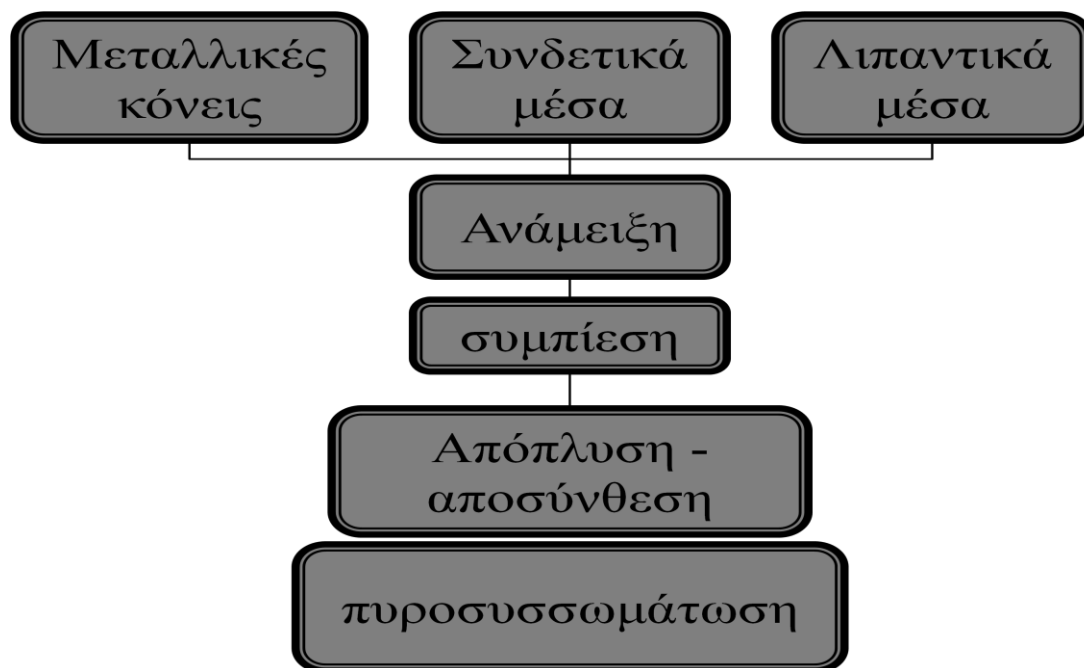
που D η διάμετρος C μια σταθερά , V η ταχύτητα και α η γωνία πρόσκρουσης. Σημαντική επίδραση στην αντοχή διαρροής , κόπωσης και διάβρωσης των κόκκων έχει η ταχύτητα ψύξης της δέσμης του μετάλλου ενώ με αυτόν τον τρόπο γίνονται διεργασίες σχηματισμού κρυσταλινών που μπορούν να διαλίσουν μεγαλύτερα ποσοστά κράματων στοιχείων μέσα τους καθώς η ταχύτερη ψύξη οδηγεί σε εκτός ισορροπίας φάσεις.

Η ταχύτερη ψύξη επίσης οδηγεί στην λείπτυνση της δεντριτικής πτύχωσης του υγρού μετάλλου που εκτοξεύεται στο ρευστό.

15.1.1. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ ΑΠΟ ΚΟΝΕΙΣ ΜΕ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΑΠΟΠΛΕΝΟΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Η μέθοδος περιλαμβάνει τα εξής στάδια :

- Παραγωγή σκόνης , επιλογή ή παραγωγή αποπλενόμενου μέσου
- Συμπύεση κόνεων αποπλενόμενου μέσου
- Απομάκρυνση αποπλενόμενου μέσου με κατάλληλο υγρό απόπλυσης και εξοπλισμό ανάδευσης του υγρού
- Στέγνωμα αφρού και Πυροσυσσωμάτωση



ΑΝΑΜΕΙΞΗ ΚΟΝΕΩΝ

Η ανάμειξη είναι μια διαδικασία ομογενοποίησης του μίγματος μετάλλου - μετάλλων , κράματος με το αποπλενόμενο μεσο

Για μείωση της τριβής μεταξύ των κόνεων χρησιμοποιείται λιπαντικό μέσο ενώ για την αντοχή του προϊόντος πριν την πυροσυσσωμάτωση προστίθενται συνδετικά μέσα (καθαρό οινόπνευμα νερό) για την αποφυγή αποκόλλησης υλικού.

Επίσης για την αποφυγή της συσσωμάτωσης κόνεων χρησιμοποιούνται μεσα αποσυσσωμάτωσης.

Οι λεπτότερες κόνεις ενός μετάλλου παρουσιάζουν μεγαλύτερο συντελεστή τριβής ενώ μεταξύ κόνεων ίδιας ισοδύναμης διαμέτρου οι κυλινδρικές κόνεις έχουν τον μικρότερο συντελεστή τριβής.

Η πυκνότητα της χαλαρής κόνης ονομάζεται προφανής ενώ η πυκνότητα του κόκκου κόνης ονομάζεται bulk

Οι λεπτές κόνεις συμπληρώνουν τα κενά των χονδρών κόκκων ενώ οι χονδρές κόνεις εμφανίζουν περισσότερα κενά

Οι λεπτές μεταλλικές κόνεις δίνουν αφρους μεγαλύτερης αντοχής συνήθως σε σχέση με το να ήταν χονδρές

Τα συνδετικά μέσα αυξάνουν την αντοχή του συμπιεσμένου κομματιού

Τα λιπαντικά ενισχύουν τα ρεολογικά χαρακτηριστικά των κόνεων και την συμπιεστότητα του μίγματος

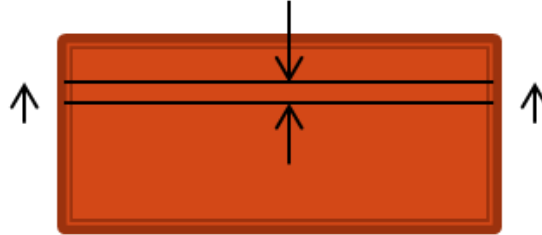
Ανομοιόμορφοι κόκκοι εμφανίζουν μεγαλύτερη επιφάνεια διαθέσιμη για ανάπτυξη μεταλλικών επαφών κατά την συμπίεση.

Πολλές κόνεις μετάλλων όπως Al , Mg , Ti , Zr , Th εξαιτίας της μεγάλης τους επιφάνειας προς όγκο είναι εκρηκτικά

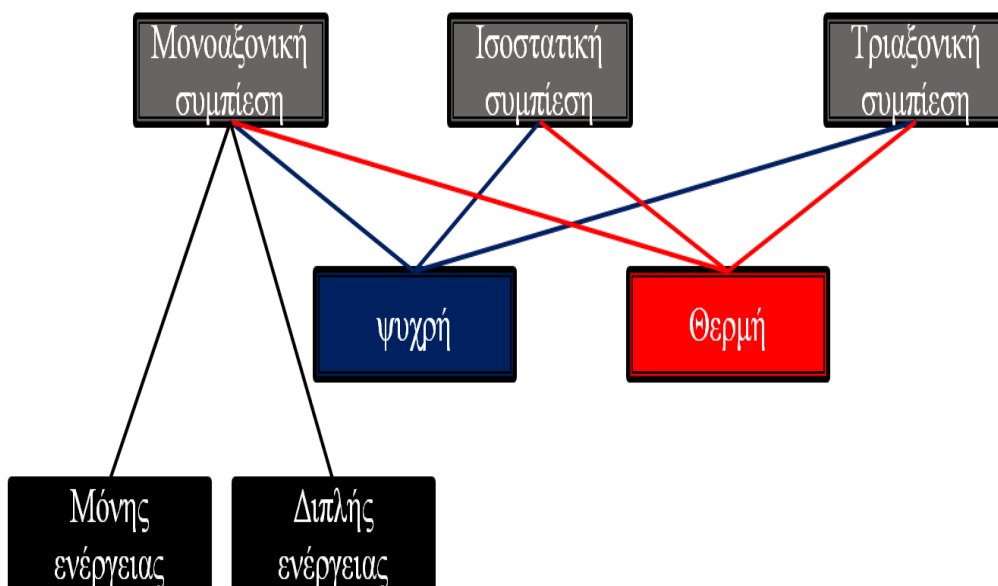
ΣΥΝΕΝΩΣΗ ΚΟΝΕΩΝ

Λογο τριβής μεταξύ των τοιχωμάτων της μήτρας και των κόνεων η διανομή της πίεσης συμπίεσης εκτιμάται ως εξής :

$$\sigma(x) = p_0 * e^{-2 * \mu' * \frac{x}{r}}$$



- Εφαρμόζεται η πίεση από το άνω εμβολο (κάτω εμβολο σταθερό)
- Η πίεση συμπίεσης που ασκείται στις κόνεις εξαρτάται από :
- A) Το ύψος του παραγόμενου τεμαχίου
 - B) την διαμετρο της μητρας
 - Γ) την τριβή μεταξύ των κόνεων
 - Δ) την τριβή μεταξύ κόνεων- τοιχωμάτων μητρας
 - E) το είδος και την ποσοτητα του λιπαντικού που περιέχεται στο μίγμα
 - Z) το είδος των κόνεων
- Στην βιομηχανία και για την σωστή παραγωγή τεμαχίων μέσω κόνεων αποφεύγεται η κατασκευή δοκιμίων μεγαλύτερων από 7 mm με την διαδικασία μονοαξονικής συμπίεσης σε πρέσα μόνης δράσης



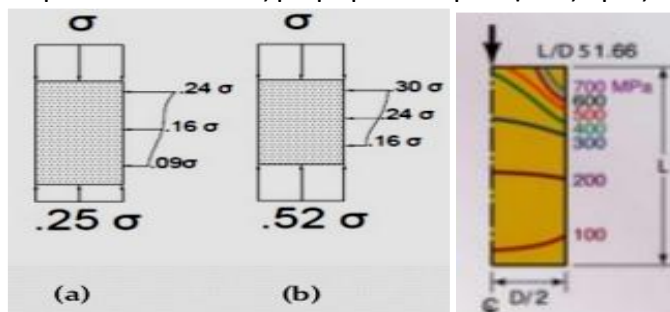
Για ίδιο ακτινικό φορτίο η τριαξονική συμπίεση δίνει μεγαλύτερης πυκνότητας και αντοχής 'πράσινα δοκίμια'

Η μονοαξονική συμπίεση δίνει για ίδια ακτινική πίεση μικρότερη αντοχή και πυκνότητα

Για την επίτευξη ίδιας 'πράσινης πυκνότητας η τριαξονική συμπίεση δίνει επίσης την μεγαλύτερη αντοχή

- Όσο η διάμετρος της μητρας και οι συντελεστές τριβής, το ύψος του δοκιμίου τόσο η καθ' ύψος μεταβολή της πίεσης συμπίεσης μειώνεται, δηλ η απόλυτη τιμή του εκθέτη $\mu \cdot \chi^2/D$ γίνεται μικρότερη
- Όμως δεν έχω μόνο μεταβολή της πίεσης συμπίεσης αλλά και μεταβολή της ακτινικής πίεσης καθ' ύψος αλλά και ακτινικά καθώς αντιτίθενται στην ακτινική πίεση η ροή των κοινών λογο τριβής μεταξύ τους.

Δεν μπορούν να συμπιεστούν κόνεις με μεγάλο λόγο ύψους προς διάμετρο



Πάνω στην πρώτη εικόνα διακρίνεται η διανομή της ακτινικής πίεσης σε μήτρα μονής ενεργείας για μονοαξονική συμπίεση α) χωρίς λιπαντικό, β) με λιπαντικό

Στο δεύτερο σχήμα διακρίνονται οι ισοϋψείς της πίεσης που ασκούνται καθ' ύψος και ακτινικά όπου εξάγεται το συμπέρασμα ότι η καθετή συμπίεση έχει διανομή ακτινικά που βαίνει μειούμενη προς το κέντρο στην μεριά του κινητού εμβόλου ενώ βαίνει αυξανόμενη στην μεριά του ακίνητου εμβόλου

ΥΔΑΤΟΔΥΑΛΥΣΗ

- Χρησιμοποιείται όταν το αποπλενόμενο πληρωτικό μεσο είναι διαλυτό στο νερό
- Στην περίπτωση της ζάχαρης έχει ισχυρή εξάρτηση από την θερμοκρασία και τον χρόνο
- Είναι φαινόμενο διάχυσης
- Η ποσότητα της διαλυόμενης ζάχαρης σε συμπιεσμένο δοκίμιο σε συγκεκριμένο χρόνο και θερμοκρασία εξαρτάται από το δίκτυο διασυνδεδεμένων όγκων ζάχαρης που περιέχονται στο δοκίμιο και θα δημιουργήσουν τους μελλοντικούς πόρους
- Απομονωμένοι και κλειστοί πόροι δυσχεραίνουν την διάλυση της ζάχαρης και οδηγούν στον εγκλωβισμό της

- Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό κατ' όγκο του αποπλενομένου μέσου τόσο πιο εύκολη είναι η υδατοδιαλυση , καθώς τόσο πιο εκτεταμένο είναι το δίκτυο που σχηματίζει η ζάχαρη
- Συμπιεσμένα δοκίμια στις ίδιες συνθήκες και με την ίδια αναλογία κόνεων εκ των οποίων το αποπλενόμενο πληρωτικά μέσο αλλάζει μόνο ως προς το μέγεθος του η υδατοδιάλυση διευκολύνεται περισσότερο στο δοκίμιο που περιέχει μικρής διαμέτρου κόκκους

ΠΥΡΟΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ

Μια βασική διάκριση των μηχανισμών που δρουν κατά την πυροσυσσωμάτωση είναι 2

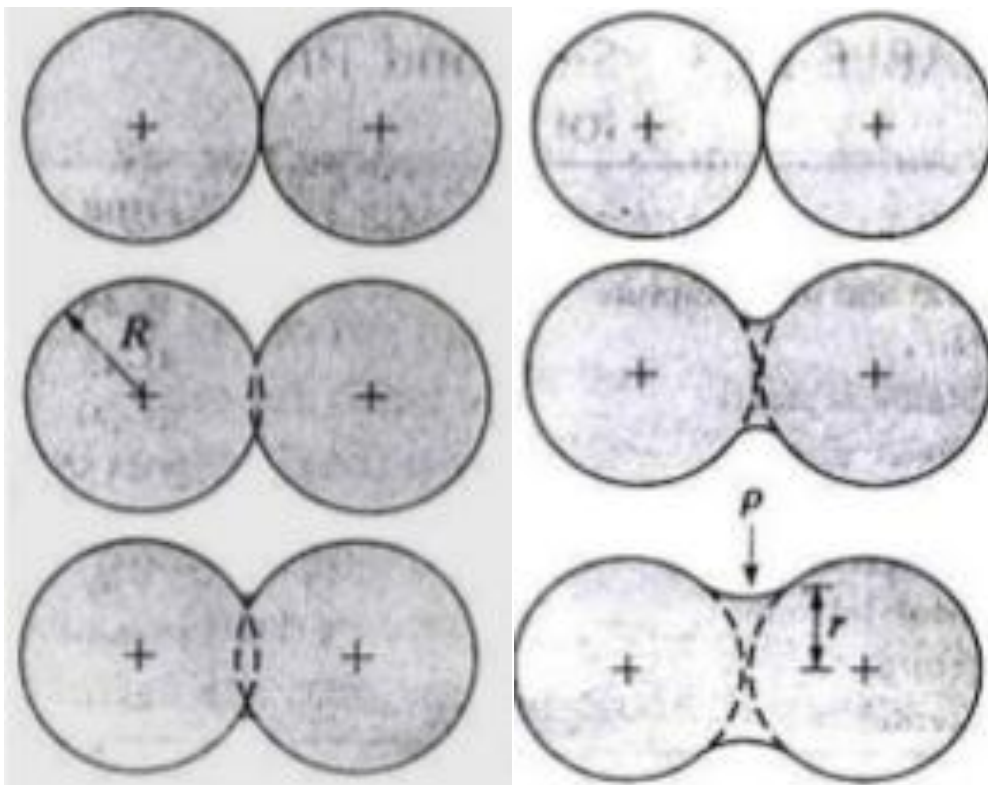
A) μεταφορά μάζας

B) ανάπτυξη κόκκων και μεταλλικών δεσμών

Η μεταφορά μάζας εντοπίζεται όταν μεταλλικά τμήματα των κόκκων εξατμίζονται και στερεοποιούνται σε σημείο επαφής με άλλο κόκκο

Μπορεί να συμβεί από υλικό που παρέχεται από την επιφάνεια του κόκκου άλλα και από τον όγκο του κόκκου

Η ανάπτυξη μέσω πλεγματικής διάχυσης γίνεται στα σημεία επαφής των κόκκων που διευρύνονται



Sintering Temperature and Time for Various Metals		
Material	Temperature (°C)	Time (min)
Copper, brass, and bronze	760-900	10-45
Iron and iron-graphite	1000-1150	8-45
Nickel	1000-1150	30-45
Stainless steels	1100-1290	30-60
Alnico alloys (for permanent magnets)	1200-1300	120-150
Ferrites	1200-1500	10-600
Tungsten carbide	1430-1500	20-30
Molybdenum	2050	120
Tungsten	2350	480
Tantalum	2400	480

Η μεθοδος αυτή παράγει ικανοποιητική ομοιομορφία μεγέθους και διανομής πόρων που είναι συνάρτηση της καλής ανάδευσης και της ομοιομορφίας των μεταλλικών κόνεων και του αποπλενομένου μέσου.

Στην διαδικασία παρασκευής αφρού με αυτή την μεθοδο οι πυκνοτητες που εμφανίζονται είναι οι εξης :

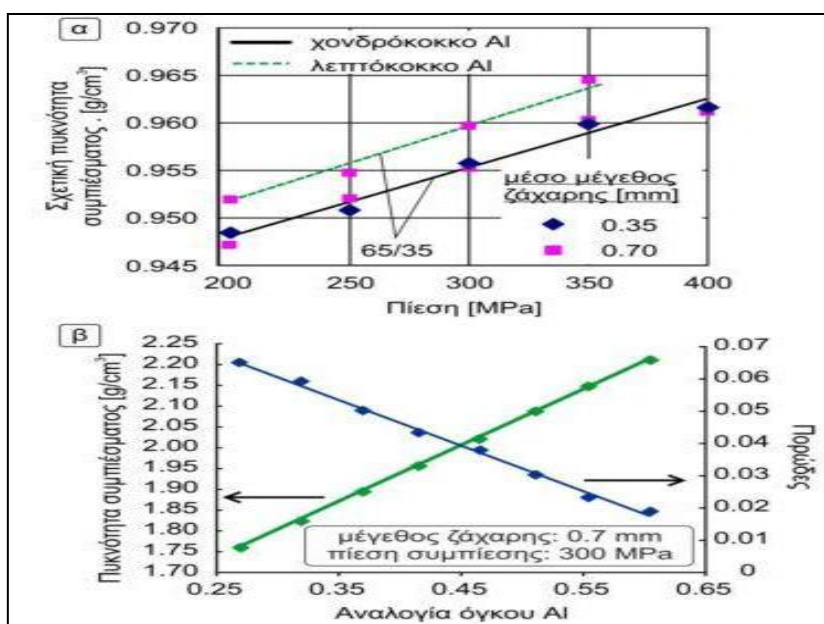
- Προφανής πυκνότητα κόνεων
- Πραγματικη πυκνότητα κόνεων (σαν να μην είχαν πόρους)
- Θεωρητική πυκνότητα πλήρους συμπίεσης (δοκιμια με μηδενικούς πόρους)
- Πραγματική πυκνότητα που προκύπτει μετά την αφαίρεση του αποπλενομένου μέσου
- Πυκνότητα του αφρού μετά την πυροσυσσώματωση

Ο λόγος της πυκνότητας που εμφανίζει τελικά ο αφρός προς την πυκνότητα του μετάλλου η του κράματος που αποτελεί το μητρικό υλικό του αφρού ονομάζεται σχετική πυκνότητα του αφρού

Το πορώδες βρίσκεται αν αφαιρέσουμε την σχετική πυκνότητα από την μονάδα ($P=1-\rho_{rel}$)

Το μέγεθος των κόκκων του μητρικού μετάλλου ή των μετάλλων διαδραματίζει σημαντικό ρολό στην διαμόρφωση της πυκνότητας συμπίεσματος και κατά συνεπεία στο πορώδες μετά την απόπλυση. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι αυτό που προκύπτει από συμπίεση καστανής ζάχαρης και αλουμινίου διαφόρων διαμέτρων κόκκων, όπου για τις λεπτόκοκκες κόνεις αλουμινίου λαμβάνουμε δοκίμια μεγαλύτερης πυκνότητας συμπίεσματος σε σχέση με τις χονδρόκοκκες.

Αυτό εξηγείται από την καλύτερη πλήρωση των κενών λόγω του μικρότερου μεγέθους των κόνεων σε σχέση με τις χονδρόκοκκες, οι οποίες εμφανίζουν δυσκολία πλήρωσης αλλά και κενά κατά την αμοιβαία απόκτηση μεταλλικών δεσμών λόγω της συμπίεσης.



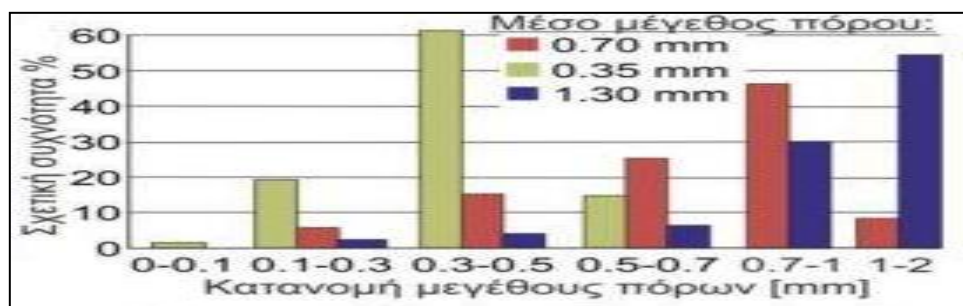
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ-15: 1, 2: ΣΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ(α) ΔΙΑΚΡΙΝΕΤΑΙ ΤΗΝ ΣΧΕΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΓΙΑ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΟ ΣΥΝΑΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΕΝΩ ΣΤΗΝ (β) Η ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΠΟΡΩΔΕΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΣΥΜΠΙΕΣΕΩΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΜΑΤΟΣ

Επίσης, επειδή το αλουμίνιο συμπιέζεται πιο πολύ σε σχέση με τις κόνειες ζάχαρης καθώς οι σκόνες αλουμινίου παραμορφώνονται πιο εύκολα, όσο μεγαλύτερη είναι η σύνθεση αλουμινίου τόσο περισσότερο πυκνό θα είναι το συμπέσμα με χαμηλότερο πορώδες για συγκεκριμένες πιέσεις.

Τρίτο συμπέρασμα: όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση, τόσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα του συμπέσματος για σταθερή αναλογία κονεων.

Τέταρτο συμπέρασμα: το μέγεθος και η μορφολογία των πόρων εξαρτώνται από την επιλογή του αποπλενόμενου υλικού και το μέγεθός του. Το μέγεθος των πόρων ελέγχεται από το μέγεθος των κόκκων της καστανής ζάχαρης με κάποια μικρή αλλοίωση λόγω της συρρίκνωσης λόγω πυροσυσσωμάτωσης.

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται το φάσμα των πόρων καθώς και τα τρία μεγέθη των πόρων ανάλογα με το μέγεθος (το φάσμα) της καστανής ζάχαρης, όπου έχουμε επιλέξει τρεις κλάσεις μεγέθους καστανής ζάχαρης διαχωρισμένης από κατάλληλα κόσκινα: $d_z=1-2$ mm , 0,5-1 και 0,125-0,5 mm με μέσες διαμέτρους 1,35 , 0,70 , 0,35



ΓΡΑΦΗΜΑ 15-1: ΣΧΕΤΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΠΟΡΩΝ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

Ένα κοινό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αποπλενόμενο μέσο (πληρωτικό υλικό) είναι το NaCl, οποιοδήποτε όμως υπόλειμμά του στο μητρικό υλικό του αφρού μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση του μητρικού υλικού, καθώς ωθεί ορισμένα βακτήρια να παράγουν κάποια οξέα που διαβρώνουν τα μέταλλα καθώς το Η των οξέων υποκαθίσταται από το μέταλλο .

Προτάσεις όπως η καστανή ζάχαρη, η άσπρη κρυσταλλική ζάχαρη, το baking powder, το K₂CO₃, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν πληρωτικά μεσα, καθώς είναι πιο ασφαλή ως προς την χημική διάβρωση των μετάλλων.

Κατά την παραγωγή του συμπιέσματος σκόνης μετάλλου – κράματος και πληρωτικού μέσου μπορούν ανάλογα με τις ιδιότητες του πληρωτικού μέσου και του μετάλλου-κράματος να ακολουθηθούν δύο διαδρομές παραγωγής αφρών :

α) απόπλυση του συμπιέσματος και έπειτα πυροσυσσωμάτωσή του

β) πυροσυσσωμάτωση η προηγείται της απόπλυσης και οδηγεί στη διάσπαση του πληρωτικού μέσου, ανάλογα με τη θερμοκρασία και το είδος του πληρωτικού μέσου ή διατηρείται ως έχει και έπειτα γίνεται η απόπλυση, με την προϋπόθεση ότι το πληρωτικό μέσο αντέχει στην υψηλή θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης.

Στην πρώτη περίπτωση κατά την διάρκεια της πυροσυσσωμάτωσης οι πόροι μπορούν να μεταβληθούν. Στην δεύτερη περίπτωση, αν κατά την διάρκεια της πυροσυσσωμάτωσης το αποπλενόμενο μέσο παραμένει στην στερεά φάση, προκύπτει πολύ μικρή μεταβολή των πόρων, ενώ αν φτάσει στην υγρή φάση, θα έχουμε μεγαλύτερες μεταβολές στο μέγεθος των αρχικών πόρων που θα δημιουργούσε ο όγκος που καταλάμβανε το μέσο απόπλυσης. Και στις δύο περιπτώσεις καθοριστικός παράγοντας είναι η θερμοκρασία που λαμβάνει χώρα η πυροσυσσωμάτωση.

Στην δημοσίευση [33] ερευνάται ο σχηματισμός αφρών ανοικτών κελιών με πληρωτικό αποπλενόμενο υλικό το K₂CO₃, όπου οι κόκκοι του έχουν οβάλ μορφή πληρωτικού μέσου με ένα εύρος μεγέθους 53-1500 nm. Οι αφροί σχηματίζονται για αναλογία όγκου κόνεων χαλκού -K₂CO₃ από 0,15/0,85 έως 0,5/0,5 με αιθανόλη σαν συνδετικό και ομογενοποιητικό μέσο στο 1% κατ' όγκο του αρχικού μίγματος. Η πίεση συμπίεσης ήταν στα 200 Μρα ενώ υπάρχουν δυο επιλογές απομάκρυνσης της αιθανόλης στους 200°C βαθμούς για μια ώρα, ή κατά την διάρκεια της πυροσυσσωμάτωσης με ρυθμό 10°C το λεπτό μέχρι την θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης.

Το σημείο τήξης του πληρωτικού μέσου είναι 891°C που καθορίζει την θερμοκρασία κατά την οποία μπορούμε να εφαρμόσουμε διάφορες οδούς της πυροσυσσωμάτωσης με στόχο να μελετηθούν οι ιδιότητες του σχηματισμένου αφρού με παραμέτρους την θερμοκρασία αυτή.

Οι δρόμοι που γίνεται η πυροσυσσωμάτωση σε αυτή την δημοσίευση είναι 3 :

A) πυροσυσσωμάτωσης στους 850 °C για 4 ώρες και απόψυξη στον αέρα . Η θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης αυτή είναι κάτω από το σημείο τήξης του πληρωτικού μέσου καθώς και κάτω από την θερμοκρασία τήξης του χαλκού. Αρά και το μητρικό μέταλλο και το πληρωτικό μέσο είναι στην στερεά φάση όπου αποπλένεται μετά την ψύξη για 5 ώρες σε υδατικό διάλυμα.

B) πυροσυσσωμάτωση στους 850 °C για 4 ώρες με την διαφορά ότι έχουμε διαδοχική πυροσυσσωμάτωση για μισή ώρα στους 950 °C οδηγώντας σε τήξη και

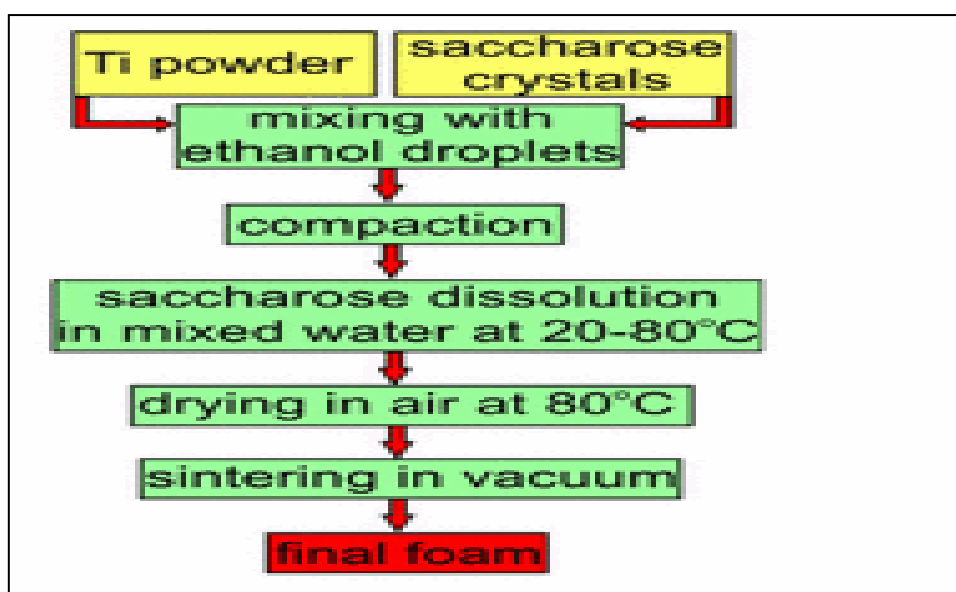
σε αποσύνθεση το πληρωτικό μέσο και ακολουθείται ψύξη του αφρού σε θερμοκρασία δωματίου.

C) πυροσυσσωμάτωση στους 950 °C τήκοντας και αποσυνθέτοντας το μέσο για δυο ώρες και έπειτα ψύξη σε θερμοκρασία δωματίου.

Τα συμπεράσματα που εξάγονται είναι ότι μόνο η μέθοδος Α οδηγεί σε βασικούς πόρους που ακολουθούν το μέγεθος και τη γεωμετρία της ανθρακικής ποτάσας με διανομή που το φάσμα τους κυμαίνεται από 53 μm έως 1500 μm. Στα δοκίμια που παράγονται με την διαδικασία C, Β έχουμε μεγαλύτερη συρρίκνωση πόρων λόγω πλήρωσης των μακροπόρων που οφείλονται στην απομάκρυνση του πληρωτικού μέσου. Οι πόροι για την περίπτωση Β και για πορώδες 75% κυμαίνονται από 425-700 μm, σημαντικά μεγαλύτεροι από την μικρότερη διάμετρο 53 μm του πληρωτικού και σημαντικά μικρότεροι από την μεγαλύτερη διάμετρό του.

Ο αποτελεσματικός έλεγχος του πορώδους γίνεται από την μια με την προσεκτική επιλογή του εύρους διαμέτρων του πληρωτικού μέσου και από την άλλη από την συρρίκνωση λόγω πυροσυσσωμάτωσης με παράμετρο τον χρόνο αλλά και από το μέγεθος της πίεσης που δημιουργεί ελαφριά επιμήκυνση των πόρων κατά την κάθετη επιφάνια σε σχέση με την διεύθυνση εφαρμογής της πίεσης συνένωσης των κόνεων. Η πλάτυνση κατά την κάθετη τομή εξηγείται από την παραμόρφωση του σχήματος της καστανής ζάχαρης που χρησιμοποιήθηκε λόγω της ασκούμενης πίεσης που συρρικνώνει την πλευρά που βρίσκεται στην διεύθυνση της θλιπτικής δύναμης και αυξάνει την διάμετρο που βρίσκεται κάθετα σε αυτήν. Το μακροπερίοδες μειώνεται σημαντικά αν η πυροσυσσωμάτωση είναι υγρής φάσης [23].

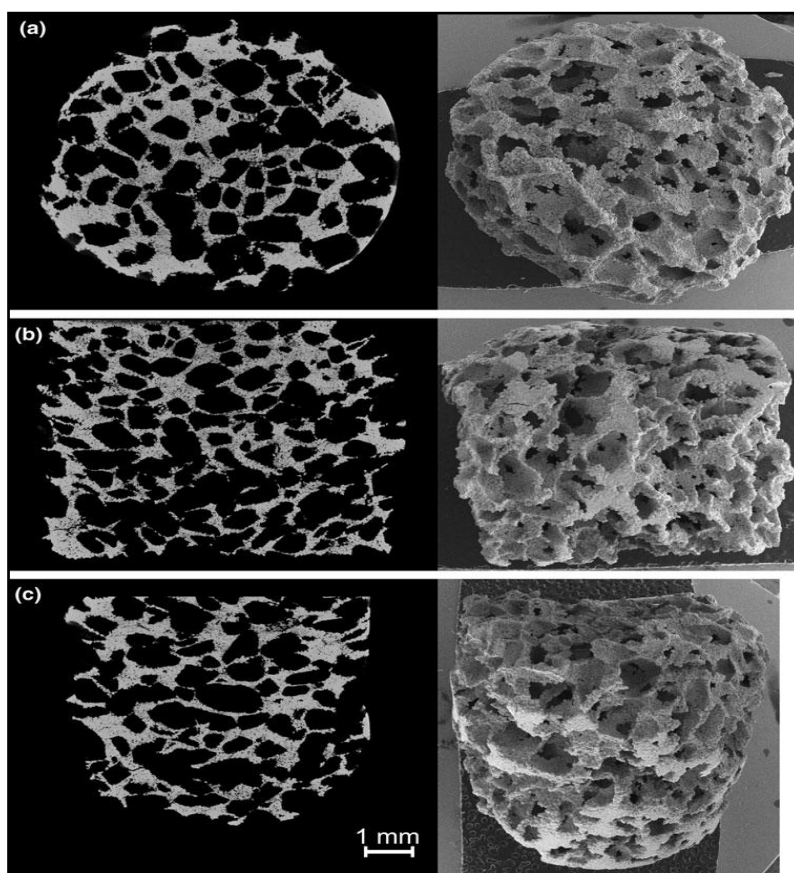
Εμφανίζεται μια επιτυχής μέθοδος σχηματισμού αφρού με πούδρες τιτανίου και πληρωτικό μέσο (space holder) σακχαρόζη με συνδετικό μέσο (binder) αιθανόλη, όπου η απόπλυση έγινε από τους 20°C μέχρι τους 80°C. Σχηματικά η διαδικασία καταγράφεται ως:



ΕΙΚΟΝΑ 15-3: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΦΡΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ ΜΕ ΑΠΟΠΛΕΝΟΜΕΝΟ ΜΕΣΟ ΖΑΧΑΡΗ

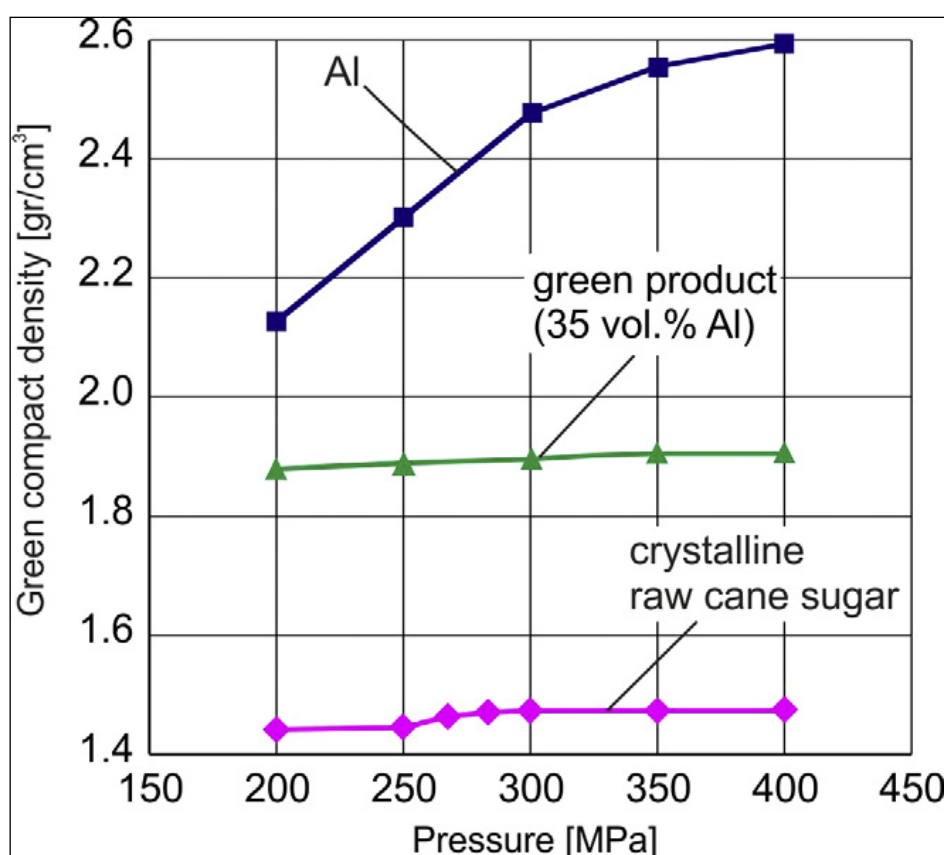
Η αναλογία ζάχαρης ήταν 1:1, το μίγμα αναδεύτηκε για 30'' σε ειδική μηχανή, η συμπίεση έγινε στα 500 Μpa και η υδατοδιάλυση διήρκεσε από 2 μέχρι 6 ώρες

(από την υψηλότερη στην χαμηλότερη θερμοκρασία) με υποστήριξη μαγνητικού αναδευτήρα. Το μέγεθος της επιτραπέζιας ζάχαρης ήταν 0,8 – 1 mm, οι κόνεις Τι είχαν μέγεθος 50mm, ενώ οι συνενωμένες κόνεις μετά την απόπλυση πυροσυσσωματώθηκαν στους 1250°C για μια ώρα από θερμοκρασία δωματίου μέχρι τους 1250°C και έπειτα κρατηθήκαν σε αυτή την θερμοκρασία για 1 ώρα. Η πυροσυσσωμάτωση έγινε κάτω από κενό 10^{-2} mbar ενώ τα δοκίμια επανήλθαν σε θερμοκρασία δωματίου μετά από μια ώρα. Τα δοκίμια μετά την συνένωση κράτησαν την συνοχή τους έχοντας κατάλληλες μηχανικές ιδιότητες ώστε να αντέξουν την υδατοδιάλυση, την μεταφορά τους στον φουρνο. Η ανερχόμενη θερμοκρασία από τους 20°C στους 80°C συντόμει την υδατοδιάλυση της ζάχαρης. Οι προκύπτοντες αφροί διαπιστώθηκε ότι είχαν 72% πορώδες. Παρατηρήθηκαν δυο ειδών πόροι, οι μεγαλύτεροι εκ των οποίων κυμαίνονταν στο εύρος 0,8 – 1 mm που δημιουργήθηκαν λόγω του πληρωτικού μέσου ενώ οι άλλοι ήταν της τάξεως των 2-50 μm μεταξύ των συμπιεσμένων κόνεων και αποτελούν το μικροπορώδες. Το μακροπορώδες που οφείλεται στην ζάχαρη αποτελείται από κλειστούς πόρους και ανοικτούς. Οι πόροι με μέγεθος 0,8-1mm είναι διασυνδεδεμένοι και συγκεκριμένα ο όγκος του υλικού και των κλειστών πόρων ήταν $91,18 \text{ mm}^3$ και $0,447 \text{ mm}^3$ αντίστοιχα ενώ ο συνολικός όγκος του αφρού είναι 320 mm^3 και το υπόλοιπο είναι πόροι ανοιχτού κελιού διασυνδεδεμένοι μεταξύ τους [40]. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε σε τομογραφία τις τρεις όψεις του δοκιμίου του αφρού τιτανίου αριστερά και δεξιά την ίδια όψη άλλα του πραγματικού δοκιμίου.



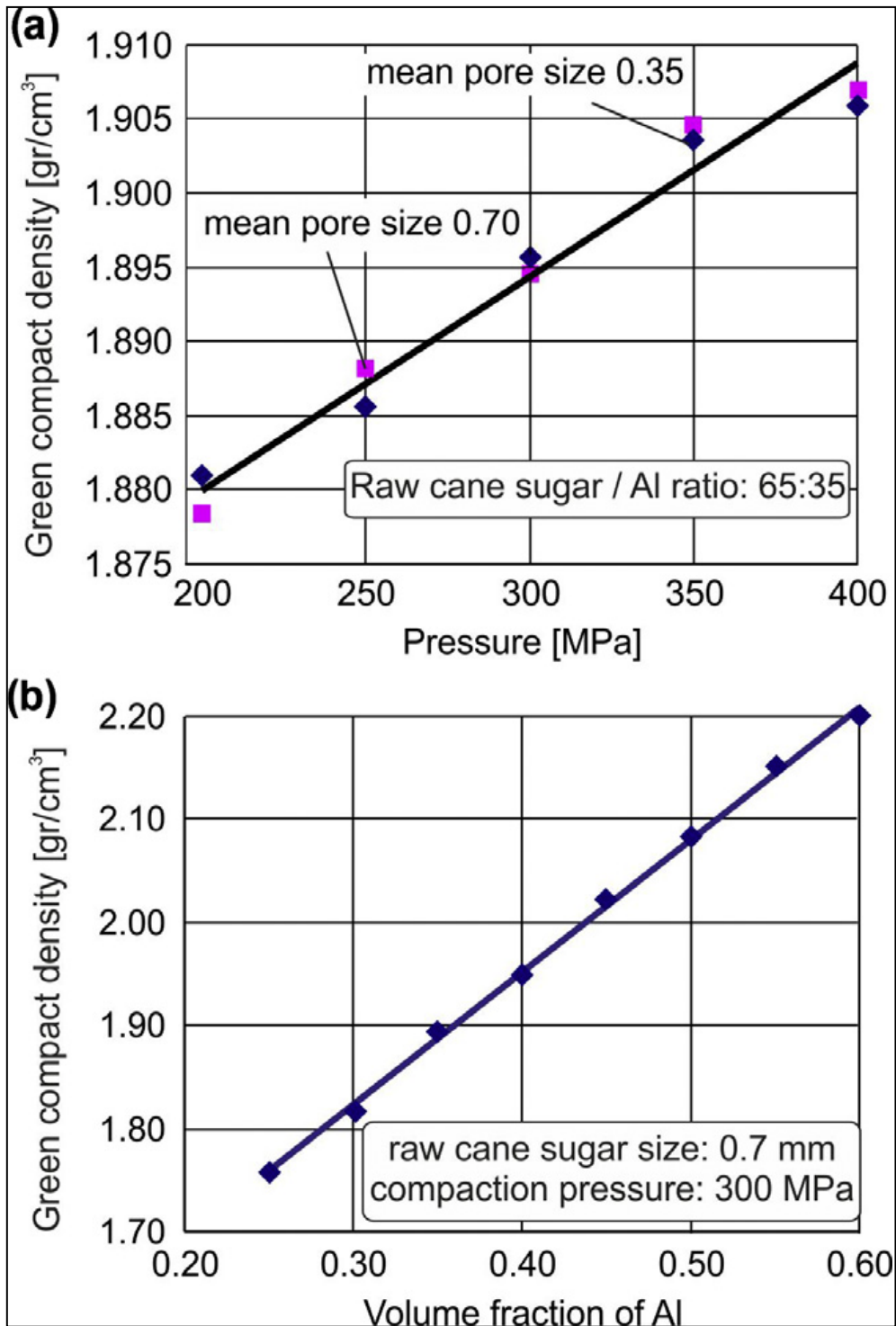
ΕΙΚΟΝΑ 15.4: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΦΡΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟΜΟΓΡΑΦΟ ΚΑΙ ΑΠΟ ΚΑΜΕΡΑ

Στην δημοσίευση [41] έχουμε σκόνη Αλουμινίου υψηλής καθαρότητας 99,8% μέσης διαμέτρου κόκκων 0,26 mm, το οποίο αναμιγνύεται φτιάχνοντας ξεχωριστά δοκίμιο με ακατέργαστη ζάχαρη 3 κλάσεων μεγέθους : 1-2, 0,5-1 , 0,125 – 0,5 mm με ονομαστικές μέσες διαμέτρους 1,35 , 0,7 , 0,35 αντίστοιχα. Μετα την συνένωση οι θερμοκρασίες πυροσυσσωμάτωσης κινηθήκαν στο εύρος 680°C – 750 °C. Χρησιμοποιήθηκε συνδετικό μέσο για την αποφυγή μεγάλων συγκεντρώσεων υλικού μη ομοιόμορφα κατανεμημένου το οποίο ήταν καθαρό οινόπνευμα σε ποσοτητα 2% κατά βάρος. Τα πρώτα πειράματα διεξήχθησαν για μεγίστη πίεση μεχρι 600 Μpa ενώ για μεγαλύτερες πιέσεις παρατηρούνται ρωγμές. Η ποσότητα του πληρωτικού μέσου κυμαίνεται στα πειράματα από 40 -70% . Για αναλογία αλουμινιου ακατέργαστης ζάχαρης 35/65 με μέσο μέγεθος ζάχαρης 0,7 mm και για διάφορες πιέσεις, δίνεται το παρακάτω διάγραμμα εξάρτησης της πράσινης πυκνότητας από την πίεση της πρέσας :



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15-4: ΠΥΚΝΟΤΗΤΕΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ – ΖΑΧΑΡΗΣ, ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Παρατηρείται ότι η πυκνότητα των συμπιεσμένων κόνεων είναι σχεδόν ανεξάρτητη της εφαρμοζόμενης πίεσης στο εύρος που μελετήθηκε. Ενώ το παρακάτω σχήμα καταδεικνύει την ελαφριά εξάρτηση που έχει η πυκνότητα αυτή από την πίεση για μέγεθος πληρωτικού μέσου 0,35 , 0,7 που είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος, ενώ μεταβάλλεται πιο έντονα με την μεταβολή της σύστασης του αφρού για μέσο μέγεθος ζάχαρης 0,7 mm .



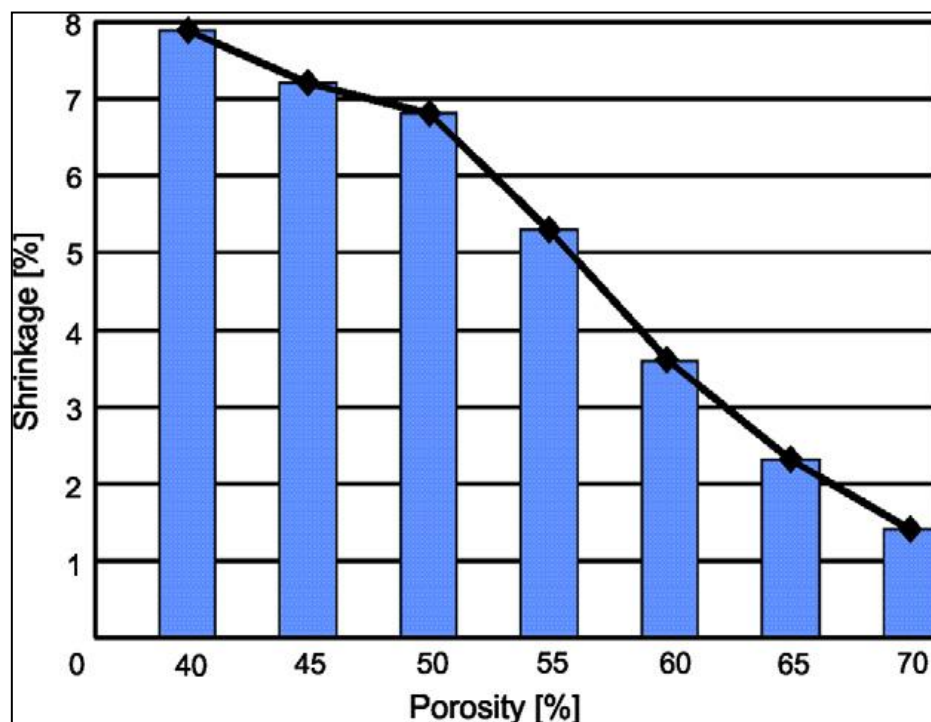
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15:5,6: ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΖΑΧΑΡΗΣ (α) ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΓΙΑ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΗ ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΚΟΝΕΩΝ, (β) ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΜΑΤΟΣ

Επίσης παρατηρήθηκε ότι όσο πιο μεγάλο κλάσμα ζάχαρης υπήρχε στο συμπέισμα, τόσο πιο μεγάλο ποσοστό ζάχαρης διαλυόταν με 100% διάλυση στις δύο ώρες για 70% ζάχαρη.

Για 60% ζάχαρη και πάνω, το πραγματικό πορώδες ήταν μεγαλύτερο από το θεωρητικό ενώ κάτω από 60% ήταν μικρότερο, εξηγούμενο από την ευκολία

συνένωσης κόκκων αλουμινίου για μικρή ποσοτητα ζάχαρης, ενώ μεγαλύτερη δυσκολία κίνησης των κόκκων για μεγάλη περιεκτικότητα σε ζάχαρη .

Τέλος η προτιμώμενη πίεση συνένωσης είναι μεταξύ 250 - 300 Μpa. Η πυροσυσσωμάτωση υγρής φάσης για τρεις ώρες οδηγεί σε μεγαλύτερη συρρίκνωση πόρων όσο μικρότερο είναι το πορώδες, ενώ είναι καλύτερη στους 680 με 750 βαθμούς κελσίου οδηγώντας σε πιο ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες (απόκτηση δυνατών μεταλλικών δεσμών), χωρίς μεγάλο χρόνο παραμονής .



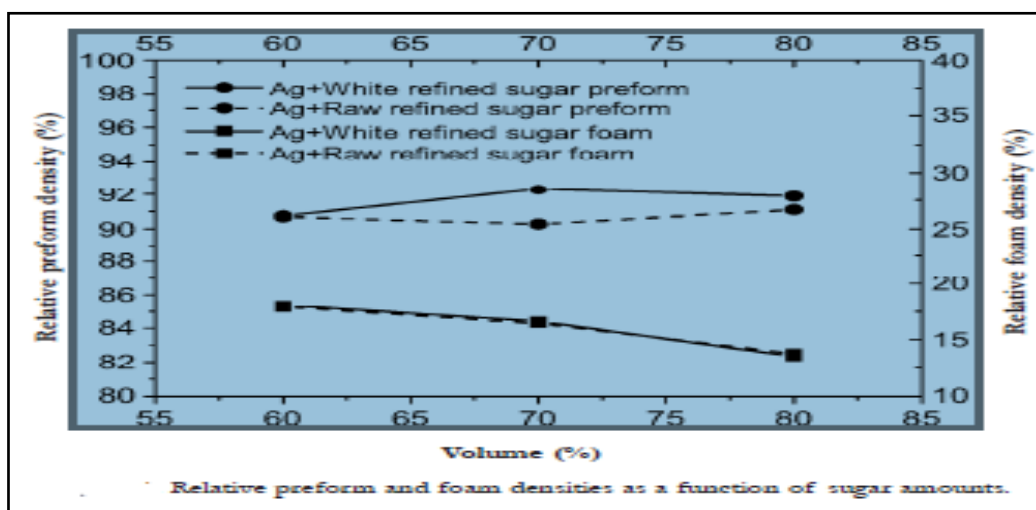
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15-7: ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΣΥΡΙΚΝΩΣΗΣ ΠΟΡΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ

Particle	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₉₀ (mm)	Mean diameter (mm)
Ag	0.09	13	56	21
White sugar	264	600	781	554
Raw sugar	-	-	-	>1000

ΠΙΝΑΚΑΣ 15-1: ΠΟΣΟΣΤΟ ΚΛΑΣΕΩΝ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΣΤΙΣ ΚΟΝΕΙΣ ΑΣΗΜΙΟΥ, ΑΣΠΡΗΣ, ΑΚΑΤΕΡΓΑΣΤΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ

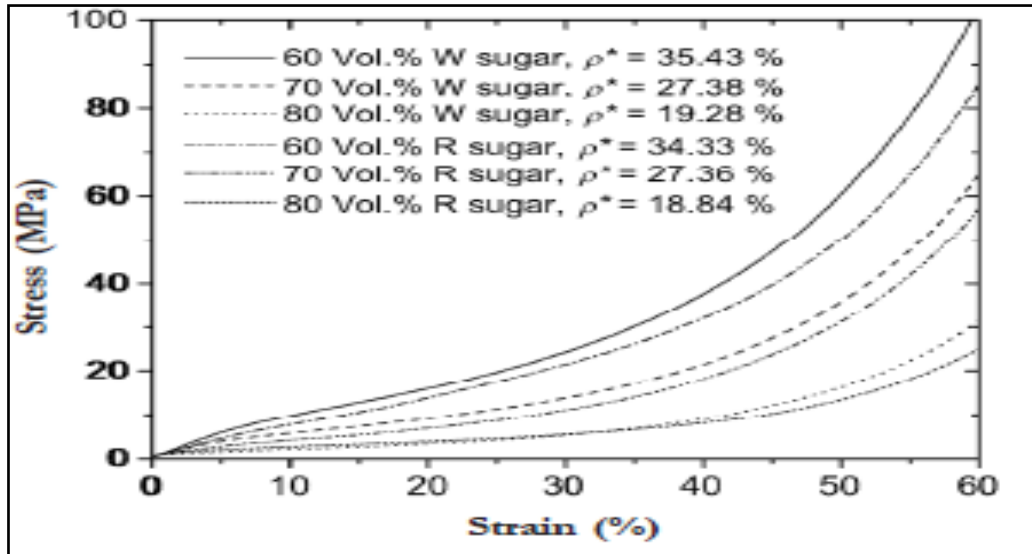
Παρατηρούμε ότι όταν η σύσταση σε ζάχαρη αυξάνει κατ' όγκο σημειώνεται μια συνεχής μείωση της πυκνότητας του αφρού με αυξανόμενο ρυθμό από 70% κ.ο και για τα συμπιέσματα σταθερή και αυξανόμενη πυκνότητα από 60% κ.ο στα 70% κ.ο για ακατέργαστη και κρυσταλλική άσπρη αντίστοιχα. Η σχετική πράσινη πυκνότητα σε σχέση με την θεωρητική αυξάνει. Ως θεωρητική σε αυτή την περίπτωση θεωρείται εκείνη η πυκνότητα σαν να υπήρχε η ίδια κατά βάρος ποσότητα ζάχαρης και ασημιού και δεν παρατηρείται καμία ύπαρξη πόρων. Αυτό εξηγείται καθαρά από το διαφορετικό πορώδες που έχει ο αρχικός όγκος ζάχαρης από την μια και από τον διαφορετικό μηχανισμό συνένωσης από την άλλη. Η μεγαλύτερη σχετική

πυκνότητα στα δοκίμια με την άσπρη ζάχαρη εξηγείται από την μεγαλύτερη πίεση που ασκείται στα τοιχώματα των κόνεων Ασημιού από την άσπρη ζάχαρη καθώς και στη μεγαλύτερη ευκολία συνένωσης κόνεων με κόνεις μικρότερου μεγέθους (κάλυψη πόρων από μικρότερου μεγέθους κόνεις). Ενώ ο μηχανισμός που εξηγεί την διαφορετική αύξηση της σχετικής πυκνότητας του συμπιέσματος σε σχέση με το θεωρητικό είναι ότι η άσπρη ζάχαρη έχει πιο μικρό πορώδες κατ' όγκο από αυτό της καστανής ενώ οι κόκκοι της άσπρης είναι πολυπληθέστεροι και επιταχύνουν το φαινόμενο της συνένωσης του ασημιού από την αρχή.



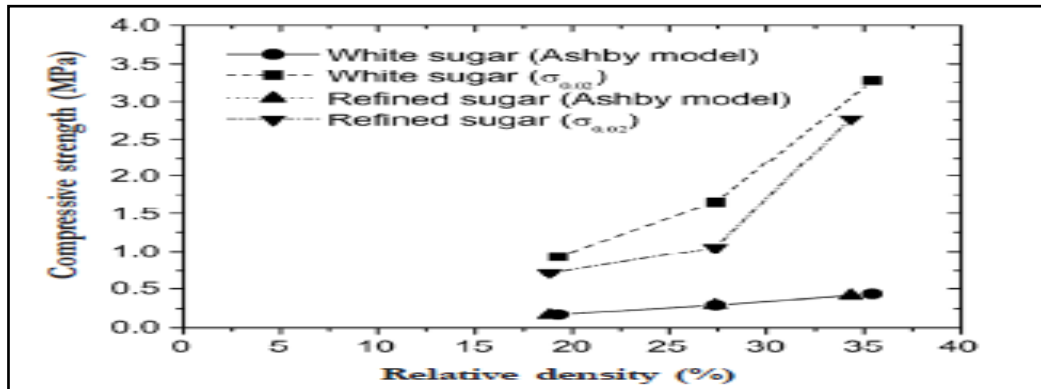
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15-8 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΣΥΜΠΙΕΣΜΑ ΚΑΙ ΓΙΑ ΑΦΡΟ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΤ' ΟΓΚΟ ΖΑΧΑΡΗΣ ΑΣΗΜΙΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ.

Στο παρακάτω σχήμα διακρίνουμε ανάλογα με την σχετική πυκνότητα του αφρού για άσπρη και ακατέργαστη ζάχαρη που έχει δημιουργηθεί στην ίδια πίεση συνένωσης αλλά για διαφορετικές συστάσεις ζάχαρης τα διαγράμματα μονοαξονικής συμπίεσης – παραμόρφωσης, όπου διακρίνουμε ότι για άσπρη ζάχαρη αναπτύσσονται σαφώς μεγαλύτερες τάσεις για ίδια παραμόρφωση, ενώ για διαφορετικό πορώδες παρατηρείται αύξηση της τάσης για μεγαλύτερη τιμή της σχετικής πυκνότητας αφρού [44].



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15-9: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ –ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΑΦΡΟΥ ΑΣΗΜΙΟΥ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΓΚΟΥ ΖΑΧΑΡΗΣ –ΕΙΔΟΥΣ- ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ

Με το θεωρητικό μοντέλο $\sigma f = C * \sigma_{ys} * \left(\frac{\rho f}{\rho s}\right)^{\frac{3}{2}}$, για $C = 0,3$, λαμβάνουμε το όριο διαρροής σ_{ys} μητρικού υλικού (Ag) από πίνακες και για τις ευρεθείσες τιμές των σχετικών πυκνοτήτων του αφρού για τα δυο είδη ζάχαρης στις αντίστοιχες συστάσεις ζάχαρης/Ag και με τις πειραματικές τιμές που πρόεκυψαν από μονοαξονική συμπίεση βρίσκεται η θεωρητική τιμή σf κατά ASHBY, ενώ παρακάτω αποτυπώνεται το συγκριτικό διάγραμμα τάσης διαρροής πειραματικής (MPa), μοντέλου ASHBY, σχετικής πυκνότητας (%) για άσπρη και ακατέργαστη ζάχαρη:



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15-10: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ASHBY

Η γενική θεώρηση κατά ASHBY – GIBSON για το μέτρο ελαστικότητας και την τάση διαρροής του αφρού είναι [43], [1], [2]:

$$\frac{Ef}{Es} = C1 * \left(\frac{\rho f}{\rho s}\right)^{n1}$$

$$\frac{\sigma_{yf}}{\sigma_{ys}} = C2 * \left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)^{n2}$$

όπου για μεταλλικούς αφρούς το C1 κυμαίνεται 0,1 μέχρι 4 ενώ το C2 από 0,1 μέχρι 1

Τα n1 , n2 εκτιμώνται 2 και 1,5 αντίστοιχα για αφρούς ανοικτού κελιού

Ένα πρακτικό πρόβλημα που συναντάμε είναι ο υπολογισμός της υπολειπομένης ζάχαρης μέσα στο δοκίμιο μετά την υδατοδιάλυση ή την πυροσυσσωμάτωση

Εάν θέσουμε:

Wp = το βάρος του συμπιέσματος πριν την υδατοδιαλυση

Wf = το βάρος του αφρού αλουμινίου

Fal = το κλάσμα του βάρους του αλουμινίου στο συνολικό προσυμπιεσμένο μείγμα

Τότε η παρακάτω σχέση δείχνει το κλάσμα της υπολειπόμενης ζάχαρης ως προς την συνολική :

$$\Phi = \frac{Wf - Wp * Fal}{[Wp * (1 - Fal)]}$$

Ενώ η θεωρητική σχετική πυκνότητα του αφρού είναι :

$\rho = Fal * \rho_{NaCl} * \left[\frac{1}{[Fal * \rho_{NaCl} + (1 - Fal) * \rho_{Al}]}\right]$ μετά την υδατοδιαλυση, ενώ η πραγματική θα εμπεριέχει το υπολειπόμενο πληρωτικό μέσο. [42]

ΠΙΕΣΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ [50] , [51]

Κατά την διάρκεια μίξης κόνεων είναι σημαντικό να ειπωθεί ότι οι τραχείες κόνεις είναι δυσκολότερο να πυροσυσσωματωθούν από ότι οι λείες και οι λεπτές. Οι λεπτές σχόνες συμπιέζονται και πυροσυσσωματώνονται πιο ευκολα. Ενώ για την καλύτερη εξαγωγή του συμπιέσματος από την πρέσα προσθέτουμε στις κόνεις λιπαντικό

(η και εξωτερικά στην μήτρα και στο έμβολο για να μειωθεί ο συντελεστής τριβών μ) πολλές φορές προστίθεται και ένα συνδετικό μέσο για να ενισχυθεί η αντοχή και η διανομή διαφορετικών κόνεων του μίγματος.

Η ομαλή και ομοιόμορφη πυκνοποίηση του μίγματος κόνεων στην πρέσα είναι συνάρτηση της τριβής στα τοιχώματα της μήτρας , στο έμβολο. Η διανομή της πίεσης συμπίεσης λόγω αυτής της τριβής δεν είναι ομοιόμορφη σε όλο εύρος των κόνεων και οδηγεί σε μη ομοιόμορφη δύναμη συμπίεση σε όλο το μήκος του άξονα συμπίεσης. Ο άξονας συμπίεσης είναι αυτός που ασκείται το φορτίο της πρέσας.

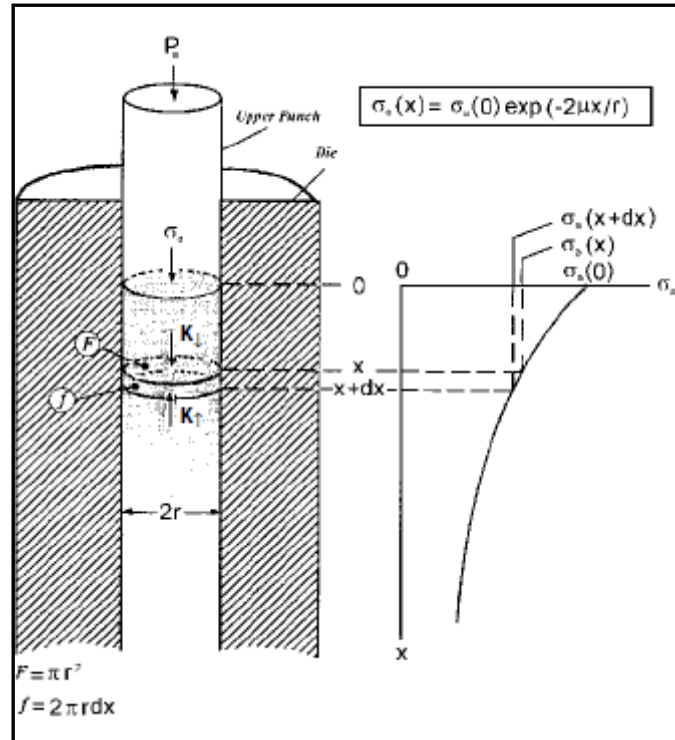
Στην αναλυτική σχέση που θα περιγραφεί παρακάτω η διανομή της πίεσης συμπίεσης- δύναμης η αρχή των αξόνων τοποθετείται εκεί που το έμβολο ακουμπά στις κόνεις.

Τα μεγέθη που θα ληφθούν υπόψη για την παρακάτω μοντελοποίηση είναι :

Η διάμετρος της μήτρας : D

Το φορτίο συμπίεσης και η τάση συμπίεσης αντίστοιχα : F0 , σα(0)

Ο συντελεστής τριβής των παράπλευρων τοιχώματων της μήτρας : μ



ΕΙΚΟΝΑ 15.11: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΠΙΕΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΣΕ ΜΗΤΡΑ ΚΥΚΛΙΚΗ

Χωρίσουμε τον όγκο των κόνεων που καταλαμβάνουν την μήτρα σε στοιχειώδεις δίσκους όπου σε κάθε λωρίδα αναγράφουμε τις δυνάμεις (πιέσεις) που ασκούνται σε αυτές.

Η δύναμη που ασκείται στο πάνω μέρος του στοιχειώδους δίσκου την συμβολίζουμε :

$$F\pi = \pi * (r^2) * \sigma\alpha(x)$$

Η δύναμη που ασκείται στο κάτω μέρος του στοιχειώδους κυλίνδρου :

$$F\kappa = \pi * (r^2) * \sigma\alpha(x + dx)$$

Η δύναμη τριβής που ασκείται στην κάθετη επιφάνεια (του δίσκου)είναι:

$$F\mu = \mu * \pi * (r^2) * dx * \sigma\alpha(x)$$

Με αυτές τις δυνάμεις να ασκούνται στην διεύθυνση του δοκιμίου x παίρνω :

$$F\pi - F\kappa = F\mu$$

Μετά από αντικατάσταση των δυνάμεων αυτών έχω :

$$d\sigma\alpha(x) = \sigma\alpha(x + dx) - \sigma\alpha(x) = -2 * \mu * \sigma r(x) * \frac{dx}{r}$$

$\sigma r(x) = k * \sigma\alpha(x)$ θεωρώντας την ακτινική τάση ανάλογη της αξονικής.

Έτσι:

$$d\sigma\alpha(x) = -2 * \mu * k * \mu * \sigma r(x) * \frac{dx}{r}$$

$$\frac{d\sigma\alpha(x)}{\sigma\alpha(x)} = \frac{[-2 * (\mu') * dx]}{r} \text{ όπου } \mu' = \mu * k$$

ολοκληρώνοντας παίρνω :

$$\left[\int \frac{d\sigma\alpha(x)}{\sigma\alpha(x)} \right] = \left[\int \frac{[-2 * (\mu') * dx]}{r} \right]$$

$$\ln(\sigma\alpha(x)) = \left[-2 * \mu * \frac{x}{r} \right] + C \quad \text{για } x=0 \text{ έχω :}$$

$$\ln(\sigma\alpha(x)) = C = \ln(\sigma\alpha(0)) = \ln(p_0)$$

$$\ln(\sigma(x)) - \ln(p_0) = -2 * \mu * x/r \Rightarrow \frac{\sigma(x)}{p_0} = e^{-2*\mu*\frac{x}{r}}$$

$$\sigma(x) = p_0 * e^{-2*\mu*\frac{x}{r}}$$

Παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερο μεγαλώνει ο συντελεστής τριβής η πίεση συμπίεσης μικραίνει για ίδια απόσταση από την κεφαλή του εμβόλου.

Όσο μεγαλώνει η απόσταση από την κεφαλή του εμβόλου τόσο μικραίνει η τάση συμπίεσης.

Έτσι στο κάτω μέρος του δοκιμίου θα έχουμε μικρότερη ποιότητα συνένωσης.

Στην ιδανική περίπτωση όπου η τριβή του συνενώματος με την πλευρική επιφάνεια της μήτρας είναι μηδενική τότε $\sigma(x) = p_0$ παντού.

Σε εφαρμογές κονιομεταλλουργίας και μήτρα απλής ενεργείας μονοαξονικής καταπόνησης το μέγιστο ύψος δοκιμίου που μπορεί επιτυχώς να παραχθεί είναι 7 mm

Όσο πιο μεγάλη είναι η διάμετρος της μήτρας και όσο πιο μικρός είναι ο συντελεστής τριβής τόσο πιο ομοιογενής είναι η διανομή της πίεσης καθώς οι μεταβολές της πίεσης είναι σημαντικά μικρότερες

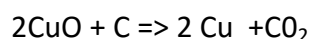
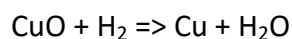
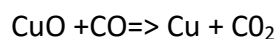
Οξειδωση [38] ,[39] , [Wikipedia]

Σημαντικός παράγοντας για την επιτυχή παρασκευή του αφρού με αυτή την μεθοδο είναι η οξειδωση του μετάλλου του αφρού ή του κράματος του αφρού και έχει εξάρτηση από το ίδιο το μέταλλο ή κράμα, τον χρόνο πυροσυσσωμάτωσης και την θερμοκρασία αυτής. Έχει δε βρεθεί ότι υπάρχει παραβολική σχέση μεταξύ θερμοκρασίας πυροσυσσωμάτωσης και βάθους στρώματος οξειδίων που ανάλογα με τον αριθμό οξειδωσης του υλικού μπορεί να είναι περισσότερα από 1, εφόσον το υλικό οξειδώνεται στον αέρα. Αν και το ιδανικό είναι να υπάρχει κατά το δυνατόν απόλυτη προστατευτική ατμόσφαιρα από κάποιο αδρανές αέριο αν αυτό (πειραματικά) δεν είναι άθικτο, τότε πρέπει να έχουμε μια εικόνα για το πάχος των σχηματιζόμενων οξειδίων.

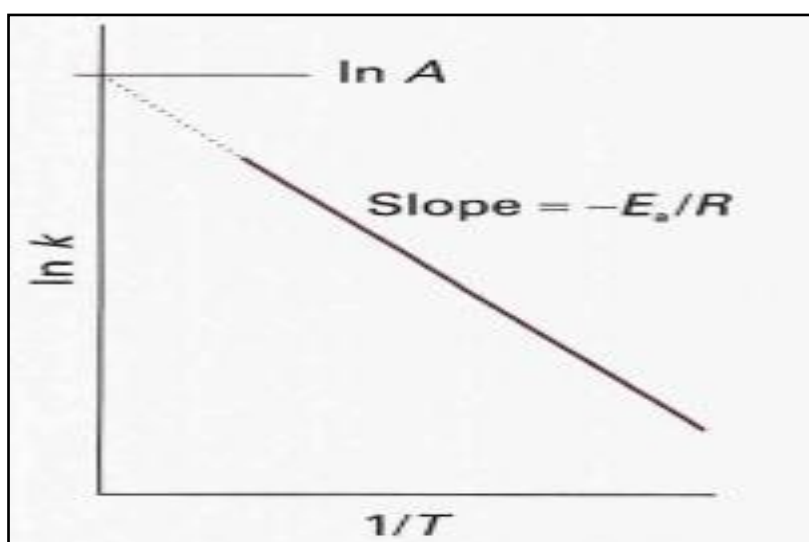
Όσον αφορά το χαλκό που θα μας απασχολήσει στο πειραματικό μέρος

Η οξειδωση των δοκιμίων ανάλογα με την θερμοκρασία ακολουθεί τον παραβολικό νόμο κατά Arrhenius, επιβεβαιώνεται από τα πειραματικά δεδομένα και χωρίζεται σε 3 στάδια με διακριτές αλλαγές κλίσης της καμπύλης αντίστροφης θερμοκρασίας - συντελεστή ρυθμού οξειδωσης K, όπου ο συντελεστής αυτός συνίσταται σε οξειδωση λόγω διάχυσης χαλκού στο οξείδιο και μέσω ανάπτυξης των κόκκων οξειδίου. Τα οξείδια που σχηματίζονται είναι το Cu₂O και το CuO, τα μονά σταθερά

οξειδία του χαλκού που μπορούν να υπάρξουν. Το CuO (cuprous oxide), το οποίο σχηματίζεται σε θερμοκρασίες από 300 μέχρι 800 βαθμούς Κελσίου, έχει χρώμα μαύρο ενώ το Cu₂O έχει σκούρο κόκκινο χρώμα (σκούρο μοβ με περισσότερο κόκκινο). Οι αναγωγικές αντιδράσεις που μπορούν να συμβούν στο Κυπρικό Οξείδιο είναι με το CO, το CO₂ και το H₂, ως εξής:



Αυτό σημαίνει ότι τα CO, το CO₂ και H₂ έχουν ευεργετική επίδραση στην αποτροπή της οξείδωσης του χαλκού καθώς μπορούν να αναστρέψουν την οξείδωσή του. Ο νόμος Arrhenius έχει ως εξής :



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15-11: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΧΕΣΗΣ ARENIUS

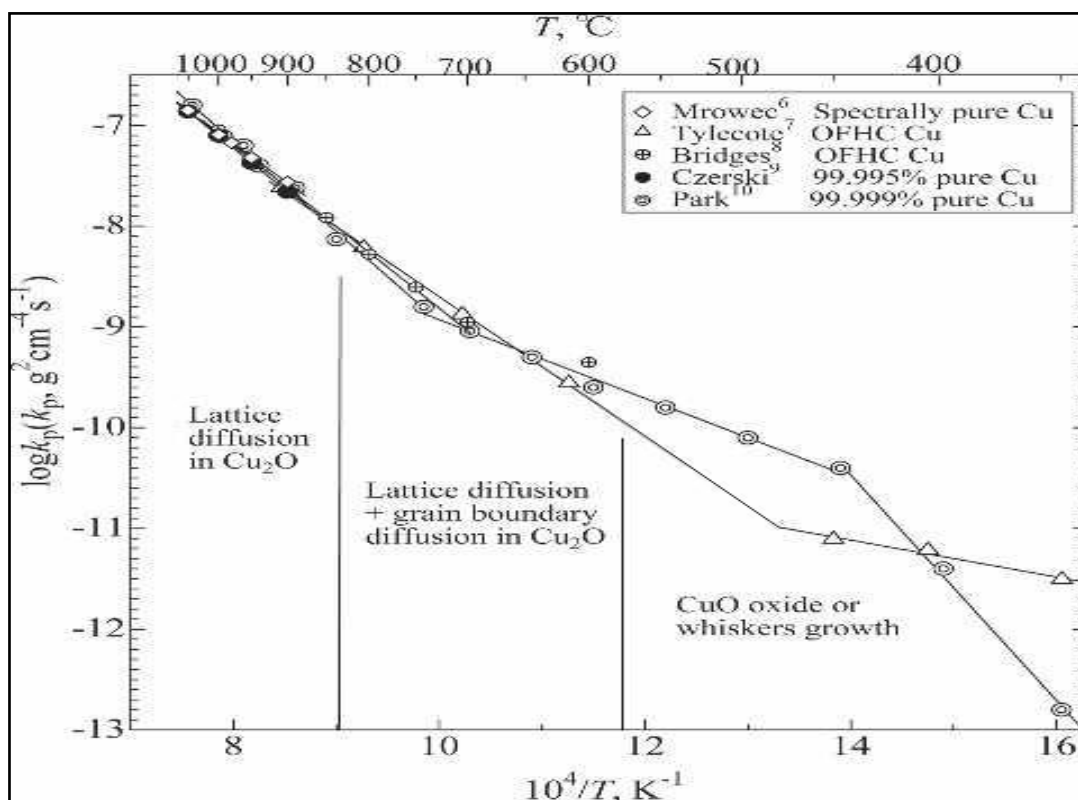
$$\ln K = \ln A - \frac{E_a}{RT}$$

Όταν η ενέργεια ενεργοποίησης E_a είναι μηδενική, τότε η ταχύτητα αντίδρασης είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας, ενώ όταν η ενέργεια αυτή είναι θετική, όσο μεγαλύτερη είναι η εξάρτηση από την θερμοκρασία γίνεται μεγαλύτερη. Η οξείδωση του χαλκού παρουσιάζει ισχυρή εξάρτηση από την θερμοκρασία, ενώ σε μια άλλη μορφή, η ταχύτητα οξείδωσης ακολουθεί τη μορφή: $k = A * e^{\left[-\frac{E_a}{RT}\right]}$.

Έτσι η ταχύτητα οξείδωσης μειώνεται εκθετικά και κάποια στιγμή, όταν η θερμοκρασία γίνει αρκούντως μικρή, η ταχύτητα της αντίδρασης οξείδωσης σχεδόν μηδενίζεται.

Πρακτικά, στον χαλκό η οξείδωση αρχίζει να γίνεται υπολογίσιμη στους 300°C όπως θα δούμε και στο πειραματικό μέρος με δοκίμιο χαλκού από συμπιεσμένη κόνη.

Τα οξείδια αυτά είναι αρκετά ψαθυρά, σκληρά και εύθραυστα. Κατά συνέπεια η ύπαρξή τους ψαθυροποιεί τον χαλκό ενώ σαν θετική τους συνεισφορά στους σωλήνες είναι ότι λειτουργεί σαν προστατευτικό στρώμα που όμως, όταν απομακρυνθεί, διαβρώνει τον σωλήνα καθώς η οξείδωση και η αφαίρεση του οξειδίου που παρασύρεται από την ροή συνεχίζει την διάβρωση του σωλήνα.

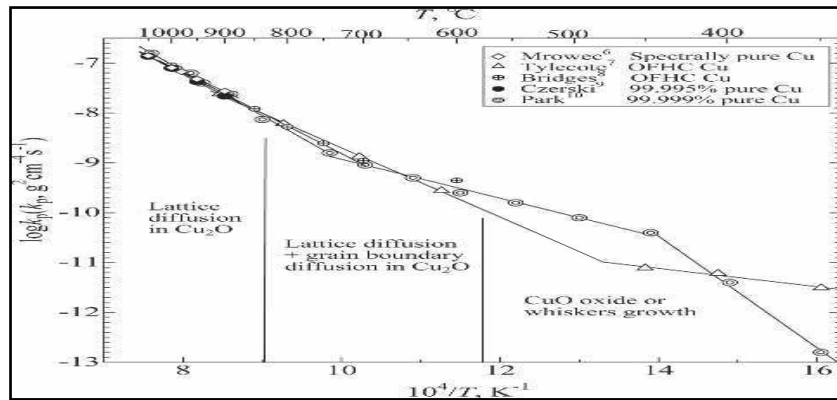


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15-12: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΣΥΣΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑΣ ΧΑΛΚΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Στο παραπάνω σχήμα [38] δίνονται οι σταθερές K για τα δύο στρώματα που συνυπάρχουν στον χαλκό, όπου βλέπουμε ότι σε υψηλές θερμοκρασίες κυριαρχεί η πλεγματική διάχυση στο χαλκοξείδιο (I) ενώ σε χαμηλές θερμοκρασίες κυριαρχεί η ανάπτυξη χαλκοξειδίου (I) με χαμηλό ρυθμό όμως ανάπτυξης .

Οι περιοχές οξείδωσης διακρίνονται σε τρεις, ως εξής:

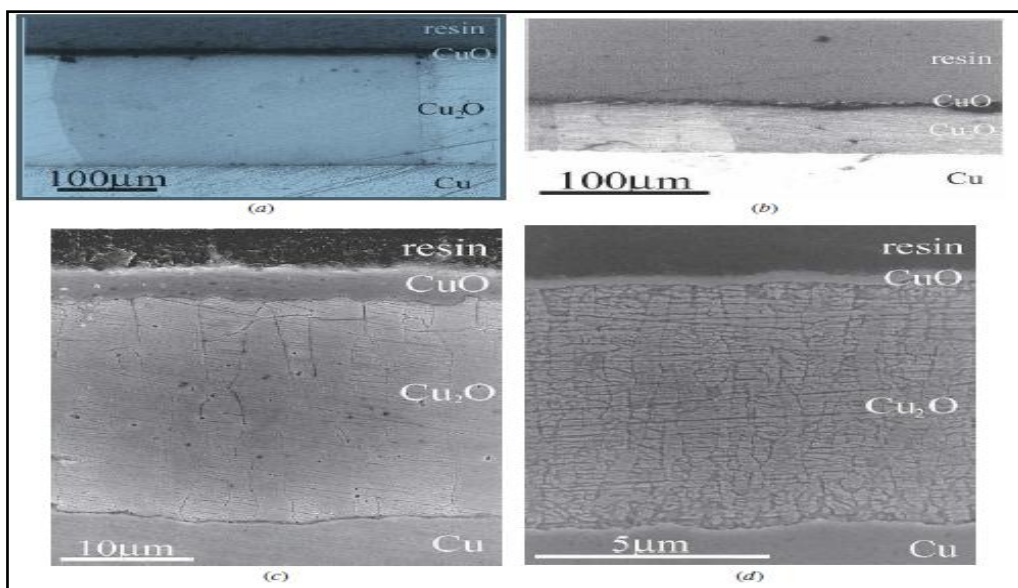
- A) αυτή των υψηλών θερμοκρασιών (900°C με 1050 °C)
- B) αυτή των μεσαίων θερμοκρασιών (600°C με 850 °C)
- Γ) αυτή των χαμηλών θερμοκρασιών (350°C με 500 °C)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15-13 : ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΕΩΣ ΧΑΛΚΟΥ

Στο παραπάνω σχήμα δίνεται ο λογάριθμος του τετραγώνου του βάρους που προστίθεται σε gr στο τετράγωνο ενός τετραγωνικού εκατοστού ανά δευτερόλεπτο και βλέπουμε ότι για χαμηλές θερμοκρασίες η μάζα που προστίθεται λόγω της οξείδωσης μειώνεται ραγδαία, με σχεδόν μηδενισμό της, κάτω από τους 350 βαθμούς κελσίου για διάφορες καθαρότητες και σύνθεσης ακαθαρσιών του χαλκού [38]

Πρακτικά, εάν γίνει παραδεκτό ότι κατά την υδατοδιαλυση δεν υπάρχει απώλεια υλικού μητρικού μετάλλου ή κράμματος, επίσης το ίδιο και κατά την πυροσυσσωμάτωση, τότε μπορεί να υπολογισθεί ο βαθμός οξείδωσης από το βάρος που προστέθηκε στο δοκίμιο με την προϋπόθεση, είτε να έχει γίνει τέλεια υδατοδύαλυση είτε να είναι γνωστό το βάρος του υπολειπόμενου πληρωτικού μέσου στο δοκίμιο. Αυτό οφείλεται στο ότι η οξείδωση προσθέτει βάρος στο δοκίμιο. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι τα δοκίμια γίνονται πιο ψαθυρά με τα οξειδία συνήθως, όπως αυτά του χαλκού.



ΕΙΚΟΝΑ 15-3: ΠΑΧΟΣ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΧΑΛΚΟΥ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΥΡΟΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ: (a) 1000°C ΓΙΑ 30 ΛΕΠΤΑ , (d) 400°C ΓΙΑ 9 ΩΡΕΣ

Στα παραπάνω σχήματα διακρίνουμε την ανάπτυξη των δύο στρωμάτων οξειδίων σε διαφορετικές θερμοκρασίες και χρόνους παραμονής. Η εικόνα (a) είναι για 1000 °C και χρόνο παραμονής 30 min, ενώ η (d) στους 400 °C για 480', από όπου διαπιστώνουμε ότι παρά τον σημαντικά μεγαλύτερο χρόνο παραμονής [16 φορές πάνω στην περίπτωση (d)] το στρώμα οξειδίων είναι 10 με 15 φορές λεπτότερο [38]. Υπολογισμός πορώδους:

Εάν θεωρήσουμε ότι η θεωρητική πυκνότητα του συμπιέσματος είναι αυτή, στην οποία οι κόνοι δεν έχουν πορώδες και έχουν την βιβλιογραφική πυκνότητα, τότε εάν αφαιρεθεί η ποσότητα της ζάχαρης, προκύπτει η θεωρητική πυκνότητα του αφρού ρ_{thc} (Δεν υπάρχουν μικροπόροι παρά μόνο οι μακροπόροι που οφείλονται στον θεωρητικό όγκο που καταλαμβάνει η μάζα της ζάχαρης). Εάν υπολογίσουμε την υπολειπόμενη ζάχαρη μετά την υδατοδιάλυση στον αφρο, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε την πυκνότητα του θεωρητικώς χωρίς πόρους μετάλλου ή κράματος που περιεχει και υπολείμματα ζάχαρης ρ_{thfoam}.

Εάν μετά την πυροσυσσωμάτωση υπολογίσουμε, από τη γεωμετρία του δοκιμίου αφρού, την πυκνότητα που έχει και την συγκρίνουμε με αυτή του ατόφιου μητρικού υλικού του μετάλλου ή του κράματος, τότε προκύπτει η σχετική πυκνότητα του αφρού ($\rho_{finalfoam} * [\frac{1}{\rho_s}]$).

Γνωρίζοντας την πυκνότητα των κόκκων της ζάχαρης και γνωρίζοντας ότι ο πραγματικός όγκος της ζάχαρης χωρίς πόρους δημιουργεί το μακροπορώδες και έχοντας την θεωρητική πυκνότητα του μασίφ υλικού καθώς και τον όγκο του, μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά το μακροπορώδες, ενώ ταυτόχρονα γνωρίζοντας τον συνολικό όγκο του υλικού και αφαιρώντας το μακροπορώδες, υπολογίζεται το μικροπορώδες, ως εξής:

V_{ολ} = ολικός όγκος

V_{μακρ} = όγκος οφειλόμενος στο πληρωτικό μέσο (ρ πλ. Μεσου/Μ πλ. Μεσου)

V_{μικρ} = όγκος οφειλόμενος στο μικροπορώδες

V_{μικρ} = V_{ολ} - V_{μακρ}

Αν η οξείδωση είναι πολύ μικρή μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι η πρόσθετη μάζα λόγω της οξείδωσης είναι αμελητέα. Μετά την πυροσυσσωμάτωση, εάν το αποπλενόμενο μέσο αποσυντίθεται από την υψηλή θερμοκρασία σε πολύ μεγάλο βαθμό, μπορεί να γίνει επίσης η παραδοχή ότι το υπολειπόμενο πληρωτικό μέσο είναι αμελητέο.

Κατόπιν αυτών των παραδοχών, είναι δυνατό να υπολογιστούν οι όγκοι των πόρων και η διανομή τους.

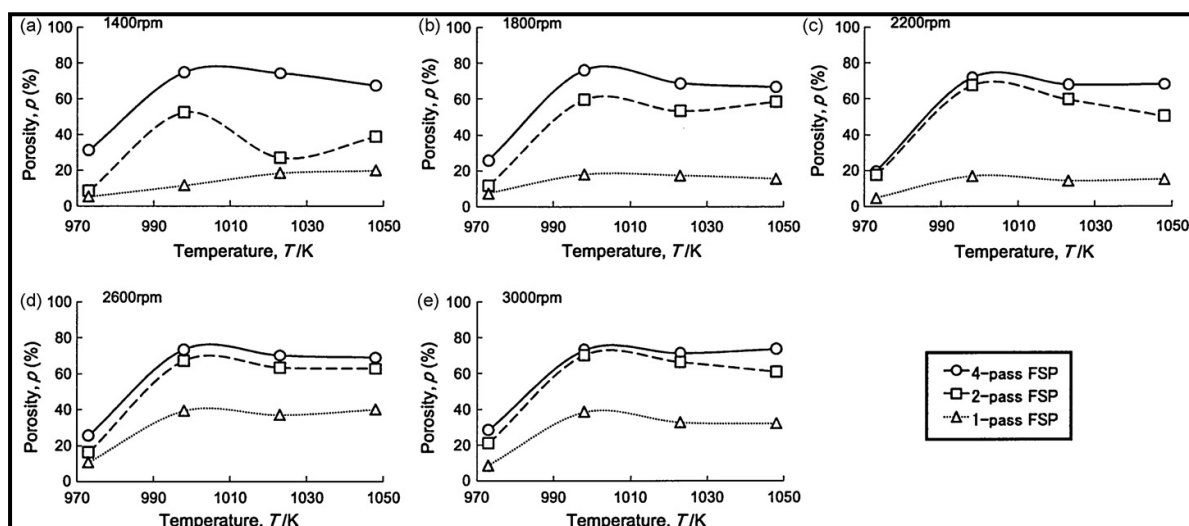
15.1.2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΦΡΟΥ ΑΠΟ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΗ ΣΧΟΝΗ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΥ ΑΠΟΣΥΝΤΙΘΕΤΑΙ ΔΙΑΣΤΕΛΟΝΤΑΣ ΤΟ ΚΡΑΜΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΗΜΙΣΤΕΡΕΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

15.1.2.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΜΕ ΣΚΟΝΗ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η ανάδευση είναι πολύ σημαντική για την ομογενοποίηση των κόνων και την ομοιόμορφη αφροποίηση του πρόδρομου υλικού που σχηματίζεται από αυτές. Σύμφωνα με την δημοσίευση [3], προκύπτει ότι η παραγωγή πρόδρομου μέσου με ανάδευση τριβής, δημιουργεί διαφορετική ικανότητα αφροποίησης για διαφορετικές ταχύτητες και περάσματα πάνω σε πλάκες αλουμινίου που περιέχουν παράγοντα αφροποίησης $TiH_2-Al_2O_3$. Η αφροποίηση εξαρτάται από την ταχύτητα του περιστρεφόμενου εργαλείου ανάμιξης τριβής, την θερμοκρασία αφροποίησης, τα περάσματα πάνω από το σημείο, στο οποίο έχει προστεθεί το μείγμα του παράγοντα αφροποίησης.

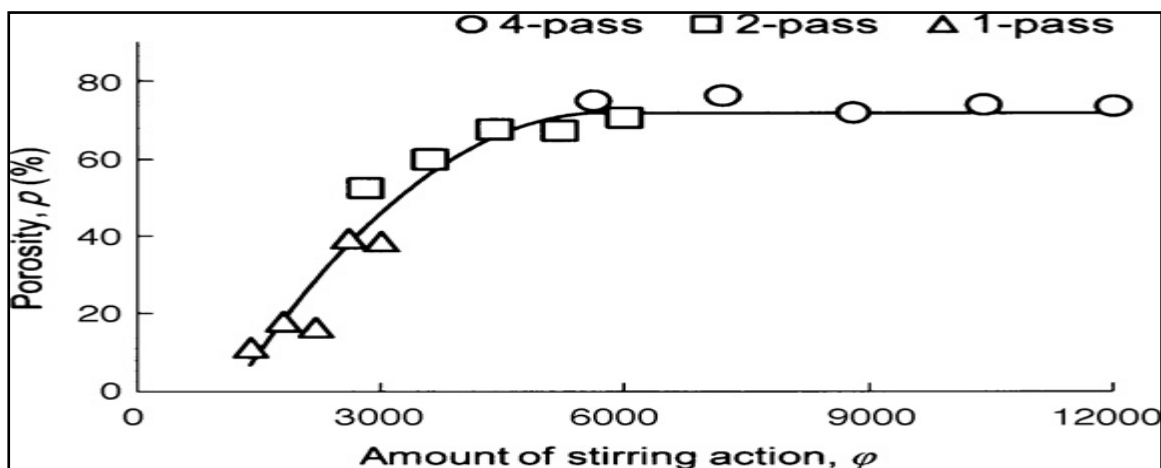
Το συμπέρασμα που συνάγεται είναι ότι μετά από 4 περάσματα και υψηλή ταχύτητα ανάδευσης, η διαφορά στο πορώδες μεταξύ 2 και 4 περασμάτων είναι μικρή ενώ για άκρες ταχύτητες υπάρχει σημαντική διαφορά. Επίσης σε υψηλές ταχύτητες επιτυγχάνεται υψηλό πορώδες με 2 μόλις περάσματα.

Για μικρές θερμοκρασίες αφροποίησης έχουμε χαμηλό πορώδες που γίνεται μέγιστο για μια θερμοκρασία, πάνω από την οποία μειώνεται ελαφρά για να σταθεροποιηθεί στη συνέχεια στις πιο υψηλές θερμοκρασίες.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 15-14: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΣΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Το ένα πέραςμα στις 3000 στροφές ισοδυναμεί σχεδόν με ανάδευση 2 περασμάτων στις 1400 στροφές. Έτσι αποτυπώνεται ένα διάγραμμα, όπου το πορώδες συσχετίζεται με έναν συντελεστή ϕ που ονομάζεται ποσότητα της δράσης ανάδευσης, καταδεικνύοντας την ισοδυναμία των στροφών σαν να είχαμε ένα πέραςμα και η αριθμητική του τιμή είναι οι στροφές του εργαλείου πολλαπλασιασμένη με τον αριθμό των περασμάτων του. Έτσι σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα αναδεικνύεται ότι από μια ποσότητα ανάδευσης και πάνω, το πορώδες που θα προκύψει από το πρόδρομο δεν αυξάνεται (σταθεροποιείται), εννοείται με σταθερή θερμοκρασία αφροποίησης.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15-15: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΔΡΑΣΗΣ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ φ ΣΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ ΤΟΥ ΤΕΛΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ

Αν και αυτό το πείραμα δεν έχει άμεση συνάφεια με ανάδευση κόνεων, δείχνει την σημασία της ανάδευσης στην ομογενοποίηση των πόρων και το αυξημένο πορώδες, καθώς και από ποια τιμή και πάνω δεν έχει επίδραση στο πορώδες.

15.1.2.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΕΛΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΔΡΟΜΩΝ

Στην δημοσίευση «5» περιγράφεται μέσω της χρησιμοποίησης πρόδρομων από κράμα αλουμινίου $AlMg_1SiO_6$, η επίδραση στο πορώδες του σχηματιζόμενου αφρού ανάλογα με την κατεύθυνση έλασης πρόδρομων δοκιμίων (κυκλικής και ορθογώνιας διατομής), όπου οι κατευθύνσεις είναι η μία παράλληλη προς την κατεύθυνση εξώθησης κατά την παράγωγη των πρόδρομων και η άλλη είναι κάθετη (ποια είναι η κάθετη δεν έχει σημασία καθώς έχουμε συμμετρία).

Στην συγκεκριμένη δημοσίευση το πόσο ικανοποιητική είναι η αφροποίηση (διαστολή αφρού) δίνεται από τον συντελεστή απόδοσης αφροποίησης.

$$\eta = 1 - \frac{Vi}{Vf}$$

όπου:

V_i ο όγκος του πρόδρομου

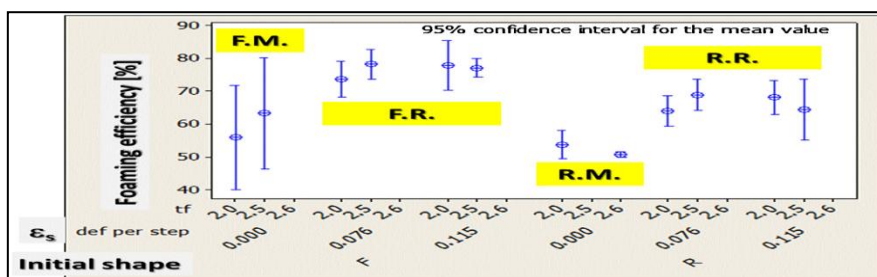
V_f ο όγκος του αφρού.

Μετά από πειράματα βρίσκεται ότι η καλύτερη απόδοση αφροποίησης ισχύει, όταν η έλαση γίνει παράλληλα στην κατεύθυνση εξώθησης κατά την παράγωγη της πρόδρομης ράβδου ή μπάρας

15.1.2.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΡΟΔΡΟΜΟΥ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Έχοντας μια ορθογώνια μπάρα και μια ράβδο ίδιου μήκους που έχουν προκύψει από εξώθηση περνούν από μηχανή έλασης τα πρόδρομα και έπειτα κόβονται με υδροκοπή σε κυκλικά δοκίμια.

Επίσης κόβονται οι ράβδοι σε κυκλικά δοκίμια με φρεζάρισμα και το ίδιο οι μπάρες. Έπειτα αφροποιούνται τα δοκίμια σε προθερμασμένο φούρνο. Τα συμπεράσματα, τα οποία διακρίνονται και στο παρακάτω σχήμα, είναι τα εξής:



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15-16: ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΧΗΜΑΤΑ ΠΡΟΔΡΟΜΩΝ ΑΠΟ ΕΛΑΣΗ ΚΑΙ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΒΑΘΜΟ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

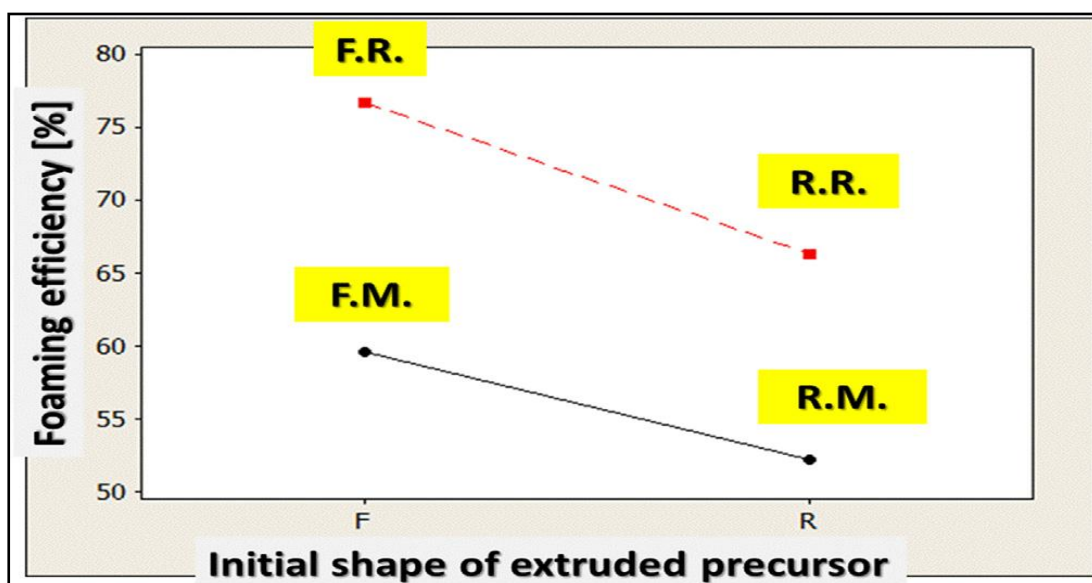
A) Ως προς το σχήμα

Η πιο αποδοτική αφροποίηση γίνεται στα δοκίμια που έχουν παραχθεί από τις ορθογώνιες μπάρες, ενώ η λιγότερο αποδοτική στα δοκίμια που έχουν παραχθεί από ράβδους.

B) Ως προς την κατεργασία

Η πιο αποδοτική αφροποίηση γίνεται στα δοκίμια που έχουν υποστεί έλαση. Αν συνδυαστούν το σχήμα και η κατεργασία, η πιο αποδοτική αφροποίηση γίνεται για μπάρα (flat), όπου η πρόδρομη μπάρα έχει ελαστεί, ενώ η λιγότερο αποδοτική γίνεται όταν ράβδος κοπεί σε μικρά κυκλικά δοκίμια στην κατεύθυνση της εξώθησης, χωρίς να πραγματοποιηθεί έλαση.

Η επίδραση της ψυχρής έλασης στην αφροποίηση σε σχέση με τα ως έχουν πρόδρομα που έχουν παραχθεί από εξώθηση, διαπιστώνεται από το παρακάτω σχήμα, στο οποίο φαίνεται ότι τόσο για μπάρα όσο και για ράβδο, η επίδραση είναι η ίδια (παράλληλες γραμμές σχεδόν).

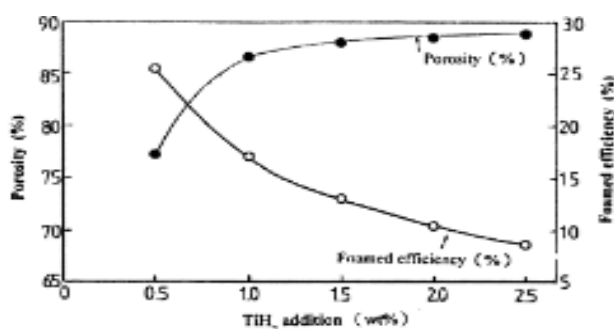


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15-1: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΡΧΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΤΩΝ ΠΡΟΔΡΟΜΩΝ ΣΤΗΝ ΑΦΟΠΟΙΗΣΗ

Αξίζει να επισημανθεί ότι στην πειραματική διαδικασία εξετάστηκαν πολλά δοκίμια, ώστε να παραχθεί κάποιος μέσος όρος για κάθε κατεργασία και για κάθε αρχικό σχήμα, καθώς και ένα εύρος των τιμών σε διάστημα εμπιστοσύνης 95%
 Η έλαση οδηγεί σε καλύτερη αφροποίηση, πιθανόν γιατί παγιδεύεται περισσότερο αέριο σε αντίθεση με τα χωρίς έλαση δοκίμια, όπου μέρος του αέριου χάνεται από τους μικροπόρους.

15.1.2.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΣΤΟΛΗ ΤΟΥ ΠΡΟΔΡΟΜΟΥ

Στην δημοσίευση [45] τα πειραματικά δεδομένα για αφροποίηση στους 913 Kelvin καταδεικνύουν ότι όσο περισσότερος παραγοντας αφροποίησης προστεθεί TiH_2 στο Αλουμίνιο (Al-7 wt% Si-0.45 wt% Mg) τόσο περισσότερο μεγαλώνει το πορώδες ενώ ταυτοχρόνα μειώνεται η απόδοση της.. Σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα η καλύτερη απόδοση αφροποίησης συμβαίνει για 0,5% Ti_2H και μετά μειώνεται. Όπως παρατηρείται στο διάγραμμα για προσθήκη TiH_2 1 % κ.β το πορώδες αυξάνει θεαματικά ενώ η απόδοση πέφτει επίσης θεαματικά.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15-18: ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗΣ , ΠΟΡΩΔΕΣ ,ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗΣ TiH_2

15.1.2.5. ΑΦΡΟΙ ΜΑΓΝΗΣΙΟΥ ΚΑΙ ΚΡΑΜΜΑΤΩΝ ΜΑΓΝΗΣΙΟΥ

Σε αυτή την δημοσίευση [11] επιλέχτηκε ο δρόμος της κονιομεταλλουργίας, κατά την οποία η αφροποίηση έλαβε χώρα στην ημιστερεά κατάσταση με τις παρακάτω παραμέτρους:

- το περιβάλλον (Αργό ή η ατμόσφαιρα) κατά την διάρκεια της αφροποίησης
- την πίεση περιβάλλοντος κατά την διάρκεια της αφροποίησης
- την περιεκτικότητα σε αλουμίνιο (από 0 % κβ έως 17 % κβ)
- την ύπαρξη ή μη του υδριδίου (TiH_2 , NO, TiH_2)
- την διαδικασία παραγωγής του πρόδρομου υλικού (μονοαξονική συμπίεση, εξώθηση)

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν :

- A) πούδρα Μαγνησίου καθαρότητας 99,8 % με μέγεθος κόκκου $D_{100} < 75 \mu m$
- B) Πούδρα Αλουμινίου καθαροτητας 99,7 % με μεγεθος κοκου $D_{100} < 100 \mu m$

Γ) Πούδρα παράγοντα αφροποίησης TiH_2 καθαρότητας 98,8 % με μέγεθος κόκκου $D_{100} < 63 \mu m$

Το υδρίδιο του τιτάνιου προθερμάνθηκε στους 480 βαθμούς κελσίου για 180', έτσι ώστε να καθυστερήσει η διάσπασή του κατά την διαδικασία της αφροποίησης, ανεβάζοντας το σημείο στο οποίο αρχίζει να διασπάται σε υψηλότερες θερμοκρασίες, με στόχο να επιτευχθεί καλύτερη δομή αφρού.

Οι σκόνες έχουν αναδευτεί περισσότερο από 25' και έπειτα για την συνένωση μέσω μονοαξονικής καταπόνησης, χρησιμοποιείται μείγμα κόνεων 20gr με 25 gr, όπου υποβαλλόταν πίεση της τάξεως των 300 Mpa για 15' στους 400°C. Με αυτό τον τρόπο, κατασκευάστηκαν κυλινδρικές ταμπλέτες 36 mm διαμέτρου και έπειτα από αυτές, δείγματα μεγέθους $10 \times 10 \times 4 mm^3$, έτοιμα για αφροποίηση.

Για την διαδικασία της εξώθησης λήφθηκαν αρχικά 55gr-70 gr μείγματος κόνεων, τα οποία μονοαξονικά συμπιεστήκαν σε θερμοκρασία δωματίου σε κυλινδρικές μπιγιέτες των 28 mm διάμετρο με εφαρμοζόμενη πίεση 100 Mpa. Αυτές οι ράβδοι εξωθούνταν στους 300°C εφαρμόζοντας άμεση εξώθηση, παράγοντας ράβδους διαμέτρου 8 και 9,5 mm .

Η πυκνότητα μετρήθηκε μέσω της αρχής του Αρχιμήδη με μεσο πλεύσης αιθανόλη και ισορροπία Sartorius YDK 01

Επειδή το μαγνήσιο οξειδώνεται σε ατμόσφαιρα περιβάλλοντος, η αφροποίηση λαμβάνει χώρα σε περιβάλλον Αργού. Τα δοκίμια τοποθετούνται σε ειδικό φούρνο ελεγχόμενης ατμόσφαιρας που μπορεί να φέρει μετρητικά όργανα για την οπτική καταγραφή της εξέλιξης της αφροποίησης, καταγραφή της θερμοκρασίας, της πίεσης της ατμόσφαιρας κτλ.

Η θερμοκρασία αφροποίησης που εφαρμόστηκε για κάθε κράμα ήταν περίπου 100 Κέλβιν πάνω από το σημείο υγροποίησης του κάθε κράματος.

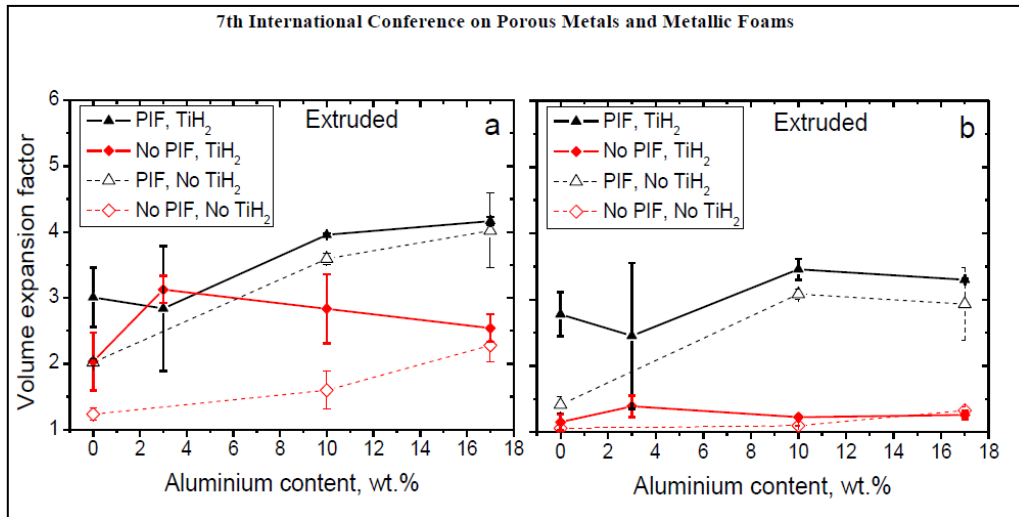
Το πείραμα έλαβε χώρα σε πίεση περιβάλλοντος Αργού 1,5 bar και 1,2 bar και το πρόδρομο έμεινε μέσα σε αυτό για 150'' και έπειτα ψύχθηκε ο αφρός με φυσική ψύξη μες στο φούρνο. Μια άλλη μεθοδος που λαμβάνει χώρα στο πείραμα είναι, στον τελευταίο κύκλο δοκιμών να εφαρμοστεί πίεση περιβάλλοντος Αργού 10 bar και έπειτα, όταν το μίγμα έχει λιώσει να πέσει απότομα στο 1 bar και τότε αρχίζει η ψύξη. Η τελευταία μέθοδος λέγεται PIF (PRESSURE INDUCED FOAMING)

Μετα την στερεοποίησή τους οι αφροί κόβονταν, στιλβώνονταν και φωτογραφίζονταν.

Η πιο αξιόλογη δομή αφρού κράματος Μαγνησιου - Αλουμινίου προκύπτει από εξώθηση με την επαγωγή μεγάλης πίεσης περιβάλλοντος Αργού και με χρήση παράγοντα αφροποίησης. Στην περίπτωση που η αφροποίηση γίνει σε πίεση περιβάλλοντος το περισσότερο αέριο χάνεται. Γι αυτό το λόγο άλλωστε τα χωρίς παράγοντα αφροποίησης δείγματα δεν δίνουν αφρούς σε πιέσεις περιβάλλοντος.

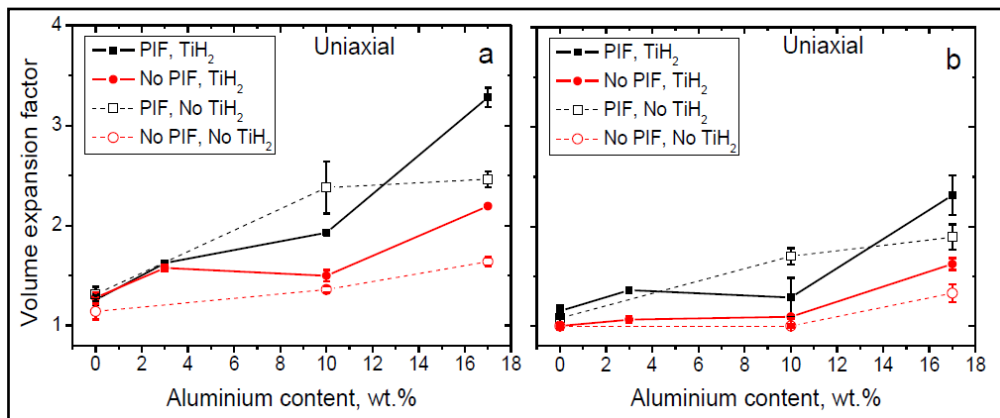
Τα αποτελέσματα καταγράφονται στα παρακάτω σχήματα:

Στα δυο παρακάτω διαγράμματα διακρίνουμε την εξέλιξη της αφροποίησης για δείγματα από εξώθηση με η χωρίς παράγοντα αφροποίησης. Στην πρώτη εικόνα εμφανίζεται το μέγιστο της αφροποίησης ενώ στην δεύτερη η εν τέλει αφροποίηση κατά το τέλος της στερεοποίησης.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15-19: ΣΥΝΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ ΟΓΚΟΥ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΣΙΟΥ ΓΙΑ ΕΞΩΘΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα με τις αντίστοιχες συνθήκες αλλά για μονοαξονική καταπόνηση:



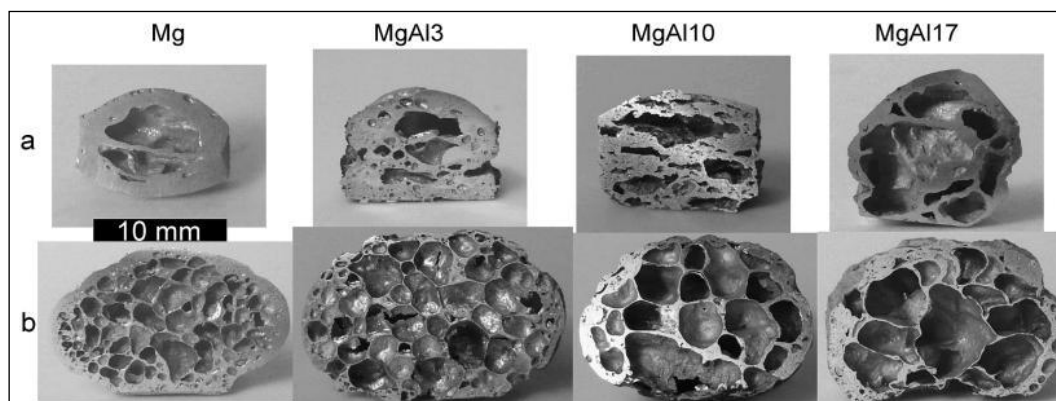
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15-20: ΑΦΡΟΙ ΠΑΡΑΧΘΕΝΤΕΣ ΑΠΟ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ, ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΥΠΑΡΞΗΣ Η ΜΗ ΥΔΡΙΔΙΟΥ

Πρέπει να σημειωθεί ότι η αφροποίηση έλαβε χώρα σε θερμοκρασία 100 βαθμούς κελσίου πάνω από την θερμοκρασία υγροποίησης κάθε κράματος. Ξεκινά από 650 βαθμούς κελσίου και μειώνεται η θερμοκρασία αφροποίησης, όσο αυξάνεται η σύσταση του αλουμινίου στο κράμμα.

Η διαστολή του κράματος γίνεται μεγαλύτερη, όσο η ποσότητα του Αλουμινίου αυξάνει σε αυτό. Επίσης όσο μεγαλύτερη ποσότητα αλουμινίου προστεθεί κατά βάρος, τόσο μεγαλύτεροι πόροι δημιουργούνται, καθώς μικρότερα κελιά συνενώνονται με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλων λόγω της θραύσης τους. Επίσης σε συνδυασμό με μεγάλη πίεση περιβάλλοντος η μέθοδος παράγει αφρούς πολύ καλής ποιότητας με κριτήριο την απόδοση της αφροποίησης.

Στο παρακάτω σχήμα αποτυπώνονται, στην πρώτη σειρά, οι καλύτερες αφροποιήσεις για κάθε μεθοδο και καταδεικνύεται ότι σαφώς καλύτερη είναι αυτή

από εξώθηση και υψηλή πίεση, με πιο ομοιόμορφο μέγεθος πόρων περά από το υψηλό πορώδες.



ΕΙΚΟΝΑ 15-4: ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΑΡΑΘΕΤΩΝ ΑΦΡΩΝ α) ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΑΡΓΟΥ, β) ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΠΡΟΔΡΟΜΩΝ ΠΑΡΑΘΕΤΩΝ ΑΠΟ ΕΞΩΘΗΣΗ ΣΕ ΥΨΗΛΗ ΠΙΕΣΗ ΑΡΓΟΥ

- α) πρόδρομο από μονοαξονική συμπίεση και αφροποίηση σε περιβάλλον υψηλής πίεσης για διάφορες συστάσεις αλουμινίου
- β) πρόδρομο από εξώθηση και αφροποίηση σε περιβάλλον υψηλής πίεσης

Πρέπει να δοθεί προσοχή στο περιβάλλον της αφροποίησης που γίνεται αυτή, καθώς υπάρχουν θέματα διάβρωσης, οξείδωσης, ανάφλεξης ή και έκρηξης του αφρού και κατά συνέπεια να μην παραχθεί ικανοποιητικός αφρός ή και να μην παραχθεί καθόλου αφρός.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Μαγνήσιο σαν μητρικό υλικό αφρού, το οποίο κατά την διάρκεια της αφροποίησης προδρόμου του σε φουρνο και χωρίς απόλυτα (ή ικανοποιητικά) προστατευμένη ατμόσφαιρα και πραγματοποιούμενη σε ατμόσφαιρα περιβάλλοντος, οξειδώνεται έντονα στην αρχή έπειτα αναφλέγεται και πολύ γρήγορα εκρήγνυται (σε μερικά δευτερόλεπτα από την έναρξη της αφροποίησής του).

Ο Χαλκός οξειδώνεται εύκολα σε συνθήκες μη προστατευμένης ατμόσφαιρας, δημιουργώντας μια σκούρα καμένη επιφάνεια κάποιου βάθους. Με διάφορες τεχνικές με αφροποίηση, η πυροσυσσωμάτωση του αφρού (ανάλογα με την μέθοδο), η οξείδωση αυτή και το κάψιμο αποφεύγονται, καθώς έρχεται σε επαφή το δοκίμιο στις εξωτερικές επιφάνειες με προστατευτικό υλικό (πχ χάλυβας), ή με προστασία ατμόσφαιρας μέσω αδρανούς αερίου, για παράδειγμα του αδρανούς Αργού.

15.1.2.6. Ταχύτητα διάσπασης παράγοντα αφροποίησης

Η ταχύτητα αυτή είναι σημαντική καθώς καθορίζει τον χρόνο παραγωγής αλλά και την θερμοκρασία που είναι κατάλληλη για αφροποίηση, σημείο σημαντικό, ώστε ο παράγοντας αυτός να αφροποιήσει ένα πρόδρομο που είναι κοντά στο σημείο τήξης του με στόχο την ικανοποιητική αφροποίηση. Ένα παράδειγμα παρατίθεται στην δημοσίευση [13], όπου παρουσιάζεται η συσχέτιση της ταχύτητας διάσπασης

υδριδίου του τιτάνιου σε συνάρτηση με την θερμοκρασία. Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει αυτή την εξάρτηση, όπου στην τετμημένη δίνεται η θερμοκρασία και στην τεταγμένη ο χρόνος σε λεπτά, στον οποίο διασπάται η μισή ποσότητα του υδριδίου (ο χρόνος είναι σε λογαριθμική κλίμακα ενώ η θερμοκρασία σε γραμμική). Διακρίνεται ότι σε θερμοκρασία 450 βαθμών Κελσίου μέσα σε 60' διασπάται η μισή ποσότητα του υδριδίου, ενώ στους 650 βαθμούς Κελσίου μόνο σε 6'. Η εξάρτηση από την θερμοκρασία του χρόνου ημίσειας ζωής είναι λογαριθμική.

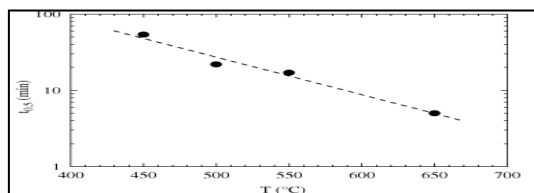


Figure 6. Time for 50% transformation (t_{50}) as a function of the dehydrating temperature.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15-21: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ ΤΗΣ ΜΙΣΗΣ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΥΔΡΙΔΙΟΥ ΣΥΝΑΤΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

16. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕΤΑΛΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ [1], [20] [25], [26] , [27] ,[28] , [29] , [31]

Κατά την παραγωγή σε βιομηχανική κλίμακα μεταλλικών αφρών (όπως και σε κάθε βιομηχανική παραγωγική διαδικασία) συνυπάρχουν διάφορα κόστη που έχουν διαφορετική συμπεριφορά, ανάλογα με την μεθοδο που χρησιμοποιείται αλλά και με τις μεταβολές του κόστους ενέργειας, υλικών, μηχανημάτων, την ενοικίαση ή την κτήση χώρων, κόστος εργασίας κτλ. Επίσης παράγοντες που επιδρούν είναι ο χρόνος αναμονής των μηχανημάτων, η ταχύτητα παραγωγή που εξαρτάται από την υπάρχουσα τεχνολογία κ.α.

Στο παρόν κεφάλαιο, θα προσπαθήσω να καταγράψω ένα θεωρητικό μοντέλο που σε γενικές γραμμές θα μπορέσει να αποδώσει τον τρόπο υπολογισμού των διαφόρων δαπανών προκειμένου να παραχθεί ένα προϊόν με τρόπο τέτοιο, ώστε να είναι κατάλληλος στην χρήση του για την κοστολόγηση μιας παραγωγικής διαδικασίας μεταλλικών αφρών (κυψελοειδών στερεών).

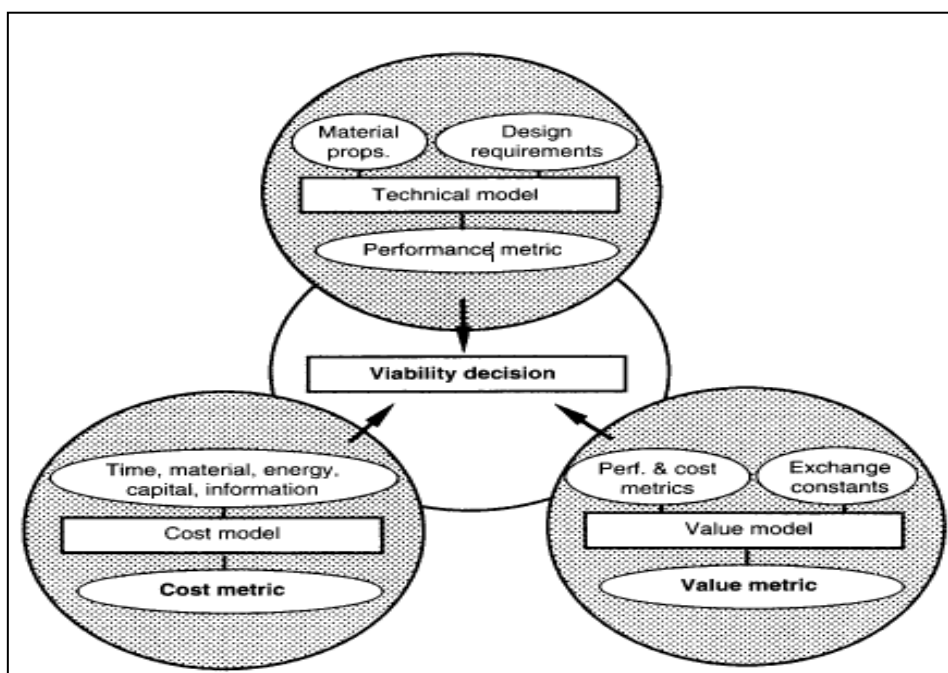
Η χρησιμότητα της κοστολόγησης δεν έγκειται μόνο στο να συγκριθούν οι διάφορες μέθοδοι μεταξύ τους αλλά και να καθορισθεί – εκτιμηθεί η δυνατότητα μείωσης του κόστους και ο βαθμός στον οποίο οριακά μπορεί αυτό να μειωθεί, εφόσον οι μεταλλικοί αφροί παραχθούν με αυτοματοποιημένες διαδικασίες και σε μεγάλη κλίμακα παραγωγής ως προς την ποσότητά τους. Το τελευταίο είναι πολύ χρήσιμο καθώς καθορίζει σε τεράστιο βαθμό και την βιωσιμότητα μιας μεθόδου παραγωγής αλλά και το αν τα τελικά μειωμένα όρια του κόστους μπορούν να καταστήσουν μελλοντικά βιώσιμη μια παραγωγή με μια μεθοδο με μια τεχνολογία και με τις συγκεκριμένες τιμές. Σημαντικός είναι και ο ρόλος της τιμής ενέργειας αλλά και των υλικών.

Μία σημαντική παράμετρος που χρειάζεται να ληφθεί υπόψη είναι ότι ο στόχος των καινούργιων υλικών είναι να καλύψουν κάποιες ανάγκες και δεν είναι από μονά τους αυτοσκοπός. Η ανάγκη για ελαφρές κατασκευές, για ηχομόνωση, για αυξημένη ακαμψία σε σχέση με το βάρος, για απορρόφηση ενέργειας κρούσης, ταλαντώσεων, ηχητικών κυμάτων, για απομάκρυνση ρύπων, για κατάλυση βλαβερών ουσιών, για απορρόφηση θερμότητας, μόνωση, υψηλό σημείο τήξης, καθιστά τους μεταλλικούς αφρούς, υλικά που μπορούν τεχνικά να αξιοποιηθούν για όλες τις παραπάνω εφαρμογές με συνδυασμένες ιδιότητες πχ εφαρμογή σε μόνωση όπου τα τεμάχια είναι πολύ ελαφριά με υψηλό σημείο τήξης και μη τοξικά (στην πλειοψηφία τους) ή στο πακετάρισμα ευαίσθητων προϊόντων.

Έχουμε 3 παράγοντες που καθορίζουν την βιωσιμότητα μιας επένδυσης:

1. Το τεχνικό μοντέλο, το οποίο καθορίζει τις παραμέτρους της αποτελεσματικότητας του επιθυμητού προϊόντος με τεχνικά κριτήρια βασισμένο στις απαιτήσεις σχεδίασης και στις ιδιότητες του υλικού

2. Οι παράμετροι του κόστους που εισάγονται σε ένα μοντέλο κοστολόγησης και μπορούμε να πούμε ότι διακρίνονται σε κόστη καθορισμένα από το χρόνο παράγωγης, της ποσότητας και του είδους των υλικών, το κόστος ανεργίας, κεφαλαίου, πληροφοριών και έρευνας. Επίσης μπορεί να περιληφθεί το κόστος μεταφοράς, αποθήκευσης, διαφήμισης κτλ.
3. Οι παράμετροι που επιθυμούμε να έχει ο μεταλλικός αφρός με βάση κάποιες αρχές βελτιστοποίησης με συμβιβασμό 2 η περισσότερων τιμών. [1], [20]



ΕΙΚΟΝΑ 15-5: ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥΝ ΤΗΝ ΑΠΟΦΑΣΗ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

Όλες αυτές οι παράμετροι (κόστους, απόδοσης, παράμετροι τιμής) συνδυασμένες καθορίζουν κατά ποσό μια επένδυση ή μια απόφαση παραγωγικής διαδικασίας είναι αξιόπιστη δηλαδή συνιστούν την απόφαση βιωσιμότητας.

16.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ

Το κόστος αποτελείται από κάποιες συνιστώσες οι οποίες είναι οι εξής :

1. Το κόστος αναλώσιμων και υλικών
2. Το κόστος του εξοπλισμού
3. Το κόστος εργαλείων
4. Το κόστος ενέργειας
5. Το κόστος έκτασης
6. Κόστος για ανάπτυξη και πληροφορίες, πληρωμές δικαιωμάτων
7. Κόστος γενικών εξόδων

Τα κόστη πρέπει να ανάγονται στην μονάδα του προϊόντος και με την πάροδο του χρόνου δεν είναι σταθερά καθώς υπάρχει ο πληθωρισμός (κόστος υλικών ,εξαρτημάτων, εργαλείων, χρήματος, κτήσης γης , ενοικίασης η απόκτησης χορών, αποθήκευσης διανομής, διαφήμισης, έρευνας, πληροφόρησης)

Σε κάθε περίπτωση η βασική παράμετρος που επηρεάζει το συνολικό μοναδιαίο κόστος είναι ο συνολικός ετήσιος όγκος της παραγωγής. Τα κόστη λοιπόν πρέπει να ανάγονται και να γίνονται μοναδιαία ως προς το ετήσιο κόστος και οι συνιστώσες των μοναδιαίων κοστών που ανάγονται σε εξοπλισμό που ο χρόνος ζωής τους έχει διαφορετικό χρόνο από αυτό του ετησίου πρέπει να γίνει η ισοδύναμη σε ετήσιο κόστος και στην συνέχεια να μετατραπεί αυτό σε μοναδιαίο κόστος (κόστος ανά μονάδα προϊόντος).

Με δεδομένα κόστη μηχανημάτων, εξοπλισμών κτλ, η δυναμικότητα δηλαδή η μέγιστη δυνατότητα παραγωγής της βιομηχανικής μονάδας, έχει καθοριστική συμβολή στη μέγιστη μείωση του μοναδιαίου κόστους και η όποια βιομηχανική παραγωγή πρέπει να γίνει με εκτίμηση της μελλοντικής παραγωγής και όχι μόνο της παρούσας ώστε συναρτήσει των μελλοντικών εκτιμήσεων να διαμορφωθεί η βιωσιμότητα που απορρέει και από τον όγκο παραγωγής.

16.2. ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΠΟ ΕΤΗΣΙΑ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΒΑΣΗ ΣΕ ΚΟΣΤΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Έστω m η συνολική ποσότητα (σε kg /έτος) αναλώσιμων και n η ποσότητα αναλώσιμων ανά μονάδα προϊόντος(kg/unit) και ετήσιο κόστος αναλώσιμων Cm (σε μονάδες χρήματος ανά χρόνο). Το μοναδιαίο κόστος υλικών ανά μονάδα προϊόντος αφρού βρίσκεται δίνεται από την σχέση :

Μοναδιαίο κόστος αναλώσιμων :

$$Cm(\text{unit})\left[\frac{\text{€}}{\text{μοναδα}}\right] = Cm * \frac{n}{[m * (1 - f)]} = Cm * \left(\frac{n}{m}\right) * \left[\frac{1}{1 - f}\right]$$

Όπου f = το ποσοστό σκάρτων προϊόντων επί των συνολικών.

Επειδή το κόστος κτήσης των υλικών είναι συνάρτηση της ποσότητας, συνήθως ακόμα και με σταθερό πληθωρισμό το $Cm(\text{unit})$ είναι συνάρτηση της ετήσιας παραγγελίας, των παρτίδων από πρώτες ύλες και αναλώσιμα (m η συνολική ποσότητα και N ο αριθμός των εφοδιασμών σε υλικά ετησίως), όπου το κόστος διαμορφώνεται με βάση και τον όγκο αλλά ταυτόχρονα ενσωματώνει τα μεταφορικά της εταιρίας που προμηθεύει, ένα κόστος που μειώνεται αν η παραγωγή του προϊόντος είναι κάθετη αλλά και οριζόντια όσον αφορά τα διαφορετικά προϊόντα που χρησιμοποιούν ίδια σχεδόν αναλώσιμα (εξαρτήματα από αφρούς διαφορετικών σχημάτων και χρήσεων)

Κόστος εργαλείων : ετησίως χρειαζόμαστε κάποια εξαρτήματα , εκ των οποίων κάποια αλλάζουν ανάλογα με την παραγωγή και κάποια ανάλογα με το χρόνο. Σε μια συγκεκριμένη στάθμη παραγωγής το κόστος εργαλείων αναγόμενο στην μονάδα του προϊόντος είναι :

$$\text{κοστος εργ/ μοναδα} = \left[\frac{(\text{ετησιο κοστος εργαλειων})}{(\text{ετησια παραγωγη})} \right] = \frac{Ct}{m} * n = Ct(\text{unit})$$

Κόστος δεσμευμένων χώρων: είναι το κόστος του χώρου εγκατάστασης του κτιρίου κλπ. Αυτό ανάγεται σε κόστος ανά τετραγωνικό μέτρο και ώρα και μετασχηματίζεται σε κόστος δεσμευμένων χώρων ανά μονάδα προϊόντος.

Ως C_s συμβολίζεται το κόστος των δεσμευμένων χώρων στην μονάδα του χώρου και του χρόνου (χρέμα ανά τετραγωνικό μέτρο και ώρα), ενώ ως $C_s(\text{unit})$ συμβολίζεται το κόστος ανά μονάδα προϊόντος.

Έτσι:

$$C_s(\text{unit}) = (\text{συνολικη επιφαν. εγκαταστασεων}) * \frac{C_s}{\text{μοναδες προιοντων ανα ωρα}}$$

Το κόστος ενέργειας συσχετίζεται με την ενέργεια που απαιτείται ετησίως για την παραγωγή των προϊόντων. Έτσι αν E είναι η συνολική ενέργεια σε KWh με κόστος C_e το κόστος για μια κιλοβατώρα, τότε η συμβολή του κόστους ενέργειας ανά μονάδα προϊόντος έχει ως εξής :

$$C_e(\text{unit}) = C_e * \frac{E}{\text{ΕΤΗΣΙΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ}}$$

Το κόστος εργασίας λογίζεται ως το κόστος ανά ώρα εργασίας για πληρωμές της ανθρώπινης εργασίας (μισθολογικές, μη μισθολογικές κλπ) και συμβολίζεται με CL (Labour). Έτσι η συμβολή αυτού του κόστους στην μονάδα προϊόντος είναι:

$$CL(\text{unit}) = \frac{CL}{\text{προιοντα ανα ωρα}}$$

Το ετήσιο κόστος λόγω καινοτομίας, έρευνας, πληροφόρησης και διαφήμισης συμβολίζεται με C_i και η συμβολή του κόστους αυτού στην μονάδα του προϊόντος είναι :

$$C_i(\text{unit}) = C_i \frac{1}{[\text{προιοντα ετησιως}]}$$

Λοιπά ετήσια κόστη C_r και κατά συνέπεια η συμβολή τους στην μονάδα του προϊόντος είναι :

$$C_r(\text{unit}) = C_r * \frac{1}{\text{προιοντα κατ' ετος}}$$

Το συνολικό κόστος ανά μονάδα προϊόντος είναι η σύνθεση όλων των υπολοίπων

$$C(\text{unit}) = C_m(\text{unit}) + CL(\text{unit}) + Ct(\text{unit}) + C_r(\text{unit}) + C_i(\text{unit}) + C_e(\text{unit})$$

Το κόστος υλικών ανά μονάδα προϊόντος σχετίζεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω με την τιμή του προϊόντος, άρα η συμβολή του στο συνολικό μοναδιαίο κόστος έχει να κάνει με την τιμή των αναλώσιμων.

Το κόστος ανά μονάδα προϊόντος της εργασίας μεταβάλλεται ανάλογα με το μισθολογικό, το μη μισθολογικό κόστος, τα μπόνους, την παραγωγικότητα της εργασίας, ενώ επίδραση έχει και η ποσότητα προϊόντων που παράγονται.

Το κόστος των εργαλείων ανά μονάδα προϊόντος καθορίζεται από το κόστος συντήρησής τους, το κόστος κτήσης τους καθώς και την ποσότητα προϊόντων που παράγονται ετησίως και ακολουθεί φθίνουσα πορεία, όσο τα προϊόντα που παράγονται ετησίως αυξάνουν μέχρι κάποιο όριο, ενώ έχει ισχυρή εξάρτηση και από τον ρυθμό παραγωγής καθώς κάποια εργαλεία καταστρέφονται γρηγορότερα σε υψηλούς ρυθμούς παραγωγής.

Το κόστος ενέργειας ανά μονάδα προϊόντος είναι συνάρτηση της τιμής της Kwh, τις απώλειες ενέργειας των μηχανών, την τεχνολογία των μηχανών, εξαρτάται επίσης από την μέθοδο παραγωγής καθώς και από την ποσότητα της παραγωγής, αν και σε μικρότερο βαθμό.

Το συνολικό ετήσιο κόστος είναι :

$$TOTAL\ COST = [ΠΟΣΟΤΗΤΑ\ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ\ ΕΤΗΣΙΩΣ] * C(unit)$$

Το ετήσιο συνολικό κόστος συνίσταται σε αυτό το κόστος που είναι ανεξάρτητο του όγκου παραγωγής σε αυτό που εξαρτάται από τον όγκο και σε αυτό που εξαρτάται από τον ρυθμό παραγωγής.

Το ετήσιο κόστος επιφάνειας δεν εξαρτάται από τον όγκο και τον ρυθμό παραγωγής, ενώ το ετήσιο κόστος υλικών εξαρτάται κατ'εξοχήν από το κόστος του υλικού (που το εν λόγω κόστος όπως είπαμε έχει παραμέτρους μεταβολής)

Το συνολικό ετήσιο κόστος των εργαλείων εξαρτάται ισχυρά από τον ρυθμό παραγωγής και από το μέγεθος της παραγωγής.

Το ετήσιο κόστος έρευνας, πληροφόρησης και διαφήμισης εξαρτάται από τον όγκο παραγωγής.

Το ετήσιο κόστος ενέργειας το ίδιο παρουσιάζει και μια αμελητέα εξάρτηση από τον ρυθμό παραγωγής.

Πρέπει να επισημανθεί ότι μέθοδος με μέθοδο και τεχνολογία με τεχνολογία διαφέρουν σημαντικά ως προς το συνολικό κόστος τους και ως προς το κόστος ανά μονάδα προϊόντος. Παρακάτω βλέπουμε δύο σχεδιαγράμματα που καταδεικνύουν την διάφορα κόστους και μοναδιαίου κόστους από μέθοδο σε μέθοδο και την μεταβολή του μοναδιαίου κόστους ανάλογα με την ποσότητα των μονάδων (προϊόντων).

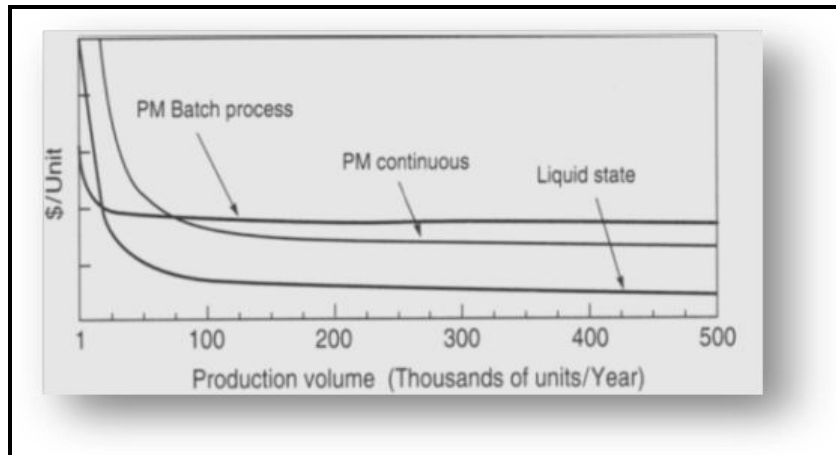
Στο πρώτο σχήμα διακρίνεται η εξάρτηση του κόστους ανάλογα με την ποσότητα μονάδων προϊόντων για τρεις διαφορετικές μεθόδους :

- a) Μέθοδος κονιομεταλλουργίας κατά παρτίδες
- b) Μέθοδος κονιομεταλλουργίας συνεχής
- c) Μέθοδος υγρής φάσης

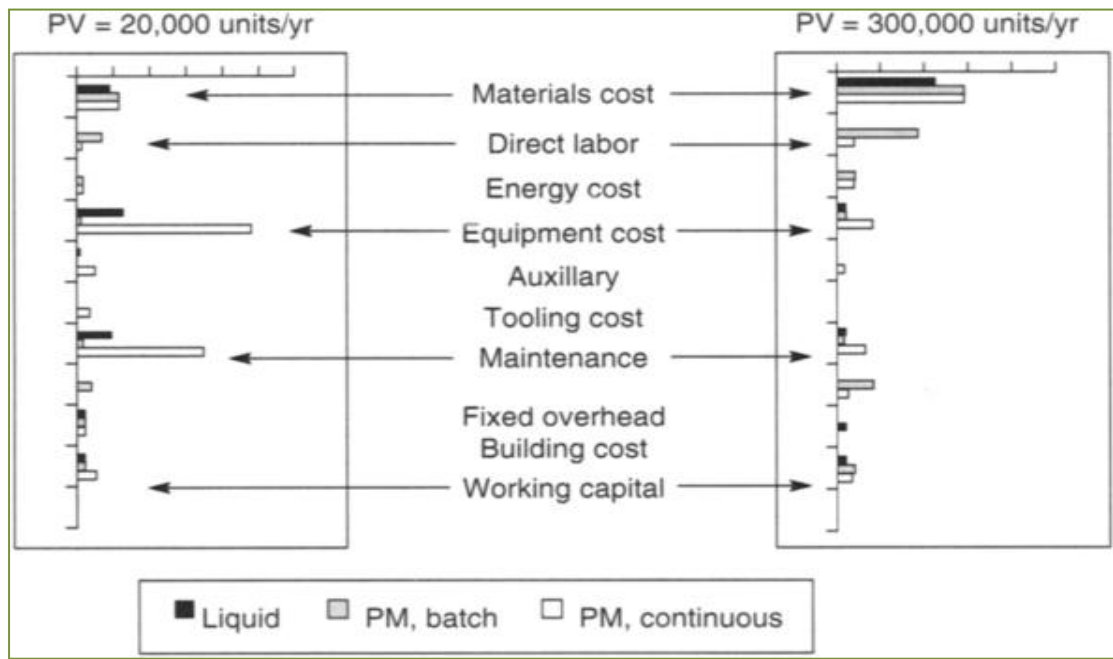
Παρατηρείται ότι:

- Για μικρή παραγωγή το κόστος είναι μεγάλο και όσο αυξάνει η παραγωγή το κόστος φθίνει
- Για μικρή παραγωγή συμφέρει η μέθοδος της κονιομεταλλουργίας κατά παρτίδες ενώ για μεγάλη παραγωγή συμφέρει η μέθοδος της υγρής φάσης

- Όσο η παραγωγή μεγαλώνει, η κλίση του μοναδιαίου κόστους τείνει να γίνει μηδενική (σχεδόν), αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ένα όριο, το οποίο με την συγκεκριμένη τεχνολογία, τιμή πρώτων υλών, εργαλείων και εργασίας, το μοναδιαίο κόστος δεν μπορεί να πάει πιο χαμηλά.
- Όσο η παραγωγή αυξάνεται τόσο το κόστος καθορίζεται από το κόστος των υλικών (και από τα εργατικά)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 16-1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΟΓΚΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΡΕΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΦΡΟΥ.



ΓΡΑΦΗΜΑ 16.2: συμβολή διαφόρων μερών του κόστους για παραγωγή 20000 μοναδων $\frac{1}{\text{ετος}}$ και 300000 μοναδων $\frac{1}{\text{ετος}}$

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρείται η τεράστια μεταβολή στην συμβολή του κόστους των υλικών στο συνολικό μοναδιαίο κόστος σε δυο διαφορετικές στάθμες

παραγωγής ενώ η συμβολή του κόστους του εξοπλισμού μειώνεται ραγδαία για μεγάλη παραγωγή.

Κάποιες βασικές οικονομικές σχέσεις για την κοστολόγηση και την απόδοση μιας επένδυσης.

Όταν ξεκινά μια παραγωγική δραστηριότητα, πρέπει να γίνει μια εκτίμηση για την δυνατότητα και την διάθεση της παράγωγής τα επόμενα έτη. Στην βιομηχανία παραγωγής μεταλλικών αφρών, επειδή υπάρχουν αντίστοιχα προϊόντα που καλύπτουν κάποιες ανάγκες, αν και όχι με τις ιδιαίτερες ιδιότητες που έχουν οι μεταλλικοί αφροί, η εκτίμηση της παράγωγής δεν είναι τόσο εύκολη όπως στην τσιμεντοβιομηχανία για παράδειγμα, όπου η εκτίμηση τσιμέντου γίνεται συσχετιζόμενη με το ΑΕΠ με γραμμικές παρεμβολές που έχουν ιδιαίτερα υψηλό συντελεστή συσχέτισης ($R > 0,95$).

Αφού εκτιμηθούν οι ανάγκες και η ζήτηση που θα έχει το προϊόν, εξετάζονται κάποια εναλλακτικά σενάρια για την κατασκευή του εργοστασίου, όπως: χώρος, ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός, γραμμές παράγωγής με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε σε κάθε περίπτωση να μπορεί το εργοστάσιο ή τα εργοστάσια να ανταποκριθούν στις μελλοντικές εξελίξεις της ζήτησης. Αφού διαμορφωθεί ένα δέντρο τεχνολογικών επιλογών, εξετάζεται κάθε μια από αυτές για να διαπιστωθεί ποια είναι αυτή που με το χαμηλότερο κόστος πετυχαίνει το ίδιο αποτέλεσμα, όσον αφορά το είδος ή τα είδη των προϊόντων με τις επιθυμητές ιδιότητες στην ποσοτητα που καθορίστηκε ως μέγιστη δυναμικότητα του εργοστασίου. Εάν υπάρχει η πρόβλεψη ότι το εργοστάσιο θα επεκταθεί σε κάποια χρονιά από την έναρξη λειτουργίας του, ίσως το δέντρο μεταβληθεί ως προς την καλύτερη επιλογή του είδους της επένδυσης. Βασικό χαρακτηριστικό μιας τέτοιας επένδυσης είναι το σημείο παραγωγής για το οποίο το κόστος του προϊόντος γίνεται ίδιο με αυτό της τιμής που υπάρχει στην αγορά, αλλά με την λογική ότι η τιμή του πρέπει να ξεπερνά το κόστος. Η βέλτιστη τεχνικά λύση δεν σημαίνει ότι η επένδυση μας θα έχει εμπορική επιτυχία.

Το κύριο κριτήριο της βιομηχανίας (εταιρείας σύμφωνα με την κυρίαρχη δομή της οικονομίας) είναι η μέγιστη παρούσα αξία της αναμενόμενης απόδοσης σύμφωνα με τις εκτιμήσεις και τους υπολογισμούς. Η απόδοση αυτή για περίοδο T ετών με προεξοφλούμενο επιτόκιο i δίνεται από την εξίσωση :

$$Ba = -(Ia + Ra) + \sum_{p=1}^T \frac{Rp - Dp}{(1 + i)^p}$$

όπου :

Ia η παρούσα αξία (καταβληθείσα αρχικά) της αρχικής επένδυσης

Ra η παρούσα αξία των ανανεώσεων (δαπάνες που γίνονται κάθε χρόνο για ανανέωση της παράγωγής και των φθαρμένων εξαρτημάτων κτλ)

Rp οι πρόσοδοι το έτος p

Dp οι δαπάνες λειτουργίας για το έτος p [25]

Θα μπορούσαμε αν το αρχικώς καταβληθέν ποσό είχε γίνει από δανεισμό να αφαιρέσουμε από την σχέση τους τόκους που πρέπει να πληρώνονται κάθε χρόνο από το αρχικό κεφάλαιο (το ποσό του κεφαλαίου που δημιουργήθηκε από δανεισμό έτσι και αλλιώς είναι ατόφιο ενσωματωμένο στο Ia).

Έτσι λοιπόν αν οι πρόσοδοι είναι υπολογισμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι απόλυτα συμβατοί με μια τιμολόγηση που να καθιστούν το προϊόν ανταγωνιστικό σε σχέση με άλλα, τότε όσο μεγαλύτερο και όσο πιο θετική (μεγάλη) είναι η απόδοση, τόσο πιο συμφέρουσα είναι αυτή η επενδυτική επιλογή. Το επιτόκιο όπου έχουμε είναι το επιτόκιο που βάζει κάθε επενδυτής για να κατάδειξη ότι η καλλίτερη του επιλογή αποταμίευσης η επένδυσης θα του απέδιδε απόδοση ετήσια όση με το επιτόκιο αυτό. Η ευαισθησία της απόδοσης στο επιτόκιο, στον χρόνο, στις παραμέτρους που επηρεάζουν το κόστος είναι θέμα διαφορικού λογισμού ώστε να δούμε τι επίδραση έχει μια εκτιμώμενη μεταβολή στην τιμή της απόδοσης. Τέτοια ανάλυση γίνεται και στην ανάλυση ευαισθησίας του κόστους. Ορίζοντας τα κόστη έχουμε τις εξής έννοιες :

TC = το συνολικό κόστος για μια παραγωγή Q

AC = Το μέσο κόστος η μοναδιαίο κόστος για παραγωγή Q

MC = Η αλλαγή του κόστους του προϊόντος για μοναδιαία μεταβολή της παραγωγής

AFC = Το κόστος ανά μονάδα προϊόντος για σταθερές εισροές K

AVC = Το κόστος ανά μονάδα προϊόντος για μεταβλητές εισροές

TFC = Το συνολικό κόστος βασισμένο σε σταθερές εισροές K

TVC = Το συνολικό κόστος βασισμένο σε μεταβλητές εισροές I

Οι σχέσεις που συνδέουν τα διάφορα αυτά κόστη είναι :

$$TC = TFC + TVC$$

$$AC = AFC + AVC$$

$$MC = \frac{\Delta TC}{\Delta Q}$$

$$AFC = \frac{TFC}{Q}$$

$$AVC = \frac{TVC}{Q}$$

Όταν το μεταβλητό κόστος ανά μονάδα προϊόντος γίνει ίσο με το οριακό κόστος $MC=AVC$ τότε έχουμε το μικρότερο AVC , ενώ όταν μέσο κόστος γίνει ίσο με το οριακό κόστος $MC=AC$ τότε έχουμε το $minimum$ του μέσου κόστους.

Το συνολικό κόστος μπορεί να παρασταθεί από διάφορες καμπύλες που η συνάρτησή τους έχει κάποιους μεταβλητούς συντελεστές ώστε να περιγράψουν καλύτερα την μεταβολή του κόστους ως προς την ποσότητα του προϊόντος ανάλογα με την παραγωγική διαδικασία, μέθοδο, τεχνολογία κλπ.

Υπάρχουν τρεις ομάδες [31]:

a) Η κυβική $TC = a + b * Q + c * Q^2 + d * Q^3$

b) Η τετραγωνική $TC = a + b * Q + c * Q^2$

c) Η γραμμική $TC = a + b * Q$

Το ποια θα χρησιμοποιηθεί σχετίζεται με την εκτίμηση του τρόπου εξέλιξης του κόστους σε σχέση με την πραγματική παραγωγή.

Το συνολικό κόστος του μεταλλικού αφρού $TC=Q*C$ μπορεί να εξισωθεί με κάποια από τις τρεις ομάδες και να βρεθούν οι συντελεστές a, b, c, d με την μεθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Ποια από αυτές όμως προσεγγίζει καλύτερα τις τιμές του κόστους; αυτή που ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης είναι μεγαλύτερος.

Στην πράξη η τελευταία συνάρτηση κόστους που από το πρώτο σχεδιάγραμμα αφήνεται να εννοηθεί ότι ισχύει στην περίπτωση των τριών μεθόδων παραγωγής των μεταλλικών αφρών, δεν ισχύει για όλο το εύρος της παράγωγης γιατί από κάποια παραγωγή και πάνω αυξάνεται. Απλά σε κάποιες εφαρμογές και ανάλογα με την δυναμικότητα της βιομηχανίας, αυτό μπορεί να είναι πεπλατυσμένο έχοντας καλή προσαρμογή της γραμμικής συνάρτησης του συνολικού κόστους για ευρεία μεταβολή της παραγωγής.

Το μοναδιαίο κόστος για τις τρεις ομάδες προκύπτει ως [31] :

$$a) AC = \frac{TC}{Q} = \frac{a}{Q} + b + c * Q + d * Q^2$$

$$b) AC = \frac{a}{Q} + b + c * Q$$

$$c) AC = \frac{a}{Q} + b$$

Το a βλέπουμε εκφράζει ατόφιο το σταθερό κόστος ενώ οι υπόλοιποι συντελεστές είναι συντελεστές του μεταβλητού κόστους.

Το οριακό κόστος για την περίπτωση της γραμμικής συνάρτησης κόστους είναι [31]:

$$MC = \frac{\Delta TC}{\Delta Q} = [a + b * (Q + 1) - a - b * Q] = b$$

Ενώ για την περίπτωση της τετραγωνικής συνάρτησης κόστους είναι :

$$\begin{aligned} MC &= \frac{\Delta TC}{\Delta Q} = a + b * (Q + 1) + c * (Q + 1)^2 - a - b * Q - c * Q \\ &= b + c * Q^2 + c * 2Q + c - c * Q^2 \\ &= b + 2 * Q * c + c \end{aligned}$$

$$MC = b + c * 2 * (Q + 1)$$

16.3. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΔΥΟ Η ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΕΣ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΜΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΑΞΙΑΣ

Έστω ότι έχουμε δύο ή περισσότερες παραμέτρους του μεταλλικού αφρού και μια συνθήκη που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί (πχ στην εύρεση των διαστάσεων και της πυκνότητας του πυρήνα δόμων σάντουιτς έχουμε 2 ανεξάρτητες παραμέτρους 2 διαστάσεων ή μιας διάστασης και της πυκνότητας και λειτουργική συνάρτηση προς βελτιστοποίηση αυτήν του βάρους).

Έστω παράμετροι : P_1, P_2, \dots, P_i ...και η συνάρτηση άξιας (μπορεί να είναι και μη γραμμική)

$$V = a_1 * P_1 + a_2 * P_2 + \dots + a_i * P_i + \dots$$

Οι συντελεστές είναι εναλλασσόμενες σταθερές a, b, c

Η συνάρτηση V είναι αυτή που επιδιώκεται να μεγιστοποιηθεί ή να ελαχιστοποιηθεί προκειμένου να βρεθούν σε καρτεσιανό σύστημα i διαστάσεων τα διανύσματα $[P_1, P_2, P_i]$ μέσω μιας σταθερής ιδιότητας πχ δυσκαμψίας.

Με βάση τα διαθέσιμα υλικά και εφαρμογές κάποια υλικά μπορούν να υποκαταστήσουν το τρέχον υλικό, με απαραίτητη συνθήκη το νέο υλικό να έχει μικρότερο V από ότι το υλικό που επιδιώκεται να αντικατασταθεί. Έτσι πρέπει :

$$V_{new} - V_{current} \leq 0$$

ΜΕΡΟΣ Β

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

17. ΠΡΩΤΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Αυτό το μέρος περιγράφει την πειραματική διαδικασία και τα συμπεράσματα εμπλουτισμένα με την ήδη υπάρχουσα γνώση άλλα και σύγκριση ή επιβεβαίωση από την ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία.

Θα εξεταστεί ο σχηματισμός αφρών ανοικτών κελιών παρασκευασμένων από κόνεις με μητρικό υλικό το χαλκό (Cu στενού εύρους διαμετρών κόκκων λεπτών), αποπλενόμενα πληρωτικά μέσα, καστανή ζάχαρη (με ένα μεγαλύτερο εύρος μεγέθους κόκκων, σαφώς μεγαλύτερων από το μέγεθος των κόκκων του χαλκού) και κρυσταλλική άσπρη ζάχαρη (με μέγεθος κόκκων αρκετά μικρότερο από αυτό της καστανής, με πιο στενό εύρος μεγέθους κόκκων και πιο ομοιόμορφη κατανομή). Ενδεικτικά, η καστανή ζάχαρη, λαμβάνοντας μετρήσεις με μικροσκόπιο, έχει διαστάσεις που εκτείνονται από 500 μm μέχρι 1500 μm ή και άνω (τουλάχιστον αυτές που μετρηθήκαν) οι μεγάλες διαστάσεις, ενώ οι μικρές διαστάσεις φτάνουν μέχρι 700 μm περίπου, ενώ η άσπρη κρυσταλλική έχει μέγεθος περίπου 150-500 μm.



Η πρώτη φάση είναι η παρασκευή τριών δοκιμών με καστανή ζάχαρη, όπου η αναλογία κατ' όγκο χαλκού και καστανής ζάχαρης είναι 40%Cu-60% καστανή

ζάχαρη(RAW SUGAR) και τριών δοκιμίων χαλκού –κρυσταλλικής ζάχαρης 40%Cu-60%κρ. Ζάχαρης, με στόχο να αναδευθούν καλά και να συμπιεστούν σε πρέσα σε κυλινδρικά δοκίμια, των όποιων το ακριβές πάχος καθορίζεται, όπως θα δούμε στις μετρήσεις, από την πίεση για την ίδια συνολική ποσότητα και αναλογία κόνεων. Επίσης η διάμετρος τους θα είναι βασικά ορισμένη από την διάμετρο της μήτρας, στην οποία θα τοποθετηθεί το μείγμα. Περιμένουμε να δουμε μια μικρή απόκλιση από την εσωτερική διάμετρο της μήτρας λόγω ελαστικής επαναφοράς του συμπιέσματος χαλκού- καστανής ζάχαρης που θα διαφοροποιείται ανάλογα με την τάση που ασκείται στο δοκίμιο και την διαδρομή που ακολουθεί η αποφόρτιση. Θα κάνουμε συμπίεση με διαφορετικά φορτία σε κάθε δοκίμιο που περιέχει την καστανή ζάχαρη.

Για τον σχηματισμό των μειγμάτων και την κατ όγκο αναλογία χαλκού - ζάχαρης χρησιμοποιούμε μια μεζούρα γνωστού (εξαγόμενου από τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά) όγκου : $V_{μεζ.} = 60 * 10^{-6} m^3$ και την γεμίζουμε όλη με κάθε υλικό μας, βρίσκοντας τα αντίστοιχα βάρη (έχοντας αφαιρέσει από την ένδειξη το βάρος της ίδιας της μεζούρας) του χαλκού , της καστανής ζάχαρης και της κρυσταλλικής λεύκης που γεμίζουν τον όγκο της. Στην συνέχεια διαιρούμε τα βάρη αυτά με τον όγκο της μεζούρας βρίσκοντας την προφανή πυκνότητα από το βάρος που καταλαμβάνει τον συγκεκριμένο όγκο, η οποία διαφέρει από την θεωρητική πυκνότητα του υλικού καθώς υπάρχουν πόροι σε κάθε σκόνη και δεν υπάρχει ατόφιο υλικό (χαρακτηριστικό των κόνεων).



Ε.Π.1-2. ΑΡΙΣΤΕΡΑ: ΖΥΓΑΡΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ 1/1000 ΤΟΥ ΓΡΑΜΜΑΡΙΟΥ

Την πυκνότητα αυτή θα την συμβολίσουμε ως : ρ_{π}

Τα βάρη που βρήκαμε μετά από την μέτρηση, μετά από αφαίρεση του βάρους της μεζούρας $m_{Μεζ} = 13,6gr$ είναι :

- Βάρος χαλκού $W_{Cu} = 150,5 gr$
- Βάρος καστανής ζάχαρης : $W_{κζ} = 50gr$

- Βάρος κρυσταλλικής ζάχαρης : $W_{\text{κρ.ζ.}} = 49,4 \text{ gr}$

Η προφανής πυκνότητα λαμβάνεται ως $\rho_{\text{π}} = \frac{W}{V_{\text{μεζ}}}$ και για κάθε υλικό είναι

Υλικό	βάρος (gr)	όγκος (cm^3)	$\rho_{\text{π}} \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$	$\rho_{\text{th}} \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$
Χαλκός	150,5	60	2,508	8,96
καστ. Ζάχαρη	49,4	60	0,823	1,587
κρυστ. Ζάχαρη	50	60	0,833	1,587

ΠΙΝΑΚΑΣ Π-1-1: ΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΗΣ ΚΑΣΤΑΝΗΣ, ΤΗΣ ΑΣΠΡΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ, ΤΟΥ ΧΑΛΚΟΥ, ΣΕ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΟ ΟΓΚΟ ΚΑΙ ΕΥΡΕΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΦΑΝΟΥΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ

Διαπιστώνουμε ότι η άσπρη κρυσταλλική ζάχαρη έχει μεγαλύτερη προφανή πυκνότητα από την καστανή, άλλα έχουν μικρή διάφορα της τάξης $0,01 \text{ gr/cm}^3$. Η πυκνότητα του κρύσταλλου της ζάχαρης ανέρχεται στα $1,587 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$. Στη βιβλιογραφία [23,Wikipedia] βλέπουμε ότι η χαλαρή ζάχαρη (χωρίς συμπίεση) έτσι όπως βρίσκεται σε μια συσκευασία ή σε ένα κουτί είναι για χονδρόκοκκη $0,84 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$ και για λεπτόκοκκη $0,88 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$.

Η προφανής πυκνότητα της σκόνης χαλκού που μετρήσαμε είναι κατά πολύ χαμηλότερη από την πυκνότητα του χαλκού σε μασίφ μορφή $\rho_{\text{thCu}} = \frac{8,96 \text{ gr}}{\text{cm}^3}$ και όπως παρατηρούμε από τον πίνακα λαμβάνεται ως : $\rho_{\text{π. cu}} = 2,508 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$

Επιλέγουμε να δημιουργήσουμε μείγματα που έχουν αναλογία όγκου κόνεων χαλκού - ζάχαρης 40%Cu/60%ζαχ κ.ο., και καταλαμβάνουν όγκο της μεζούρας 17 cm^3 και αφού έχει υπολογιστεί η προφανής πυκνότητα, η ποσότητα του υλικού θα είναι ανάλογη της προφανούς πυκνότητας επί τον όγκο που επιλέξαμε να λάβουμε επί της μεζούρας επί το ποσοστό του εν λόγω του υλικού που θα υπάρχει στο μείγμα.

$$M = (a\%) * \rho_{\text{π}} * \text{volume}$$

([μάζα κόνης] * [προφανής πυκνότητα κόνης] * [ποσοστό κατ' όγκο κόνης] = [μάζα κόνης])

- ΜΑΖΑ χαλκού : $m_{\text{cu}} = (40\%) * 2,508 * 17 \text{ gr} = 17,0544 \text{ gr}$
- ΜΑΖΑ καστανής ζάχαρης : $m_{\text{brsug}} = (60\%) * 0,823 * 17 \text{ gr} = 8,3946 \text{ gr}$
- Συνολική μάζα μείγματος : $m_{\text{t cu-brsug}} = m_{\text{brsug}} + m_{\text{cu}} = 25,449 \text{ gr}$

Η μάζα του κάθε συστατικού και η συνολική δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Υλικό	όγκος (cm^3)	$\rho_{\pi} \left(\frac{gr}{cm^3} \right)$	Αναλογία(%)	μάζα κόνεων (gr)
Χαλκός	17	2,508	40	17,0544
καστ. Ζάχαρη	17	0,823	60	8,3946
σύνολο				25,449

ΠΙΝΑΚΑΣ Π.1-2: Η ΜΑΖΑ ΤΟΥ ΧΑΛΚΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΣΤΑΝΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ ΓΙΑ ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΚΟΝΕΩΝ 40%Cu/60%ΚΑΣΤΑΝΗΣ

Η ίδια διαδικασία οδηγεί στον υπολογισμό των μαζών για τα άλλα τρία δοκίμια χαλκού - κρυσταλλικής άσπρης ζάχαρης με την ίδια αναλογία Cu-crwsug 40/60. Τα αποτελέσματα δίνονται πινακοποιημένα όπως και πάνω :

υλικό	όγκος (cm^3)	$\rho_{\pi} \left(\frac{gr}{cm^3} \right)$	αναλογία	μάζα κόνεων (gr)
Χαλκός	17	2,508	0,4	17,054
άσπρη κρυσταλλική	17	0,833	0,6	8,496
Σύνολο				25,551

ΠΙΝΑΚΑΣ Π.1-3: Η ΜΑΖΑ ΤΟΥ ΧΑΛΚΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΣΤΑΝΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ ΓΙΑ ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΚΟΝΕΩΝ 40%Cu/60%ΑΣΠΡΗΣ

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι όγκοι των κόνεων έχουν ληφθεί μαζί με το πορώδες που έχουν τη στιγμή που μετρήθηκαν στην μεζούρα και αυτό το πορώδες δεν είναι μικρό, γεγονός που καταδεικνύεται από τις διαφορές της πραγματικής πυκνότητας των υλικών σε σχέση με την προφανή.

Επίσης η ανάδευση πρέπει να είναι πολύ καλή, καθώς όσο καλύτερη είναι, τόσο μεγαλύτερη ομοιομορφία μίγματος επιτυγχάνεται.

ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΚΟΝΕΩΝ (ΣΥΝΕΝΩΣΗ)

Τα μείγματα καστανής και λευκής ζάχαρης συμπιέζονται σε τρεις διαφορετικές πιέσεις, σε πρέσα, τα οποία εισάγουμε σε μια μήτρα και έπειτα ασκούμε πίεση με περιορισμό στα πλευρικά τοιχώματα (συγκεκριμένη διάμετρος μήτρας) και αξονικό ασκούμενο φορτίο. Στις κόνεις με την καστανή ζάχαρη εφαρμόσαμε φορτίο 150, 200, 250 KN, όπου διαπιστώθηκε ότι το τελευταίο δοκίμιο έσπασε, ενώ με την άσπρη κρυσταλλική εφαρμόσαμε πιέσεις 100 , 150 , 200 KN, όπου το δοκίμιο που συμπιέστηκε στα 150 KN έσπασε, ενώ αυτό των 200 KN ράγισε.

Από την μέτρηση του ύψους κάθε δοκιμίου για τις πιέσεις που μελετώνται βρίσκεται ότι μειώνεται το ύψος τους. Είναι γνωστό ότι η συμπίεση της ζάχαρης δεν

μεταβάλλεται, ενώ η λεπτόκοκκη πούδρα του χαλκού συνεχίζει να συνενώνεται και να συμπιέζεται ελαττώνοντας το μακροπορώδες του, αφού καλύπτονται ολοένα και περισσότερο οι πόροι από υλικό.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η πρέσα που χρησιμοποιήσαμε, όπου διακρίνονται η μήτρα και το έμβολο :



Ε.Π.1.3: αριστερά :Πρέσα όπου συμπιέστηκαν οι κόνεις του πρώτου κύκλου πειραμάτων, διακρίνονται η μήτρα, το έμβολο , δεξιά : ο τύπος , το μέγιστο φορτίο , η προέλευση και η μάρκα της πρέσας

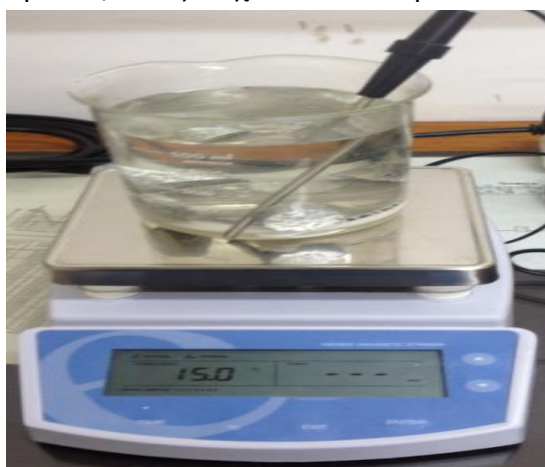
Τα εξαρτήματα της μήτρας φαίνονται παρακάτω, όπου το πρώτο είναι η βάση της μήτρας που εδράζεται στην τράπεζα της πρέσας και φέρει κυκλικό άξονα που εισχωρεί στην οπή της μήτρας, ενώ το δεύτερο ευθυγραμμίζει τα άλλα δύο εξαρτήματα μεταξύ τους και με το έμβολο της πρέσας.



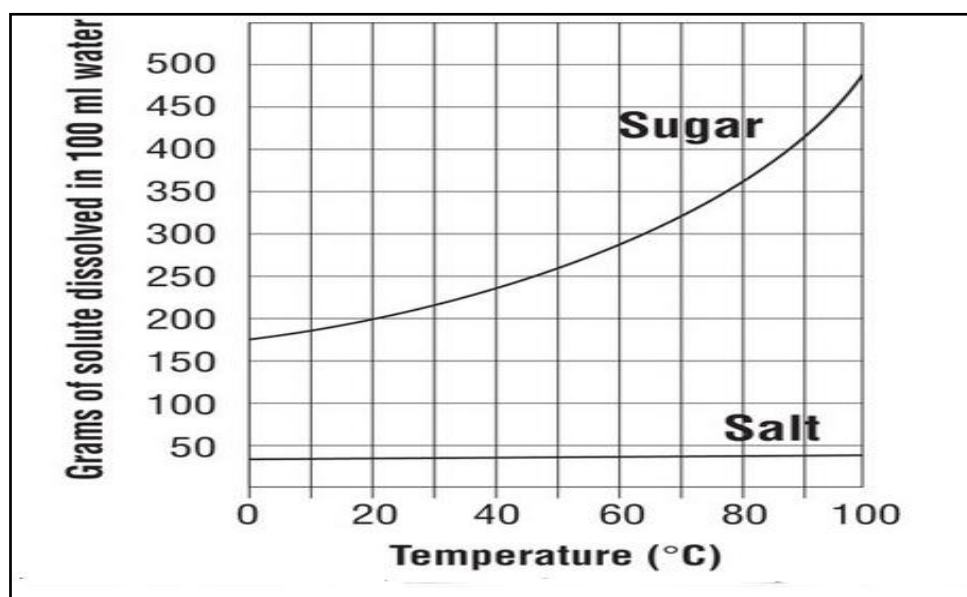
Ε.Π.1-4: εξαρτήματα μήτρας, η συναρμολογημένη μήτρα

Έπειτα τοποθετούνται οι συνενωμένες κόνεις σε ένα δοχείο με μαγνητικό θερμαινόμενο αναδευτήρα. Το μαγνητικό πεδίο του αναδευτήρα οδηγεί το ραβδί να περιστραφεί κάτω από την επίδραση της ροπής που αναπτύσσεται σε αυτό. Επίσης το ραβδί καλύπτεται από ένα πλεγματικό κυάθιο για να διαφυλάξει την ελεύθερη περιστροφική κίνηση του ραβδίου, από την μια, και την επαφή με το δοκίμιο, από την άλλη. Η κίνηση αυτή δημιουργεί μια κίνηση του μέσου απόπλυσης σαν και αυτή της δίνης, η οποία προσκρούει στο δοκίμιο γεμίζοντας τους πόρους με νερό, διαλύοντας και απομακρύνοντας την καστανή και άσπρη κρυσταλλική ζάχαρη.

Η συσκευή φέρει ηλεκτρονικό δείκτη θερμοκρασίας, ο οποίος με ένα θερμόμετρο που μπορεί να ενωθεί με την συσκευή μας, δείχνει την θερμοκρασία ανάδευσης (στοιχείο σημαντικό καθώς η διαλυτότητα είναι μια ιδιότητα που επηρεάζεται άμεσα από την θερμοκρασία, όπως δείχνει και το παρακάτω διάγραμμα.



ΕΙΚΟΝΑ Π.1-5 : ΘΕΡΜΑΙΝΟΜΕΝΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΑΝΑΔΕΥΤΗΤΡΑΣ



Δ. Π.1-1 : Διάγραμμα αριθμού κόκκων επιτραπέζιας ζάχαρης που διαλύονται σε 100 ml νερού με εξαρτημένη παράμετρο την θερμοκρασία

Παρόλο που το αλάτι είναι διαλυτό στο νερό, έχει μικρότερη διαλυτότητα απ' αυτήν της ζάχαρης στο εύρος τιμών θερμοκρασιών 0-100 °C. Σε σχέση με την ζάχαρη παρατηρείται ότι το αλάτι έχει διαλυτότητα περίπου στο 20% της ζάχαρης, ενώ στους 100°C η διαλυτότητα της ζάχαρης είναι πάνω από 10 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του αλατιού (επίσης η ζάχαρη δεν επιταχύνει την ανάπτυξη οξέων, όπως το αλάτι διαβρώνοντας το μέταλλο ούτε υποκαθίσταται κάποιο στοιχείο της με αυτό του μετάλλου).

Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό των ουσιών προς διάλυση είναι το σημείο τήξης τους. Το σημείο τήξης είναι σημαντικό στοιχείο για το μέγεθος πόρων και την διαδικασία της αφροποίησης και της διαδοχής των διαφόρων φάσεων της διαδικασίας (απόπλυση και έπειτα πυροσυσσωμάτωση ή το ανάποδο). Η θερμοκρασία τήξης της καστανής και της λευκής κρυσταλλικής ζάχαρης είναι 160°C , 186°C αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι η ζάχαρη θα καεί στις θερμοκρασίες, στις οποίες πρόκειται να πυροσυσσωματωθεί ο αφρός μας, αλλά ακόμα κι αν έχουμε πλήρως προστατευμένη ατμόσφαιρα, σίγουρα οι πόροι θα αλλοιωθούν ως προς την αρχική μορφή των κόκκων της ζάχαρης, γιατί θα έχουμε στην καλύτερη περίπτωση, υγροποίηση της ζάχαρης, διαρροή της από τους πόρους και αρά διαφοροποίηση επίσης από την μορφή και το μέγεθος του πορώδους που θα είχαν αν το πληρωτικό μέσο ήταν στέρεο με την κρυσταλλική μορφή που παίρνει στην συνένωση. Η σκληρότητα της ζάχαρης είναι σημαντικά υψηλότερη σε σχέση με αυτή του χαλκού με μέγεθος περίπου 1,5 Gpa ενώ η σκληρότητα του χαλκού 300 Mpa έτσι μετά την ελαστική παραμόρφωση της ο χαλκός δεν διαμορφώνει το σχήμα αυτής αλλά οι κρύσταλλοι της ζάχαρης διαμορφώνουν το σχήμα του μετέπειτα πορώδους όπως και παρατηρήθηκε.

Να επισημανθεί ότι η σκληρότητα δεν σημαίνει ότι η ζάχαρη σπάει δυσκολότερα σε υψηλές μονοαξονικής φορτίσεις αλλά ότι σε συνθήκες τριαξονικής φόρτισης εισχωρεί πιο εύκολα στον χαλκό σε σχέση με την εισχώρηση του χαλκού σε αυτή που αποδείχθηκε από παρατήρηση ότι δεν συμβαίνει

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων συμπίεσης είδαμε ότι η ζάχαρη που είναι ένα μη όλκιμο (ψαθυρό) και σκληρό υλικό, κάνει το δοκίμιο να θραύει απότομα σε υψηλές τάσεις συμπίεσης μετά την απελευθέρωση από το φορτίο συμπίεσης της πρέσας. Αυτό φαίνεται από την ξαφνική θραύση, σχεδόν οριζόντια (άσπρη κρυσταλλική) , και οριζόντια σχεδόν στην βάση επαφής με την πρέσα (καστανή). εξήχθη στο συμπέρασμα ότι η ζάχαρη δημιουργεί ένα συμπέσμα που σπάει ακαριαία μετά την απελευθέρωση του θλιπτικού φορτιού σε σχέση με το αν αυτό ήταν χαλκός γιατί με μια μικρή επιπλέον παραμόρφωση οδηγείται το δοκίμιο σε θραύση χωρίς προειδοποίηση δίνοντας οριζόντιες σχεδόν για υψηλές πιέσεις (ελαφρά κυματοειδείς στο δοκίμιο της άσπρης) επιφάνειες. Η επιφάνεια είναι σχεδόν καθετή στην επιφάνεια της εφαρμογής της δύναμης και έχει χαρακτηριστική κοκκώδη μορφή. Η ζάχαρη σαν πιο σκληρό υλικό αλλά και υλικό που μπορεί να παραλαμβάνει σημαντικές ελαστικές τάσεις, μεγαλύτερες από αυτές του χαλκού, οδηγεί κατά την απομάκρυνση της πρέσας σε ασκούμενες παραμένουσες εφελκυστικές τάσεις στον χαλκό, υποβοηθώντας την ανάπτυξη ρωγμών και οδηγώντας σαν υποβοηθητικός παράγοντας σε θραύση.

Κατά την διαδικασία απόπλυσης παρατηρήσαμε ότι κόκκοι ή συσσωμάτωμα κόκκων υλικού αποκολλάται κυρίως όταν μεταφέρονται δονήσεις από την κίνηση του ραβδίου, κατά την μετακίνηση και ελαφριά πρόσκρουση των δοκιμίων και κατά την έντονη αλλαγή της κινητικής κατάστασης του ρευστού που προσκρούει πάνω στα

δοκίμια. Γι' αυτό καλύτερο είναι να έχει αποκατασταθεί η κίνηση του ραβδίου και μετά να τοποθετούμε προσεκτικά ένα δοκίμιο μέσα στον υδατικό διαλύτη. Η υδατοδιάλυση της ζάχαρης στους 25°C για μισή ώρα δεν είναι πλήρης καθώς κατά την διάρκεια αφαίρεσης της υγρασίας στον φούρνο, παρατηρούμε εξώθηση της ζάχαρης προς το εξωτερικό των πόρων. Η ποσότητα αυτή ήταν σημαντική, γι' αυτό επιλέξαμε να την αφαιρέσουμε με δεύτερη απόπλυση στους 60°C για 45 λεπτά.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ποσοτητα εναπομείνας άσπρης κρυσταλλικής ζάχαρης στα δοκίμια ήταν σημαντικά μικρότερη σε σχέση με την ποσότητα της καστανής πριν την δεύτερη απόπλυση. Η διαδικασία πριν την δεύτερη υδατοδιάλυση περιελάμβανε καθαρισμό της ζάχαρης από το καμένο μέρος της και ξανά υδατοδιάλυση στον χρόνο και τις συνθήκες που προαναφέρθηκαν.

Μετά την υδατοδιάλυση του πληρωτικού μέσου θερμαίνονται τα δοκίμια για να φύγει η υγρασία τους και να απομακρυνθεί τυχόν ποσότητα της υπολειπομένης ζάχαρης στους 110 °C σε φούρνο. Παρατηρούμε ότι μετά από μισή ώρα ανάδευσης παραμένει ζάχαρη στα δοκίμια καθώς κατά την θέρμανση, η υγρασία που είχαν τα δοκίμια διάλυσε περεταίρω την ζάχαρη και την εξώθησε λόγω εσωτερικών τάσεων από τους ατμούς της υγρασίας σε συνδυασμό με την υγρή φάση, στην οποία βρέθηκε. Το θετικό με την ζάχαρη είναι ότι τυχόν υπολείμματα ζάχαρης, δεν οδηγούν σε χημική διάβρωση ενώ θα καούν κατά την πυροσυσσωμάτωση παράγοντας κυρίως CO₂ και H₂O, ενώ η ποσότητα άλλων ενώσεων θα είναι πολύ μικρή.

Η πυροσυσσωμάτωση θα είναι στέρεας φάσης και αυτό γιατί η υγρής φάσης πυροσυσσωμάτωση θα ενίσχυε σε μεγάλο βαθμό την συρρίκνωση των πόρων οδηγώντας σε έντονη μεταβολή την διάμετρο των πόρων και του σχήματός τους. Άρα για την διαμόρφωση πιο στέρεων μεταλλικών δεσμών, χωρίς όμως να υπάρχει σημαντική διάχυση μετάλλου στους μακροπόρους, πρέπει να γίνει πυροσυσσωμάτωση κάτω από το σημείο τήξης, παρόλο που η τήξη στον ίδιο χρόνο πυροσυσσωμάτωσης οδηγεί σε πιο ισχυρούς μεταλλικούς δεσμούς.

Η επιλογή πυροσυσσωμάτωσης στέρεας φάσης προϋποθέτει αυξημένο χρόνο παραμονής του δοκιμίου σε αυτή την θερμοκρασία. Επιλέγουμε βάζοντας το δοκίμιο στον φούρνο να αυξήσουμε την θερμοκρασία κατά 8 με 9 °C/*min* από τους 17°C μέχρι τους 800 °C και αυτό επετεύχθη σε χρόνο 94'. Στη συνέχεια κρατάμε τα δοκίμια σε αυτή την θερμοκρασία για 4 ώρες και αφήνουμε να ψηχθούν μέσα στον φούρνο. Η όλη διαδικασία έγινε σε φούρνο μερικής προστατευμένης ατμόσφαιρας Αργού, τύπου Thermalwaltt, όπου είχαμε ρυθμίσει την ταχύτητα θέρμανσης μέχρι τους 800°C. Το Αργό διοχετεύεται στο φούρνο από μπουκάλα μεγάλης καθαρότητας υγρού Αργού και η πυροσυσσωμάτωση γίνεται υπό ατμοσφαιρική πίεση.



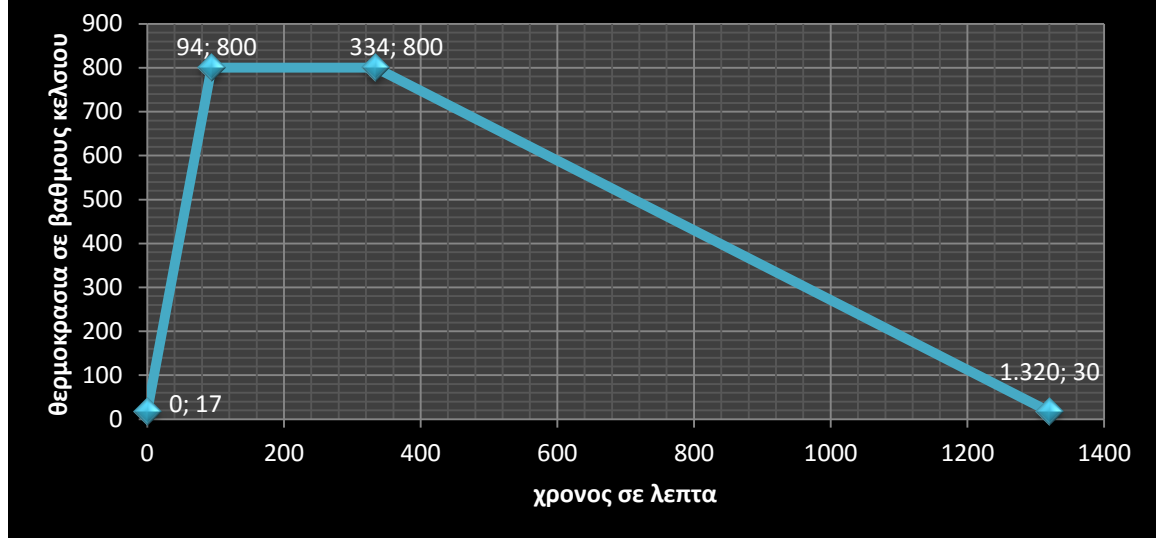
Ε.Π.1-6: ΑΡΙΣΤΕΡΑ : το εσωτερικό του φούρνο με τις 12 ηλεκτρικές αντιστάσεις , ΔΕΞΙΑ : Ο φούρνος και η φιάλη Αργού

Παρακατω δίνουμε πινακοποιημένα και σε διάγραμμα την εξέλιξη της πυροσυσσωμάτωσης με ανεξάρτητη μεταβλητή τον χρόνο και εξαρτημένη την θερμοκρασία :

πυροσυσσωμάτωση δοκιμίων αφρού χαλκού	χρόνος (min)	Θερμοκρασια (°C)	ρυθμός μεταβολής θερμοκρασιας ($\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$)
εισαγωγή στον φουρνο -θέρμανση	0	17	8,33
Άνοδος της θερμοκρασιας-αρχη παραμονής	94	800	
τερματισμός παραμονής-αρχη ψύξης	334	800	0,77
τέλος ψύξης	1350	30	

ΠΙΝΑΚΑΣ.Π.1-4: ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΥΡΟΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ

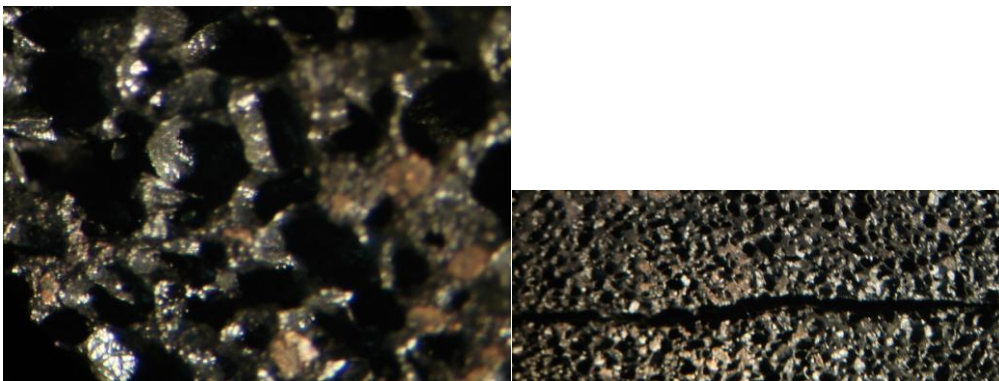
πυροσυσσωμάτωση δοκιμίων αφρού χαλκού στους 800 οC για 4 h



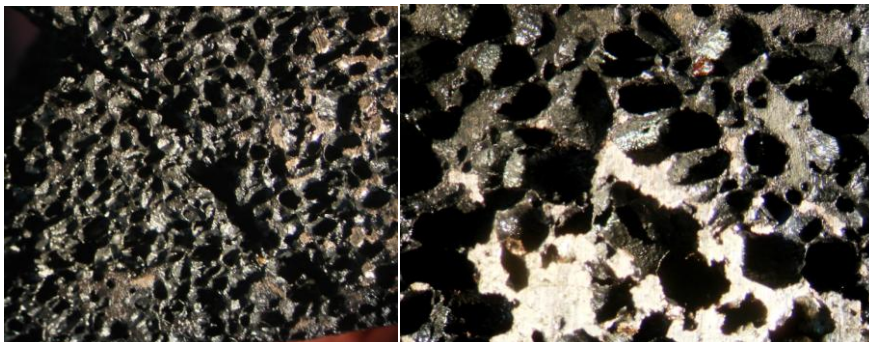
ΓΡΑΦΗΜΑ Π. 1-1: ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΥΡΟΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ

Σε μηχανή κοπής τροχού κόψαμε στη μέση τα δοκίμια μας, στη μέση της κυκλικής επιφάνειας και παρατήσαμε σε οπτικό μικροσκόπιο το πορώδες, τις αστοχίες και τα ελαττώματα που πρόέκυψαν κατά την διαδικασία συνένωσης – πυροσυσσωμάτωσης.

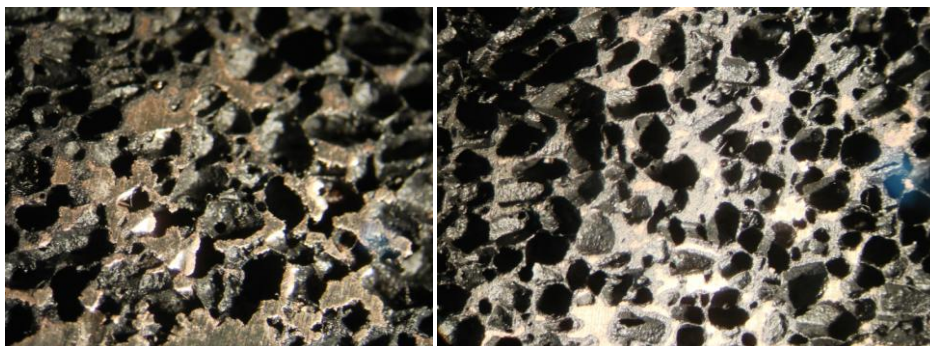
Παρακάτω βλέπουμε την απεικόνιση των 3 δοκιμίων άσπρης κρυσταλλικής ζάχαρης και των 3 δοκιμίων καστανής ζάχαρης.



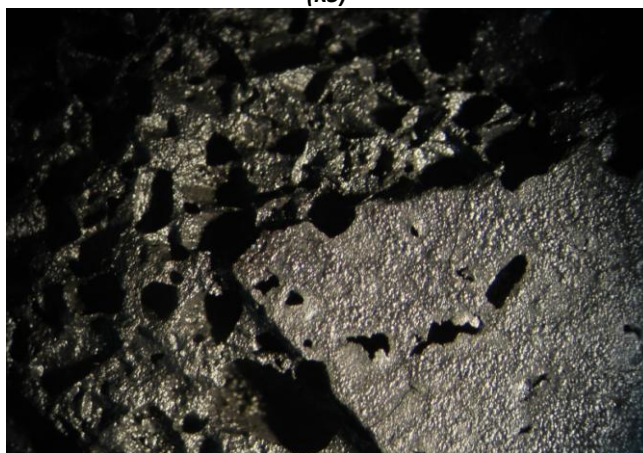
Ε.Π. 1.7 α) Αριστερά: δοκίμιο άσπρης κρυσταλλικής για φορτίο πρέσας 100 KN (A1), ΔΕΞΙΑ: δοκίμιο άσπρης κρυσταλλικής για φορτίο 150 KN (A2)



Ε.Π.1.7 β) ΑΡΙΣΤΕΡΑ: δοκίμιο άσπρης κρυσταλλικής για φορτίο 200 KN (Α3) ΔΕΞΙΑ: δοκίμιο καστανής για φορτίο 150 KN (Κ1)



Ε.Π.1-7 γ) ΑΡΙΣΤΕΡΑ: δοκίμιο καστανής για φορτίο 200 KN (Κ2) ΔΕΞΙΑ: δοκίμιο καστανής για φορτίο 250 KN (Κ3)



Ε.Π.1.8 δοκίμιο καστανής ζάχαρης για φορτίο 250 KN (Κ3) στο σημείο θραύσης

Ο παρακάτω πίνακας δίνει τα δοκίμια με το αντίστοιχο φορτίο τους και την πίεση συμπίεσης που ασκείται σε αυτά:

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΦΟΡΤΙΟ (KN)	ΠΙΕΣΗ (Mpa)
A1	100	203,82
A2	150	305,73
A3	200	407,64
K1	150	305,73
K2	200	407,64
K3	250	509,55

ΠΙΝΑΚΑΣ Π.1-5: ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ , ΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΙ Η ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗ ΠΙΕΣΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΤΟΥΣ

Η τάση συμπίεσης που εφαρμόζεται στις κόνεις χαλκού κυμαίνεται από 203 μέχρι 270 Mpa περίπου στην βιβλιογραφία, άρα περιμένουμε για μεγαλύτερη πίεση από αυτή να εμφανίζονται κάποιες ρωγμές ή κάποιου είδους αστοχίες.

Στο δοκίμιο A2 παρατηρούμε ότι το δοκίμιο έχει θραύσει στο πάνω μέρος προς το μέρος της πρέσας ολικά και οριζόντια, κάθετα στην εφαρμογή της πίεσης της πρέσας. Επίσης το τεμάχιο σπάει στα δυο πιο χαμηλά αλλά κατά το ήμισυ οριζόντια, επίσης κάθετα στην δύναμη εφαρμογής προς την πλευρά της μήτρας. Η αστοχία αυτή μπορεί να εξηγηθεί όπως αναφέρθηκε και παραπάνω από την μεγάλη ελαστική τάση της ζάχαρης που εφελκύνει τον χαλκό και είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την ελαστική τάση του χαλκού με αποτέλεσμα να γίνει σημαντική για μεγάλες πιέσεις και να οδηγούμαστε σε θραύση.

Αντιθέτως όμως με αυτό στο A3, παρατηρούμε μια ρωγμή 45 σχεδόν μοιρών στην μια άκρη της τομής του δοκιμίου που μπορεί να εξηγηθεί από την μέγιστη διατρητική τάση που εμφανίζεται σε αυτή την γωνία σε δοκιμές θλίψης και εμφανίζεται σε ψαθυρά υλικά, καθώς τα ψαθυρά υλικά είναι πιο ευαίσθητα σε διάτμηση.

Η ζάχαρη ψαθυροποιεί το συμπέσμα, ενώ η υπερβολική πίεση μπορεί να οδηγήσει σε σπάσιμο της ζάχαρης, με αποτέλεσμα να απελευθερωθεί η ελαστική ενέργεια της ζάχαρης και να επικρατήσει περισσότερο η αστοχία που εμφανίζεται στα ψαθυρά υλικά, δηλαδή η ρηγμάτωση σε 45 μοίρες.

Στα όλκιμα υλικά και γενικά στα μη ψαθυρά υλικά δεν ισχύει ότι η ρηγμάτωση θα εμφανιστεί εκεί που εφαρμόζεται η μεγαλύτερη διατμητική τάση αλλά μπορεί να εμφανιστεί ενδιάμεσα , υπάρχει δε η θεωρία ότι η ρωγμή εμφανίζεται εκεί που η καθετή τάση γίνει μέγιστη και η ρωγμή επεκτείνεται κατά διεύθυνση κάθετη προς αυτή την τάση.

Στις περιπτώσεις A2 , K3 ο μηχανισμός της θραύσης που υπερέχει είναι η τάση λόγω ελαστικής παραμόρφωσης της ζάχαρης που εφελκύνει τον χαλκό ενώ η στην περίπτωση A3, ο μηχανισμός είναι η ρηγμάτωση που λόγω της ψαθυροποίησης του συμπιέσματος εμφανίζεται εκεί που υπάρχει η μεγαλύτερη διατμητική τάση.

Το μέτρο ελαστικότητας, η αντοχή και η τάση διαρροής για δοκίμιο χαλκού σε μονοαξονική καταπόνηση όπου για καθαρό χαλκό είναι (πειραματικά δεδομένα)[36] :

UTS=217,1 Mpa

E=100 Gpa

$U_{el\ max} = 197\ KJ \frac{1}{cubic\ meter}$ (ελαστική ενέργεια) η οποία είναι μεγαλύτερη από αυτή του αλουμινίου και του μπρούντζου.

Από την συνένωση έχουμε παρατηρήσει ότι όσο μεγαλύτερη πίεση εφαρμόζουμε, τόσο μικραίνουν οι διαστάσεις των δοκιμών και αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη συμπίεση του χαλκού, καθώς η ζάχαρη είναι πιο σκληρή, άρα οι τάσεις έχουν υπερβεί την τάση διαρροής του χαλκού. Η παραλαβή τάσεων από την ζάχαρη και τον χαλκό σε συνδυασμό με τις εφελκύστηκες τάσεις που υπάρχουν μετά την συμπίεση καθορίζουν το παραμένον τασικό πεδίο του συμπίεσματος.

Η ρηγμάτωση μπορεί να οφείλεται σε πολλούς λόγους, όπως η μη σημαντική παραμονή υπό πίεση των κόνεων στην πρέσα υπό σταθερή πίεση.

Μετα την απόπλυση, το πορώδες του υλικού είναι σημαντικό για τον ορισμό του λόγου α για διαξονική καταπόνηση αλλά για μονοαξονική συμπίεση μπορεί να γίνει χρήση των απλοποιημένων μοντέλων GIBSON-ASBY όπου το $\phi=1$, καθώς θεωρούμε (προσεγγιστικά) ότι το υλικό βρίσκεται εξολοκλήρου στις ακμές ενώ υπάρχει κλειστό πορώδες αλλά υπάρχουν διαθέσιμα και σύνθετα μοντέλα που ενσωματώνουν μικτού τύπου κελιά με διαφορετικό λογο μάζας δοκίδων κελιού . Οι τιμές του μοντέλου αυτού μπορούν να συγκριθούν όσον αφορά την ελαστικότητα του αφρού ως προς αυτήν του χαλκού και της τάσης διαρροής του αφρού ως προς αυτήν του χαλκού. Όσο για τον συντελεστή, αυτός πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να προσομοιάζει με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (για την περίπτωση που έχουμε πληθώρα τιμών της σχετικής πυκνότητας). Εάν έχουμε μια τιμή τότε η προσέγγιση θα γίνει επακριβώς δίνοντας μια μεγαλύτερη απόκλιση για κάθε τιμή των σχετικών πυκνοτήτων.

Παρατηρώντας τα πυροσυσσωματωμένα δοκίμια διαπιστώθηκε ότι η οξείδωση είχε προχωρήσει από το πάνω μέρος και την πλαϊνή επιφάνεια που είχε άμεση επαφή με το οξυγόνο. Επίσης η πλευρά που κείτονταν στην χαλύβδινη πλάκα είχε μεγαλύτερο μέρος ανοξειδωτου χαλκού. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε δυο πράγματα: το ένα είναι ότι η οξείδωση προχωρεί από τα έξω προς τα μέσα, το οξυγόνο δυσκολεύεται να εισρεύσει από την κάτω πλευρά και το δεύτερο ότι (βασισμένο στις παρατηρήσεις) μεγαλύτερο ποσό χαλκού έχει την τάση να συγκεντρωθεί προς το κάτω μέρος του δοκιμίου κατά της διάρκεια της συνένωσης. (υπαρχει μικρότερο πορώδες και ανοξειδωτο μέρος).

Επιβάλλεται να υπάρχει τρόπος παρεμπόδισης της οξείδωσης και της επαφής οξυγόνου με τα δοκίμιο. Επίσης για τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, ο χρόνος και η θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης έχουν ευεργετικές επιδράσεις στις μηχανικές ιδιότητες των αφρών, εφόσον υπάρχει κατάλληλη ατμόσφαιρα από κάποιο

αδρανές αέριο, κατά προτίμηση σε υψηλή πίεση (πχ 10 bar) ή πολύ χαμηλή πίεση ατμόσφαιρας αέρα.

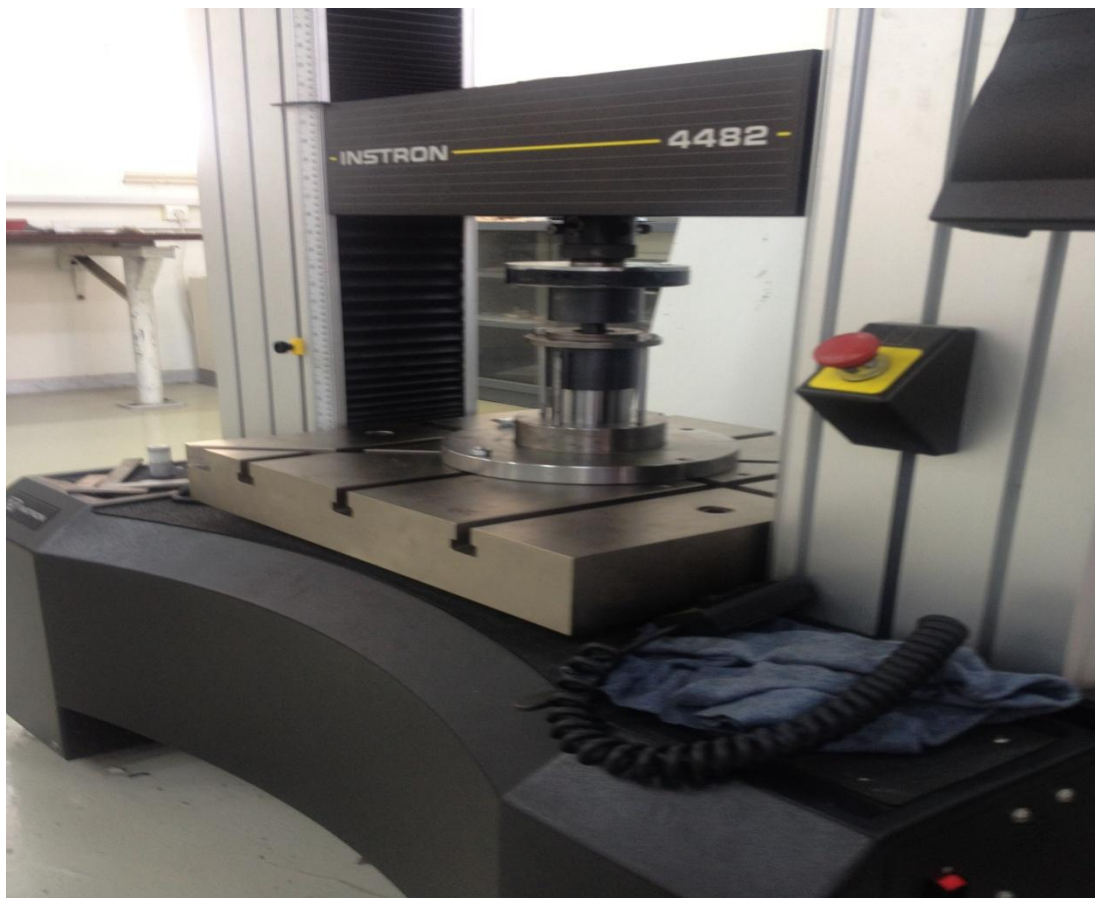
Οι θερμοκρασίες πυροσυσσωμάτωσης είναι αντιστρόφως ανάλογες με αυτές του χρόνου για ένα ίδιο περίπου αποτέλεσμα (αν και μεγαλύτερη θερμοκρασία επάγει μεγαλύτερη αντοχή)

Ένα συμπέρασμα που εξήχθη από την παραγωγή αφρών χαλκού κατά τον πρώτο κύκλο του πειράματος, καταδεικνύει ότι στα σημεία, στα οποία ακουμπά η μήτρα και η πρέσα τις κόνεις όταν αποπλένουμε το συμπέσμα, σχηματίζεται εξωτερικά ένα πυκνό υλικό με πολύ χαμηλό πορώδες σε σχέση με το εσωτερικό του αφρού και ιδιαίτερα στο κάτω μέρος.

18. Π.2. ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

.

Με την ίδια αναλογία ζάχαρης - χαλκού φτιάχνουμε 2 δοκίμια με άσπρη κρυσταλλική ζάχαρη και 2 με ακατέργαστη καστανή, εκ των οποίων το ένα ζεύγος δοκιμίων με ακατέργαστη και άσπρη δεν έχει συνδετικό μέσο ενώ η άλλη έχει συνδετικό μέσο αιθανόλη 1 ml. Για την παρασκευή των συνενωμένων κόνεων χρησιμοποιήσαμε πρέσα INSTRON ενώ για εξολκέα χρησιμοποιούμε ένα σκληρό πολυμερές υλικό. Αποδείχτηκε ότι η τριβή στα τοιχώματα του εξολκέα οδηγεί σε παραμόρφωση των τοιχωμάτων του, κάτω από την επίδραση επιφανειακών δυνάμεων τριβής που παραμορφώνουν την κάθετη στην δύναμη φόρτισης από την πρέσα επιφάνεια του εξολκέα. Όταν η δύναμη που ασκεί ο εξολκέας στα τοιχώματα γίνει ίδια ή μεγαλύτερη από την δύναμη τριβής, η ελαστική ενέργεια απελευθερώνεται επαναφέροντας τον εξολκέα.



Αυτό το διαπιστώνουμε από τον έντονο διακοπόμενο και επαναλαμβανόμενο ήχο που παράγεται κατά την εξόλκευση. Αυτό σημαίνει ότι και το δοκίμιο παραλαμβάνει επαναλαμβανόμενες κρουστικές

δυνάμεις(από την απότομη αποφόρτιση του εξολκέα) και οδηγείται σε θραύση το δοκίμιο άσπρης κρυσταλλικής ζάχαρης, όπως συνέβαινε και στην παραγωγή δοκιμίων του πρώτου κύκλου. Η μορφή της θραύσης ήταν η ίδια με επιφάνεια κάθετη στην πίεση της πρέσας. Η επαναλαμβανομένη έκταση - συμπίεση του χαλκού από την ζάχαρη που οφείλεται στην απελευθέρωση και στην αποθήκευση ελαστικής ενέργειας στην ζάχαρη οδηγεί στην θραύση.

δοκίμια	Φορτιο (KN)	Πίεση (Mpa)	Διάμετρος (mm)	Ύψος (mm)
A.Z 1 (χωρίς)	98	199,64	25,09	17,98
A.Z 2 (Με συνδετικό)	98	199,64	25,09	17,75
K.Z 1 (χωρίς)	98	199,64	25,07	17,16
K.Z 2 (με συνδετικό)	98	199,64	25,09	17,81

ΠΙΝΑΚΑΣ Π.3-1: ΠΙΕΣΗ , ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΤΡΙΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΣΤΑΝΗΣ ,ΑΣΠΡΗΣ ΧΑΛΚΟΥ

Για να εκτιμηθεί η ποσότητα του μικροπορώδους του χαλκού σε αυτήν την πίεση, συμπιέζουμε σκόνη καθαρού στην πρέσα και προκύπτουν αποτελέσματα σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

Δοκίμιο	Φορτιο (KN)	Πίεση (Mpa)	Διάμετρος (mm)	Ύψος (mm)	Βάρος (gr)
Χαλκού	98	199,64	25,05	714	22,106

ΠΙΝΑΚΑΣ Π-3-2: ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ , ΦΟΡΤΙΟ ΣΥΝΕΝΩΣΗΣ, ΒΑΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΧΑΛΚΟΥ

Από τα δεδομένα μπορούμε να υπολογίσουμε τον όγκο του δοκιμίου χαλκού, γνωρίζοντας το βάρος του και την πυκνότητα του δοκιμίου και έπειτα συγκρίνοντάς την με αυτήν του χαλκού (η πυκνότητα που έχει το εσωτερικό χωρίς πόρους του κόκκου του χαλκού)

Συμβολίζουμε:

Pth-cu = η θεωρητική πυκνότητα του χαλκου

Pgr-cu = η πυκνότητα των συνενωμένων κόνεων

Vcu = ο όγκος του δοκιμίου χαλκού

Wcu = το βάρος του δοκιμίου

Hcu = το ύψος του δοκιμίου

Dcu = Η διάμετρος του δοκιμίου

Ο όγκος του δοκιμίου είναι:

$$V_{cu} = (\pi * D^2) * \frac{H}{4}$$

Η πράσινη πυκνότητα :

$$P_{gr - cu} = \frac{W_{cu}}{V_{cu}}$$

Ο λόγος της πράσινης με την θεωρητική πυκνότητα, δίνει ένα μέγεθος του μικροπορώδους του δοκιμίου χαλκού :

$$\frac{(P_{gr. cu})}{(\rho_{th. cu})}$$

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

δοκίμιο	Όγκος (mm^3)	ρ_{th-cu} ($\frac{kg}{cm^3}$)	ρ_{gr-cu} ($\frac{kg}{cm^3}$)	Prel (%)
χαλκου	3534	8,960	6,256	69,81

ΠΙΝΑΚΑΣ Π-3-3: ΟΓΚΟΣ , ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ , ΣΧΕΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΧΑΛΚΟΥ

Διαπιστώνουμε ότι το πορώδες του δοκιμίου του χαλκού σε αυτή την πίεση είναι περίπου 30,01% (μεγάλο) . Μπορούμε να χρησιμοποιούμε τέτοια δοκίμια για να βρούμε πειραματικά το μετρό ελαστικότητας του δοκιμίου, καθώς και την τάση διαρροής, συγκρίνοντας τα με αυτήν την συσχέτιση κατά ASHBY που με βάση το μέτρο ελαστικότητας και το σημείο διαρροής του καθαρού, χωρίς πόρους, υλικού εξάγει, ανάλογα με την σχετική πυκνότητα το μέτρο ελαστικότητας και το σημείο διαρροής του πορώδους χάλκινου δοκιμίου.

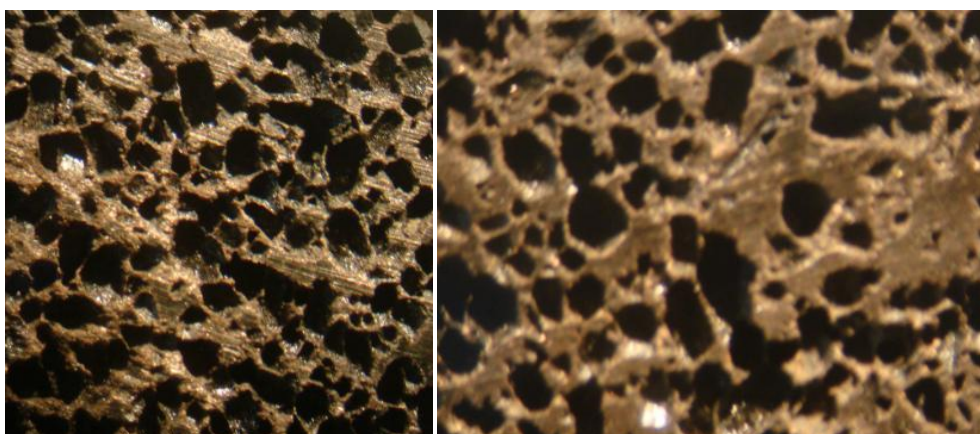
Τοποθετούμε τα δοκίμια(όχι αυτό του χαλκου που το φτιάξαμε αποκλειστικά για να μετρήσουμε την πυκνότητα που έχει στο εν λόγω φορτίο) στο φούρνο στους 30 °C

και πιάνει θερμοκρασία 500°C σε 14', έπειτα αφήνουμε στον φούρνο για μια ώρα σε αυτήν την θερμοκρασία και το βγάζουμε να ψυχθεί εκτός φούρνου.

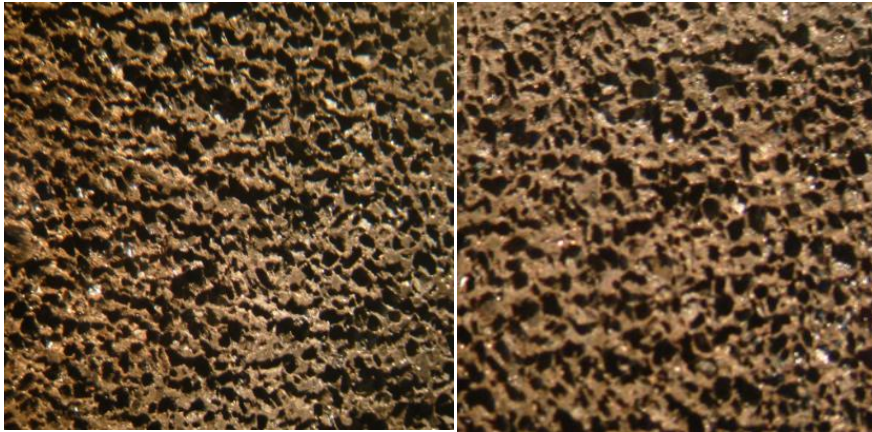
Μετα την κοπή των δοκιμίων στην μέση κατά την διεύθυνση που ασκείται η πίεση και παρατηρώντας την οξείδωση και τους κόκκους, είδαμε ότι η διανομή των πόρων ήταν καλύτερη για τα δοκίμια με συνδετικό μεσο αιθανόλη 1ml σε αντίθεση με τα δοκίμια χωρίς το συνδετικό μεσο. Επίσης όλα τα δοκίμια είχαν οξειδωθεί περισσότερο από τον προηγούμενο κύκλο πυροσυσσωμάτωσης σε άμμο στους 800°C για 4 ώρες. Ενώ ισχύει ότι το βάθος οξείδωσης ακολουθεί παραβολική μορφή με ταχίστη εισχώρηση της οξείδωσης, όσο μεγαλώνει η θερμοκρασία εξαρτώμενη κατά Arrhenius. Η άμμος εμποδίζει τόσο πολύ την οξείδωση, ώστε ακόμα και σε θερμοκρασία κατά 300°C και ελάττωση του χρόνου πυροσυσσωμάτωσης κατά 75% χωρίς άμμο χύτευσης, τα αποτελέσματα είναι πολύ καλύτερα όσον αφορά την οξείδωση με την άμμο.

Στο δοκίμιο καθαρού χαλκού χωρίς ζάχαρη σχετικής πράσινης πυκνότητας 70% περίπου σε δοκιμή οξείδωσης στον φούρνο ξεκινώντας από τους 200°C και ανεβαίνοντας κατά 50°C, παρατηρήσαμε ότι δεν καίγεται μέχρι τους 300°C (υπαρχει ένα θάμπωμα του χαλκού άλλα το κοκκινωπό χρώμα παραμένει), ενώ στους 350°C καίγεται ακαριαία (μετά από 3 λεπτα όταν η θερμοκρασία του φούρνου ανέβαινε από του 300°C στους 350°C). Το παραπάνω σημαίνει ότι η εξάρτηση από την θερμοκρασία είναι πολύ μεγάλη στο εύρος αυτό. Όποτε βλέπουμε ότι ο χαλκός οξειδώνεται σημαντικά και σχεδόν ακαριαία στο διάστημα από 300°C μέχρι 350°C .

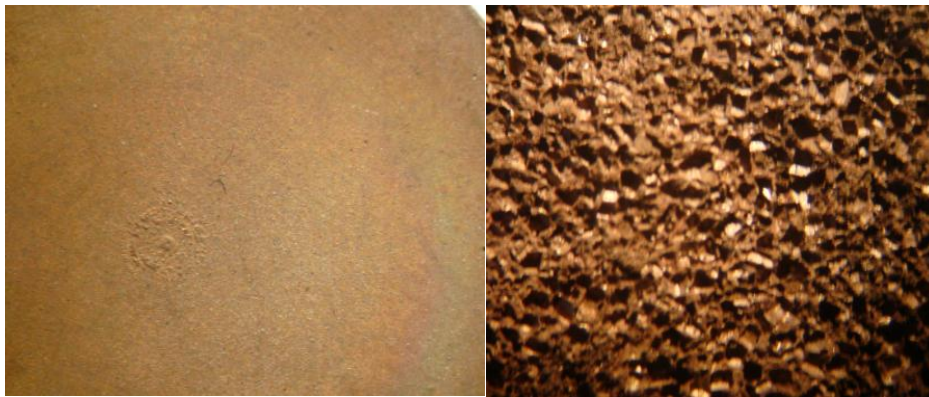
Παρακάτω παραθέτουμε φωτογραφίες της τομής των 2 ζευγών δοκιμίων καστανής και άσπρης ζάχαρης με συνδετικό και χωρίς συνδετικό, στις οποίες διακρίνουμε την διανομή των πόρων καθώς και το σχήμα τους, άλλα και το μέγεθος των δοκίδων.



Ε.Π.3-1. Α) ΑΡΙΣΤΕΡΑ: ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ Κ-2 (ΚΑΣΤΑΝΗ ΖΑΧΑΡΗ ΜΕ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟ) , ΔΕΞΙΑ : ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ Κ-1 (ΧΩΡΙΣ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟ)



Ε.Π.3-2 Β) ΑΡΙΣΤΕΡΑ: ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ Α-2 (ΑΣΠΡΗ ΖΑΧΑΡΗ ΜΕ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟ) , ΔΕΞΙΑ : ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ Α-1 (ΧΩΡΙΣ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟ)



Ε.Π.3-3 Γ) ΑΡΙΣΤΕΡΑ : ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΤΟΥ ΧΑΛΚΟΥ , ΔΕΞΙΑ ΤΟ ΣΠΑΣΜΕΝΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΜΕ ΤΗΝ ΑΣΠΡΗ ΖΑΧΑΡΗ

19. Π.3 ΤΡΙΤΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Αφροποίηση με την μέθοδο του αποπλενόμενου πληρωτικού μέσου με μητρικό υλικό χαλκό και αποπλενόμενο μέσο α) καστανή ζάχαρη β) άσπρη κρυσταλλική ζάχαρη.

Η διαφοροποίηση σε αυτόν τον κύκλο είναι ότι θα προσπαθήσουμε να βελτιώσουμε την παραγωγή αφρού με τρόπο τέτοιο, ώστε να εμποδίσουμε την εκτεταμένη οξειδωση του χαλκού με μέθοδο όπως η περιβολή κατά την πυροσυσσωμάτωση πεπλεγμένης άμμου χύτευσης γύρω από το δοκίμιο. Επίσης θα αφήσουμε τα δοκίμια περισσότερη ώρα να αποπλυθούν σε υψηλή θερμοκρασία.

Στόχος, η απομάκρυνση κατά το δυνατόν μεγαλύτερης ποσότητας ζάχαρης (πιο επιτυχής απόπλυση) και η παρεμπόδιση επαφής οξυγόνου στο δοκίμιο. Μια βελτιωτική κίνηση θα είναι η ανάμειξη πριν την συνένωση των κόνεων με παρουσία ενός ομογενοποιητικού μέσου που θα παρεμποδίζει την συσσωμάτωση ή ζάχαρης ή χαλκού δίνοντας κατά το δυνατό πιο ομοιογενή αφροποίηση που θα αρχίζει από την ομογενή συμπίεση χωρίς εμφάνιση συσσωματώσεων στην πρέσα.

Μεσα ομογενοποιητικά (συνδετικά)

Σαν τέτοια μπορούν να θεωρηθούν: το καθαρό νερό (χωρίς άλατα και μικρόβια), η αιθανόλη . Μίξη κόνεων: παίρνουμε πούδρα χαλκού, δημιουργούμε 3 δοκίμια με καστανή ζάχαρη και άλλα 3 με άσπρη κρυσταλλική. Η αναλογία κατ όγκο (περιλαμβανόμενων των κενών) είναι η ίδια με αυτή του πρώτου κύκλου. Η διαφοροποίηση κατά την ανάμειξη των κόνεων συνίσταται στην προσθήκη ενός συνδετικού μέσου (binder) σε ένα δοκίμιο καστανής ζάχαρης και σε επίσης ένα άσπρης κρυσταλλικής.

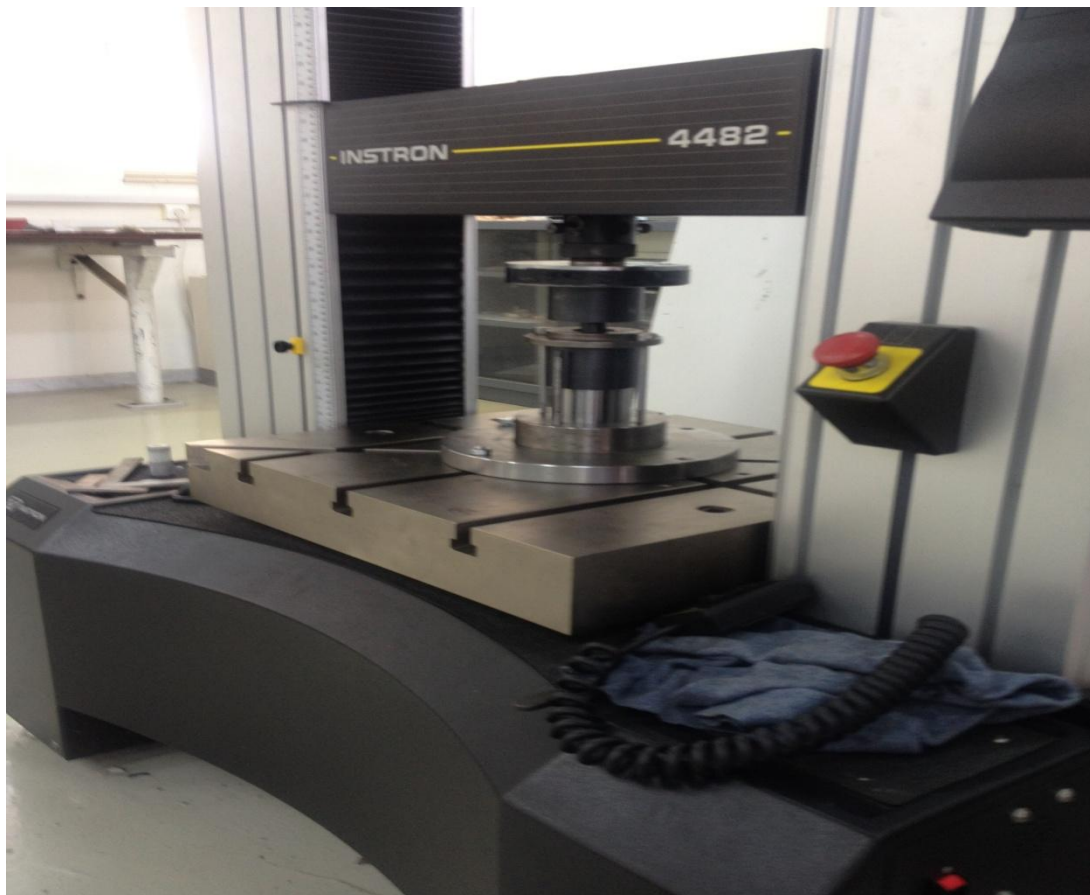
Το συνδετικό μέσο είναι η αιθανόλη (καθαρή) και η ποσοτητα είναι 1 ml που αντιστοιχεί σε 0,75 gr, το οποίο ρίχνουμε σταδιακά στο μίγμα αναδεύοντας ταυτόχρονα για καλύτερη και ομοιογενή ενσωμάτωση στο μίγμα μας. Τα άλλα δυο ζεύγη μιγμάτων είναι παρασκευασμένα ακριβώς με τον ίδιο τρόπο όπως και το πρώτο μέρος.

Συμπίεση

Η επόμενη φάση είναι η προετοιμασία της αυτόματης πρέσας INSTRON με φορτίο συμπίεσης 98 KN. Η ανίχνευση της τάσης γίνεται με σύστημα πιεζοκρυστάλλων, επί των οποίων το φορτίο που ασκείται κατά την συμπίεση μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα στους ακροδέκτες των πιεζοκρυστάλλων (χαλαζίας), όπου μετά την ανίχνευση φορτίου που αντιστοιχεί σε αυτό που έχουμε ορίσει σταματά η συμπίεση. Το σύστημα του υπολογιστή και της πρέσας καταγράφει φορτίο – μετατόπιση εμβόλου δίνοντας έτσι την μεταβολή του αρχικού-τελικού όγκου συμπιεσματος καθώς και το διάγραμμα φορτίου – μεταβολής μήκους εμβόλου. Επειδή ξέρουμε την διαμετρο της κυλινδρικής μητρας (25mm,), γνωρίζουμε και τον όγκο που σαρώνει το έμβολο (φορτίο –όγκος).

Τα δοκίμια στα οποία δεν έχουμε ρίξει συνδετικό μεσο, παρουσιάζουν μια ανομοιομορφία στην παράπλευρη επιφάνεια όσον αφορά τη διανομή της ζάχαρης. Αρχίζοντας από τα συμπιεσμένα δοκίμια χωρίς συνδετικό, από το κάτω μέρος τους που έρχεται σε επαφή με το κυλινδρικό μέρος της μήτρας και συνεχίζοντας προς τα πάνω, παρατηρούμε ότι όσο ανεβαίνουμε προς σημείο επαφής με το έμβολο, η ζάχαρη μειώνεται σταδιακά ενώ στο πάνω μέρος του σόκορου διακρίνεται μόνο ο χαλκός. Μετά την τοποθέτηση συνδετικού μέσου η διανομή ζάχαρης στην παράπλευρη επιφάνεια του δοκιμίου είναι πολύ πιο ομοιογενής, χωρίς να διακρίνουμε στο πάνω μέρος σημεία όπου υπάρχει μόνο χαλκός .

Κανένα δοκίμιο εξωτερικά δεν έχει υποστεί ρωγμή τουλάχιστον εξωτερικά, γεγονός που σημαίνει ότι ο μηχανισμός θραύσης λόγω εφελκυσμού από τις ελαστικές τάσεις της ζάχαρης δεν έχει τέτοια φόρτια, ώστε να αναπτυχθούν ρωγμές, ενώ μπορούμε να διακρίνουμε ότι η ζάχαρη δεν έχει σπάσει. Κατά την ανάπτυξη των τάσεων στην διαδικασία της συνένωσης διακρίνουμε μια απότομη πτώση της τάσης σε ένα σημείο.



Ε.Π.2-1 : ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΠΡΕΣΑ INSTRON

Στο παρακάτω πίνακα παραθέτουμε τα παρασκευασμένα δοκίμια ύστερα από συνένωση κόνεων χαλκού με ζάχαρη, σε φορτίο πρέσας 98 KN και τις διαστάσεις που προκύπτουν:

Δοκίμιο καστανής ζάχαρης	ΦΟΡΤΙΟ (KN)	Τάση συμπίεσης (Mpa)	Διάμετρος(mm)	Υψος (mm)
K1	98	199,64	25	17,5
K2	98	199,64	25	17,5
K3	98	199,64	25	17,5

ΠΙΝΑΚΑΣ Π.2-1: ΦΟΡΤΙΟ , ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΥΝΕΝΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΣΤΑΝΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ-ΧΑΛΚΟΥ

Το δοκίμιο K1 (σκόνη χαλκού +καστανή ζάχαρη) εισάγεται στον φούρνο και θερμαίνεται στους 150 °C για να λιώσει η ζάχαρη και να εξωθηθεί μέσω των πόρων των χαλκών. Παρατηρούμε ότι μεγάλη ποσοτητα, μεγαλύτερη από ότι στον πρώτο κύκλο πειραμάτων διαφεύγει από τους πόρους, άρα η συνένωση με μικρότερο φορτίο και τάση συνένωσης οδήγησε σε καλύτερη ροή της λιωμένης ζάχαρης. Το υπόλειμμα ζάχαρης στα τοιχώματα του δοκιμίου είχε καραμελοποιηθεί και κατά την υδατοδιάλυση στους 50 °C για μια ώρα δεν ήταν δυνατόν να διαλυθεί.

Το δοκίμιο K2 εισάγεται κατευθείαν για υδατοδιάλυση για μια ώρα στους 50 °C, όπου παρατηρούμε από το 1^ο λεπτό ότι το νερό παίρνει χρώμα και σχηματίζονται οι πόροι ενώ ύστερα από μισή ώρα αλλάζουμε το νερό, από όπου διακρίνουμε ότι δεν διαλύεται σημαντικά μεγάλη ποσοτητα ζάχαρης.

Το δοκίμιο K3 περιέχει 1 ml καθαρής αιθανόλης και διακρίνουμε εξωτερικά μια καλύτερη διανομή των πόρων πράγμα που προκύπτει και μετα την υδατοδιάλυση για 1 ώρα στους 50 °C, με τα ίδια συμπεράσματα ως προς την διαλυτότητα με το δοκίμιο K2

Στον παρακάτω πίνακα παραθέτουμε τις τιμές σχηματισμού του συμπίεσματος με φορτίο πρέσας στα 98 KN καθώς και τις διαστάσεις των δοκιμίων :

Δοκίμια	ΦΟΡΤΙΟ (KN)	ΠΙΕΣΗ ΠΡΕΣΣΑΣ (Mpa)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (mm)	ΥΨΟΣ (mm)
A1	98	199,64	25	17,5
A2	98	199,64	25	17,5
A3	98	199,64	25	17,5

ΠΙΝΑΚΑΣ Π.2.2: φορτίο ,πίεση , διαστάσεις συνενωμένων δοκιμίων άσπρης κρυσταλλικής ζάχαρης-χαλκού

Το δοκίμιο A1 θερμαίνεται στους 150 °C στον φούρνο, όπου με αυτό τον τρόπο αφαιρείται η μεγαλύτερη ποσότητα άσπρης ζάχαρης, ενώ εξωτερικά τουλάχιστον, η ζάχαρη έχει υπόλειμμα καραμέλας, το οποίο δεν υδατοδιαλύεται εύκολα.

Το δοκίμιο A2 υδατοδιαλύεται στους 50 °C για μια ώρα, όπως και το δοκίμιο K2.

Το δοκίμιο A3 περιέχει συνδετικό μέσο καθαρής αιθανόλη 1 ml και υδατοδιαλύεται επίσης επιτυχώς έχοντας καλύτερη διανομή πόρων τουλάχιστον με παρατήρηση εξωτερική του δοκιμίου.

Η υδατοδιάλυση έγινε σε μαγνητικό αναδευτήρα MS300 Magnetic stirrer, στον οποίο υπάρχει ρυθμιστής θερμοκρασίας, χρονόμετρο, ρυθμιστής ταχύτητας ανάδευσης.

Έπειτα φτιάχνουμε ένα καλούπι αποτελούμενο από 6 κομμάτια σωλήνα γαλβανιζέ με τις παρακάτω διαστάσεις:

Τύπος Σωλήνα	Εσωτερική διάμετρος (mm)	Εξωτερική διάμετρος (mm)	Πάχος (mm)	Μηκος (mm)
γαλβανιζέ	35,5	42,4	3,45	40

ΠΙΝΑΚΑΣ Π.2-3: ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΩΛΗΝΑ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ

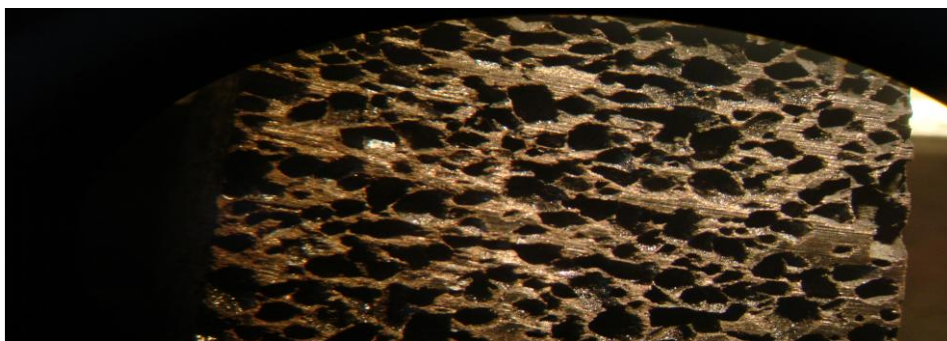
Επίσης έχω δυο πλάκες από st-37 (μαύρο- DKP), εκ των οποίων η μία θα συγκολληθεί με τους έξι σωλήνες φτιάχνοντας έτσι μια μήτρα, όπου θα μπει η άμμος χύτευσης στην αρχή, έπειτα συμπιέζουμε την άμμο και στην συνέχεια τοποθετούμε τα έξι δοκίμια στην άμμο σε κάθε μια από τις μήτρες. Στην συνέχεια καλύπτουμε τα δοκίμια που είναι τοποθετημένα ομοαξονικά σε κάθε σωλήνα με άμμο και συμπιέζουμε ώστε να μειωθεί το πορώδες της άμμου και να υπάρχει ένα εμπόδιο εισόδου του οξυγόνου, έπειτα καλύπτουμε με την πλάκα πιέζοντας την πάνω από το ακάλυπτο μέρος της άμμου ώστε να δημιουργήσουμε κατά το δυνατόν καλύτερη στεγανοποίηση από τον αέρα του περιβάλλοντος. Με αυτόν τον τρόπο αποκλείουμε ολοκληρωτικά την άμεση διέλευση του αέρα παράπλευρα από πάνω και από κάτω, ενώ η μόνη δυνατότητα να υπάρχει διέλευση αέρα είναι από την σχισμή που υπάρχει εκεί, όπου οι σωλήνες ακουμπούν στην πάνω πλάκα. Ο αέρας λοιπόν έχει να υπερνικήσει α) την πτώση πίεσης από την είσοδό του στην σχισμή β) την αντίσταση που θα βρει στην διαδρομή διαμέσου του μικροπορώδους της άμμου χύτευσης. Δεδομένου ότι η αντίσταση της εισόδου στην σχισμή είναι δεδομένη, εμείς πρέπει να μεγιστοποιήσουμε την διαδρομή που θα ακολουθεί ο αέρας διαμέσου της άμμου. Αυτό στην συγκεκριμένη διάταξη γίνεται με την τοποθέτηση του δοκιμίου κοντά στην κάτω πλάκα και κάλυψή του μέχρι το χείλος της πάνω πλευράς του σωλήνα με πεπιεσμένη άμμο. Συγκεκριμένα συμπιέζουμε την άμμο ώστε να καλύψει 1 εκατοστό περίπου στο κάτω μέρος του καλουπιού , τοποθετούμε το δοκίμιο και καλύπτουμε μεχρι επάνω .

Στο παρακάτω σχήμα δίνουμε φωτογραφία του καλουπιού της τοποθέτησης δοκιμίων και κάλυψης με κόκκινη άμμο :



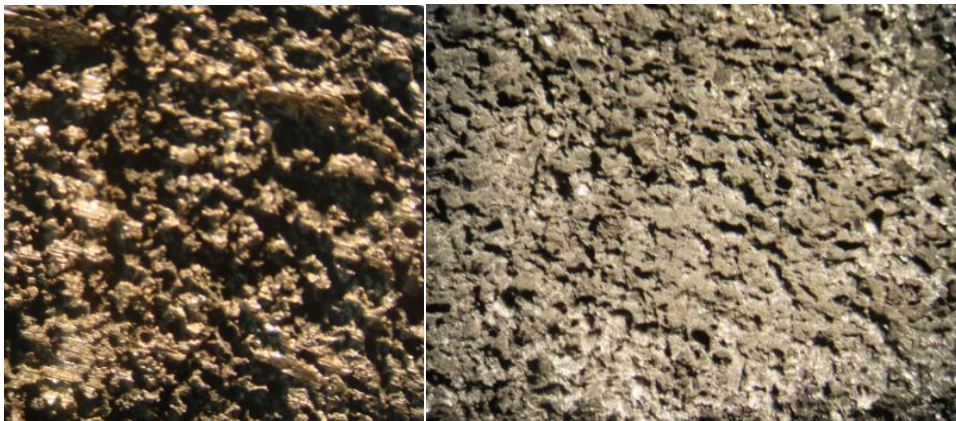
Ε.Π.2.-1 ΔΕΞΙΑ ΚΑΙ ΑΡΙΣΤΕΡΑ : καλούπι δοκιμίων

Η άμμος είναι κόκκινη λιπαρή λεπτόκοκκη άμμος χύτευσης, αντέχει μέχρι τους 1200 °C (μπορεί να χυτευτεί χαλκός, ασήμι, χρυσός) και αποτελείται κυρίως από διοξείδιο του πυριτίου (περίπου 92%), Άργιλο, νερό. Το καλούπι το εισάγουμε στον φούρνο με χρόνο ανόδου της θερμοκρασίας 30 min και χρόνο παραμονής στους 800 °C για 2 ώρες, έπειτα κλείνουμε να ψυχθεί μέσα στον φούρνο και βγάζουμε τα δοκίμια μετά από 720 λεπτά σε θερμοκρασία 150 °C. Οι θερμοκρασιακές μεταβολές με τον χρόνο δίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:

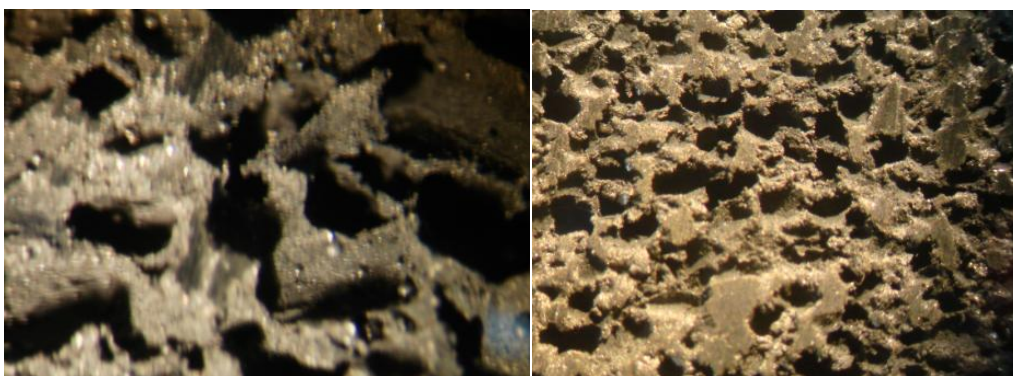


ΓΡΑΦΗΜΑ Π.2-1: ΠΥΡΟΣΥΣΣΩΜΑΤΟΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 2^{ΟΥ} ΚΥΚΛΟΥ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΧΡΟΝΟ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ 2 ΩΡΕΣ

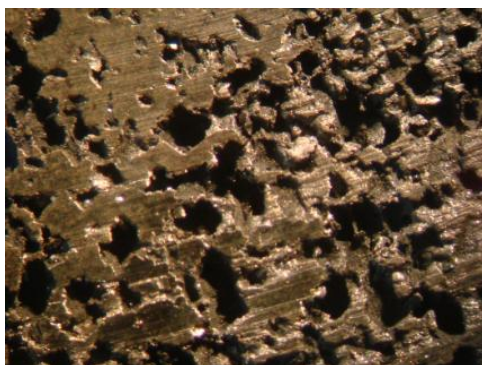
Αφού αφαιρέσαμε προσεκτικά την άμμο χύτευσης από το καλούπι, κόψαμε το δοκίμιο σε τροχό από όπου είδαμε ότι η επιφάνειά τους ήταν πολύ καλύτερη από ότι στον πρώτο κύκλο πειραμάτων, η οξείδωση είχε προχωρήσει λιγότερο ενώ δεν υπήρχαν εμφανείς ρωγμές και αστοχίες. Σημαντικό να ειπωθεί ότι ο εξολκέας ήταν χαλύβδινος κυλινδρικός με διάμετρο ίδια με αυτή της μήτρας. Επίσης στο δοκίμιο στο οποίο η ζάχαρη είχε εξαχθεί κάτω από την πίεση της εσωτερικής τάσης ατμών σε υγρή μορφή, καραμελοποιήθηκε η εξωτερική επιφάνεια των δοκιμίων ενώ μικρότερη ποσότητα παρέμεινε στα τοιχώματα των πόρων. Η ζάχαρη αυτή όπως παρατηρούμε και στο μικροσκόπιο είχε εξαφανιστεί, χωρίς να μείνουν υπολείμματα. Οι πόροι ήταν ποιο διακριτοί και με ελαφρά μεγαλύτερους πόρους σε σχέση με άλλα δοκίμια. Παρακάτω παραθέτουμε εικόνες που ελήφθησαν από οπτικό μικροσκόπιο της τομής των δοκιμίων σε επίπεδο παράλληλο στο φορτίο της δύναμης και κάθετα στην κυκλική επιφάνεια.



Ε.Π.2-2 α): ΑΡΙΣΤΕΡΑ : τομή του δοκιμίου άσπρης ζάχαρης που προθερμαίνουμε για αποβολή ζάχαρης (A1) , ΔΕΞΙΑ : δοκίμιο άσπρης ζάχαρης χωρίς συνδετικό(A2) , ΚΑΤΩ : δοκίμιο άσπρης ζάχαρης με συνδετικό μεσο αιθανόλη (A2)



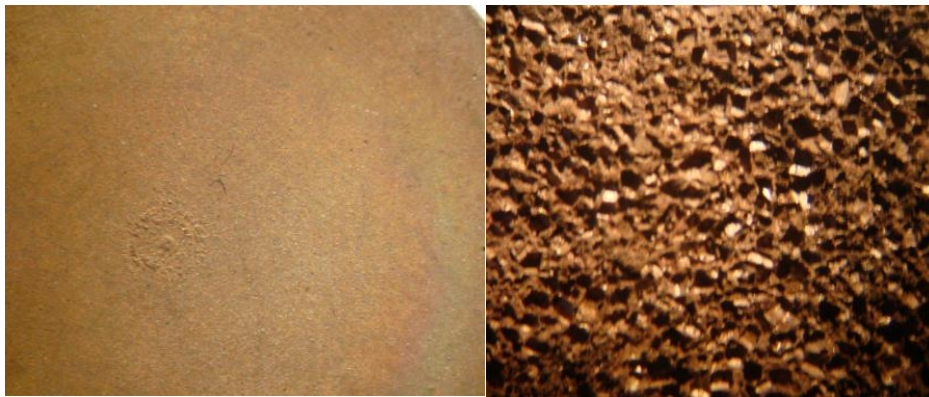
Ε.Π.2-3 ΑΡΙΣΤΕΡΑ : δοκίμιο K1 , ΔΕΞΙΑ : δοκίμιο K2 , ΚΑΤΩ : δοκίμιο K3



ΣΥΝΔΕΤΙΚΟ)



Ε.Π.3-2 Β) ΑΡΙΣΤΕΡΑ: ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ Α-2 (ΑΣΠΡΗ ΖΑΧΑΡΗ ΜΕ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟ) , ΔΕΞΙΑ : ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ Α-1 (ΧΩΡΙΣ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟ)



Ε.Π.3-3 Γ) ΑΡΙΣΤΕΡΑ : ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΤΟΥ ΧΑΛΚΟΥ , ΔΕΞΙΑ ΤΟ ΣΠΑΣΜΕΝΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΜΕ ΤΗΝ ΑΣΠΡΗ ΖΑΧΑΡΗ

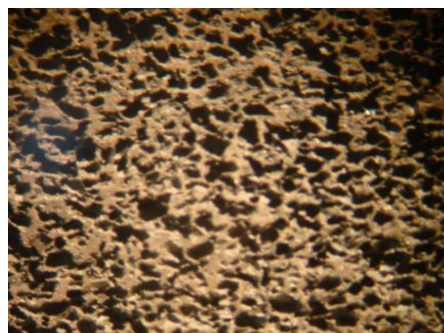
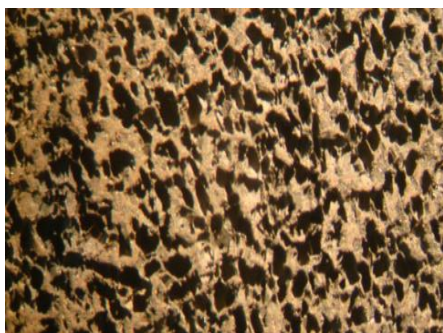
20. Π.4. ΤΕΤΑΡΤΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Δεδομένου κατά τα παραπάνω ότι το συνδεδετικό δίνει καλύτερα αποτελέσματα για το βέλτιστο φορτίο της τάξης των 98 KN, κατασκευάζουμε 3 ζεύγη δοκιμών καστανής –άσπρης ζάχαρης με την ίδια ακριβώς αναλογία κατ' όγκο χαλκού - ζάχαρης και προσθέτουμε 1 ml αιθανόλης για συνδεδετικό μέσο.

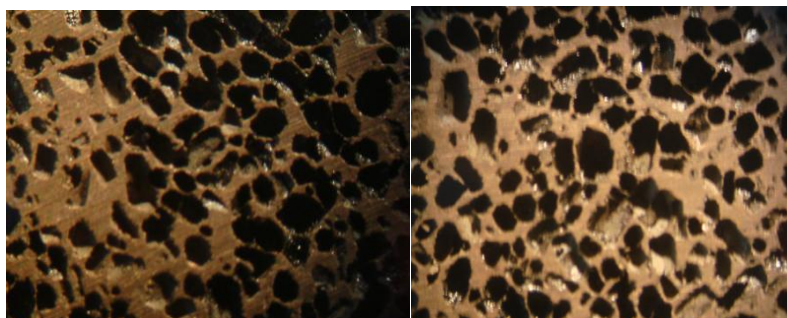
Στο τέλος της συμπίεσης των κόνεων αφήσαμε το κάθε δοκίμιο για 5 λεπτά να δέχεται φορτίο από το έμβολο, προκειμένου να αποκτήσουν τα δοκίμια δυνατότερους μεταλλικούς δεσμούς. Ύστερα τα απομακρύναμε με ανοξειδωτο χαλύβδινο εξολκέα και στην συνέχεια παρατηρήθηκε ότι δεν είχε εμφανίσει κανένα από αυτά ρωγμή αν και δεν είχαμε βάλει λιπαντικό στην μήτρα.

Μετα την συμπίεση των κόνεων ακολουθεί υδατοδιάλυση στους 50 °C για 45 λεπτα και έπειτα ξήρανση για 20 λεπτα στους 100°C στον φούρνο. Στην συνέχεια πυροσυσσωματώνουμε τα δοκίμια στον φούρνο, με χρόνο ανόδου θερμοκρασίας 10 min που ανέρχεται στους 300°C, όπου και παραμένουν για μισή ώρα. Έπειτα τα κόβουμε στην μέση με τροχό και καθαρίζουμε τις τομές με παροχή πεπιεσμένου αέρα .

Παρακάτω παραθέτουμε φωτογραφίες των τομών δύο ζευγών καστανής-λεύκης ζάχαρης :



ΕΙΚΟΝΑ Π. 4- 1 : ΑΦΡΟΙ ΑΣΠΡΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ



ΕΙΚΟΝΑ Π. 4- 2 : ΑΦΡΟΙ ΚΑΣΤΑΝΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ

Παρατηρούμε ότι οι πόροι είναι ευδιάκριτοι ενώ το σχήμα των πόρων ακολουθεί αυτό της ζάχαρης.

Ο χαλκός δεν είναι καμένος στην τομή του, ενώ η όποια οξείδωση είναι επιφανειακή (μερικά μm) γεγονός που συμφωνεί με τα θεωρητικά δεδομένα της ταχύτητας οξείδωσης και της εξάρτησης από την θερμοκρασία κατά Arrhenius.

21. Π.5. ΠΕΜΠΤΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Στους 4 προηγούμενους κύκλους πειραμάτων παρατηρήσαμε απώλεια υλικού κατά την διάρκεια της υδατοδιάλυσης, της μεταφοράς στον φούρνο. Αυτό επιδιώκουμε να το αντιμετωπίσουμε με την προσθήκη σκόνης καθαρού χαλκού στο κάτω μέρος της μήτρας. Έπειτα προσθέτουμε το μείγμα μας με την ίδια αναλογία ζάχαρης – χαλκού, όπως και στα προηγούμενα 4 πειράματα και στο τέλος προσθέτουμε σκόνη χαλκού στο πάνω μέρος. Στη συνέχεια συμπιέζουμε με φορτίο 98 KN και όταν φτάνουμε σε αυτό το φορτίο αφήνουμε τα δοκίμια υπό την συγκεκριμένη παραμόρφωση για 15 min μέχρι το φορτίο λόγω ενίσχυσης των μεταλλικών δεσμών να μειωθεί στα 80-81 KN.

Ύστερα υδατοδιαλύουμε την ζάχαρη των δοκιμίων για 30 λεπτά στους 70 °C.

Παρατηρούμε στα δοκίμια ότι δεν είχαμε σχεδόν καθόλου απώλεια χαλκού (μια ελάχιστη εμφανίστηκε στο δοκίμιο καστανής), ενώ κατά τη διάρκεια της ξήρανσης στον φούρνο στους 100 °C για 20 λεπτά δεν βγήκε καθόλου ζάχαρη από τα δοκίμια ενώ στους 150 βαθμούς για 5 λεπτά πάλι δεν είχε εμφανιστεί καραμέλα ή μικρή ποσοτήτα λιωμένης ζάχαρης (το βιβλιογραφικό σημείο τήξης της ζάχαρης βρίσκεται στους 160-200 °C).

Έπειτα πυροσυσσωματώνουμε τα δοκίμια από τους 150 °C στους 260 °C.

Ο χρόνος που ανέρχεται η θερμοκρασία στους 260 είναι 4 λεπτά παρέμειναν σε αυτή την θερμοκρασία τα δοκίμια μας για 30 min.

Όταν η θερμοκρασία ανήλθε στους 260 °C, τα δοκίμια απέβαλαν μια μεγάλη ποσότητα ζάχαρης άλλα σημαντικά μικρότερη σε σχέση με τις άλλες δοκιμές. Προφανώς είχε παραμείνει μια ποσότητα ζάχαρης εσωτερικά των δοκιμίων, η οποία εξήχθη από τα δοκίμιά μας. Η ποσότητα ζάχαρη που εξήχθη από τα δοκίμια άσπρης ζάχαρης ήταν σημαντικά μικρότερη σε σχέση με τα δοκίμια της καστανής.

Στις μετρήσεις βάρους των δοκιμίων ύστερα από μετρήσεις στην ζυγαριά ακρίβειας βρέθηκε ότι τα υπολείμματα στο δοκίμιο με προσθήκη χαλκού στο πάνω και στο κάτω τοίχωμα του, 2gr στην μια πλευρά και 2 gr στην άλλη, ήταν σημαντικά μικρότερα σε αυτά της άσπρης κρυσταλλικής σε σχέση με αυτά των δοκιμίων με καστανή ζάχαρη. Ως εκ τούτου εξαγεται το συμπέρασμα ότι τα δοκίμια με άσπρη ζάχαρη (όπως συνέβη και στους προηγούμενους κύκλους πειραμάτων) υδατοδιαλύεται καλύτερα σε σχέση με την ίδια κατ' όγκο (μαζί με τα κενά της ζάχαρης) ποσότητα καστανής ζάχαρης. Αυτό συμβαίνει λόγω καλύτερης διασύνδεσης των πόρων καθώς, όπως έχει παρατηρηθεί, τα τοιχώματα στα δοκίμια άσπρης ζάχαρης είναι λεπτότερα και έχουν καλύτερη διασύνδεση λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας κόκκων, για τον ίδιο όγκο σε σχέση με την καστανή που εξηγείται από το μικρότερο μέγεθός της. Επίσης στα λεπτά τοιχώματα είναι πιθανότερο να υπάρχουν συνενώσεις κελιών σε σχέση με τα σαφώς πιο χονδρά

τοιχώματα των κελιών που διακρίνονται στα δοκίμια καστανής ζάχαρης (συμπέρασμα που εξάγεται από όλα τα πειράματα μέσω παρατήρησης στο μικροσκόπιο).

Διαθέτοντας τις μετρήσεις του βάρους των συμπιεσμένων δοκιμίων μετά την πρέσα και γνωρίζοντας τα βάρη χαλκού και ζάχαρης (άρα συνολικό) που συνιστούν τα δοκίμιά μας και αφού μετρηθεί το βάρος των δοκιμίων μπορούμε να βρούμε το βάρος των υπολειμμάτων ζάχαρης που παραμένουν εντός του αφρού. :

Wresid.s = η μάζα της υπολειπόμενης ζάχαρης (στην ουσία άνθρακας)

Wpowd. = η συνολική μάζα των κόνεων στο συμπίεσμα (χαλκού και ζάχαρης)

WSind = η συνολική μάζα του δοκιμίου μετά την πυροσυσσωμάτωση.

$$Wresid.s = Wpowd. - WSind$$

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας των μετρήσεων βάρους, διαστάσεων , πυκνοτήτων μετά την συνένωση των κόνεων στην πρέσα για τα 4 δοκίμια άσπρης και καστανής ζάχαρης με το ένα ζεύγος να έχει εκατέρωθεν από 2 gr καθαρού χαλκού και το άλλο από 4 gr.

Οι συμβολισμοί που θα δώσουμε στα δοκίμια είναι οι εξής :

A.1: δοκίμιο άσπρης ζάχαρης με συνδετικό μέσο αιθανόλη 1ml και 4gr εξωτερικά φύλλα χαλκού, 2gr κατ' επιφάνεια

A.2: δοκίμιο άσπρης ζάχαρης με συνδετικό μέσο αιθανόλη 1ml και 8gr εξωτερικά φύλλα χαλκού, 4 gr έκαστο.

K.1: δοκίμιο καστανής ζάχαρης με συνδετικό μέσο αιθανόλη 1ml και 4gr εξωτερικά φύλλα χαλκού, 2gr κατ' επιφάνεια

K.2: δοκίμιο καστανής ζάχαρης με συνδετικό μέσο αιθανόλη 1ml και 4gr εξωτερικά φύλλα χαλκού, 2gr κατ' επιφάνεια

	φορτιο (KN)	πίεση Mpa	διάμετρος (mm)	Ύψος (mm)	όγκος (mm ³)	Βάρος (gr)	πραγματική πυκνότητα ($\frac{gr}{mm^3}$)
A 1	98	199,64	25,08	18,68	9228	29,57	3,2043
A 2	98	199,64	25,1	19,94	9867	>30	
K 1	98	199,64	25,08	18,42	9099	29,9	3,2858
K 2	98	199,64	25,1	19,7	9748	>30	

ΠΙΝΑΚΑΣ Π-5-1: ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΣΥΝΕΝΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΧΑΛΚΟΥ ΖΑΧΑΡΗΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΤΟΥΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΕ ΦΟΡΤΙΟ 98 KN

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας των μετρήσεων μετά την πυροσυσσωμάτωση για τα ίδια δοκίμια :

Δοκίμια μετά την πυροσυσσωμάτωση	Θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης (°C)	Διαμετρ (mm)	Ύψος (mm)	Βάρος (gr)	Όγκος (mm ³)	Πυκνότητα Δοκίμων ($\frac{gr}{cm^3}$)
A1	260	24,7	18,5	21,725	8855	2,453
A2	260	-	19,8			
K1	260	24,9	18,2	23,197	8863	2,617
K2	260	-	19,5			

ΠΙΝΑΚΑΣ Π.5-2 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΙΚΤΟ ΒΑΡΟΣ , ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΦΡΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΥΡΟΣΥΣΣΩΜΑΤΟΣΗ

Η πυκνότητα του δοκιμίου του παραπάνω πίνακα είναι η συνολική μαζί με τα φύλλα που δημιουργεί ο πρόσθετος χαλκός. Δεν περιγράφει την πυκνότητα του αφρού αλλά του συνολικού δοκιμίου μαζί με τα υπολείμματα άνθρακα που υπάρχουν μέσα του.

Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε την πυκνότητα που έχει ο αφρός πρέπει να βρούμε το πάχος που έχουν τα εξωτερικά φύλλα και έπειτα να αφαιρέσουμε αυτό το πάχος από το ύψος του δοκιμίου ώστε να μπορεί να υπολογιστεί ο όγκος του αφρού χωρίς τα φύλλα. Έχουμε βρει από τον τρίτο κύκλο πειραμάτων ότι το σχετικό πορώδες δοκιμίου χαλκού έχει τιμή $\Pi=0,3018$ σε σχέση με αυτήν του κόκκου χαλκού που είναι μηδενική. Αρά γνωρίζοντας την πυκνότητα των κόκκων χαλκού και την ποσότητα χαλκού που προσθέσαμε για να σχηματιστούν τα φύλλα, είμαστε σε θέση από την γεωμετρία των φύλλων να υπολογίσουμε το μέσο πάχος χαλκού των φύλλων συμφωνά με τις παρακάτω σχέσεις :

$$M_{Cu.\phi} = 2 * 2gr = 4 gr$$

$$\Pi_{Cu} = 0,3018$$

$$\rho_{Cu} = 8,96 \frac{gr}{cm^3}$$

$$V_{\phi.Cu} = \left(M_{Cu.} * \left[\frac{1}{\rho_{Cu}} \right] \right) * \left(\frac{\Pi}{1-\Pi} \right) + \frac{M_{Cu}}{\rho_{Cu}} = 639 cm^3$$

$$V_{\phi.Cu} = (D^2) * \pi * H / 4 \Rightarrow H = V_{\phi.Cu} * \frac{4}{[\pi * (D^2)]}$$

ΠΟΡΩΔΕΣ χαλκού	ΜΑΖΑ (gr)	όγκος φύλλων χαλκού (mm ³)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (mm)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΟΚΚΟΥ ($\frac{gr}{cm^3}$)	ΥΨΟΣ (mm)	δοκίμιο
0,3018	4	639	24,7	8,96	1,33	άσπρης
0,3018	4	639	24,9	8,96	1,31	καστανής

ΠΙΝΑΚΑΣ. Π.5-3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΟΓΚΟΥ ΦΥΛΛΩΝ ΧΑΛΚΟΥ

Από το ύψος που έχει ευρεθεί στον παραπάνω πίνακα μπορούμε να βρούμε το ύψος του αφρού:

Ύψος αφρού άσπρης κρυσταλλικής : $H_f.\alpha = H_d.\alpha - H\phi.\alpha = 17,15 \text{ cm}$

Ύψος αφρού καστανής : : $H_f.\kappa = H_d.\kappa - H\phi.\kappa = 16,89 \text{ cm}$

Αφού έχει μετρηθεί η διάμετρος και γνωρίζοντας το ύψος υπολογίζουμε τον όγκο του αφρού :

Δοκίμιο	διάμετρος (mm)	ύψος Αφρού (mm)	Όγκος αφρού mm^3
Άσπρης	24,7	17,15	8212
Καστανής	24,9	16,89	8224

ΠΙΝΑΚΑΣ. Π-5-4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΟΓΚΟΥ ΑΦΡΟΥ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΣΤΑΝΗΣ , ΑΣΠΡΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ ΧΩΡΙΣ ΤΑ ΦΥΛΛΑ ΧΑΛΚΟΥ

Λαμβάνοντας υπόψη και το βάρος του χαλκού που έχει προστεθεί στο μίγμα ζάχαρης χαλκού σε κάθε είδους ζάχαρης και αγνοώντας τα υπολείμματα ζάχαρης, μπορεί να υπολογιστεί η πυκνότητα του αφρού από τον όγκο που έχουμε βρει :

$$\rho_f = \frac{m_{cu}}{V_{cu}} \quad , \quad \rho_{rel} = \frac{\rho_f}{\rho_{cu}}$$

Για άσπρη κρυσταλλική και για καστανή έχω $m_{cu} = 17,054 \text{ gr}$

Έτσι έπειτα από υπολογισμούς λαμβάνω τον παρακάτω πίνακα :

δοκίμιο	όγκος (mm^3)	μάζα χαλκού στο μίγμα (gr)	πυκνότητα αφρού ($\frac{gr}{cm^3}$)	πυκν. Χαλκού ($\frac{gr}{cm^3}$)	σχετ. πυκνότητα (%)
άσπρης	8212	17,054	2,08	8,96	23,175
καστανής	8224	17,054	2,07	8,96	23,141

ΠΙΝΑΚΑΣ. Π-5-5: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΑΦΡΟΥ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΥΠΟΛΕΙΠΟΜΕΝΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (ΜΙΚΡΟΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΑΣΠΡΗΣ)

Έχοντας βρει την σχετική πυκνότητα από την σχέση του πορώδους $\Pi = 1 - \rho_{rel}$, λαμβάνεται το συνολικό πορώδες των αφρών (μακροπορώδες + μικροπορώδες)

Δοκίμιο	πυκν. Χαλκού ($\frac{gr}{cm^3}$)	σχετ. πυκνότητα (%)	πορώδες αφρού (%)
Άσπρης	8,96	23,175	76,825
καστανής	8,96	23,141	76,859

Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ , ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΑΦΡΟΥ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΣΠΡΗΣ , ΚΑΣΤΑΝΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ

Εφόσον είναι γνώστη η ποσότητα χαλκού που περιέχει ο αφρός μέσω της πυκνότητας, υπολογίζεται ο όγκος του χαλκού χωρίς το μικροπορώδες του που καταλαμβάνεται στον αφρό . Εφόσον είναι γνωστό από το δοκίμιο χαλκού το μικροπορώδες στην συγκεκριμένη πίεση συνένωσης, υπολογίζεται ο όγκος του χαλκού που καταλαμβάνεται μαζί με το μικροπορώδες του.

Έπειτα εφόσον είναι γνωστός ο όγκος του αφρού, βρίσκεται το μακροπορώδες αφαιρώντας τον όγκο του αφρού από τον όγκο που καταλαμβάνει ο χαλκός μαζί με το μικροπορώδες του .

μάζα χαλκ. (gr)	όγκος αφρού (mm^3)	Πυκνότητα Χαλκού ($\frac{gr}{cm^3}$)	Πορώδες Χαλκού	Όγκος χαλκού χωρίς πορ. mm^3	όγκος χαλκού με πορώδες του (mm^3)	όγκος μακρ. (mm^3)	όγκος μικρ. mm^3	δοκίμια
17,054	8212	8,96	0,3018	1903	2726	5487	823	άσπρης
17,054	8224	8,96	0,3018	1903	2726	5499	823	καστανής

Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο.5-7:ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΟΓΚΩΝ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΣΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΣΠΡΗΣ , ΚΑΣΤΑΝΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΥΡΟΣΥΣΣΩΜΑΤΟΣΗ

Το μικροπορώδες του αφρού σε ποσοστό ως προς τον συνολικό όγκο κάθε δοκίμιου είναι σχεδόν το ίδιο και ελαφρώς μεγαλύτερο στο δοκίμιο της άσπρης ζάχαρης (για το δοκίμιο άσπρης είναι 10 % , για την καστανής ζάχαρης 10%)

Το μακροπορώδες σαν ποσοστό επί του συνολικού όγκου είναι, για την άσπρη ζάχαρη 69,858 % , ενώ για την καστανή ζάχαρη 66,8%.

Το συνολικό ποσοστό πορώδους επί του συνολικού όγκου είναι για την άσπρη ζάχαρη είναι :

Για το δοκίμιο άσπρης ζάχαρης : $\Pi. \alpha = 76,825\%$

Για το δοκίμιο καστανής ζάχαρης : $\Pi. \kappa = 76,859\%$

Τέλος η πυκνότητα του αφρού δίνεται ως : $\rho f = \frac{m_{cu}}{V}$

Για το δοκίμιο άσπρης ζάχαρης είναι : $\rho f \cdot a = \frac{2,08gr}{cm^3}$

Για το δοκίμιο καστανής ζάχαρης είναι : $\rho f \cdot k = \frac{2,07gr}{cm^3}$

Και οι αντίστοιχες σχετικές είναι : $\rho_{rel} = \frac{\rho f}{\rho_{cu}}$

Για το δοκίμιο άσπρης ζάχαρης είναι : $\rho_{rel} \cdot \alpha = 23,175$

Για το δοκίμιο καστανής ζάχαρης είναι : $\rho_{rel} \cdot \kappa = 23,142$

Αφού υπολογίσαμε το πορώδες, μακροπορώδες και μικροπορώδες, θα υπολογίσουμε το μακροπορώδες με το πρόγραμμα imagej .

Η διαδικασία που θα εξακολουθήσουμε είναι η εξής :

A) φωτογραφίζουμε τα δοκίμια σε χώρο χωρίς εξωτερικό φωτισμό, με εσωτερικό φωτισμό που πέφτει με μικρή γωνία στην τομή του δοκίμιου για να πετύχουμε μεγάλη αντίθεση χαλκού-μικροπορώδους και μακροπόρων, έχοντάς τα μεγεθύνει σε οπτικό μικροσκόπιο.

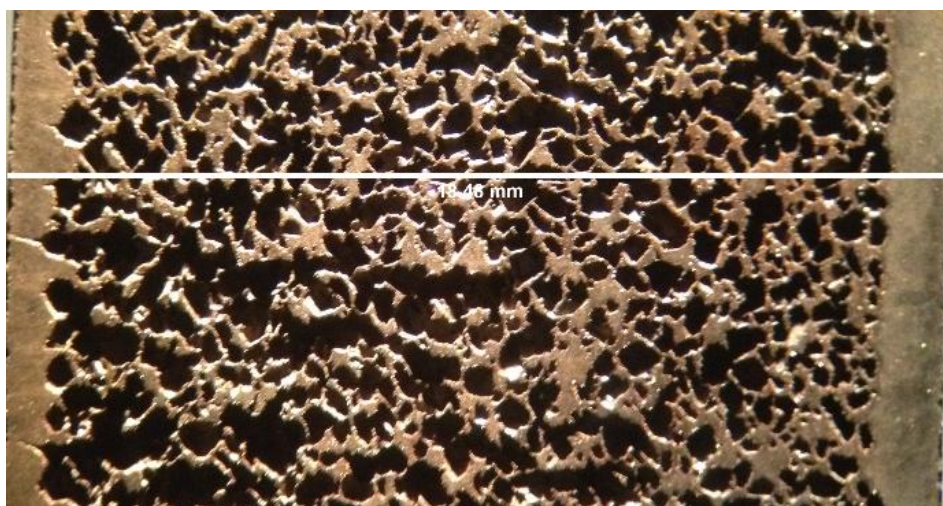
B) Εισάγουμε τις εικόνες στο πρόγραμμα IMAGEJ και ακολουθούμε επεξεργασία ώστε να διακριθούν καλύτερα οι πόροι, κατά την οποία μεγαλώνουμε την αντίθεση και την φωτεινότητα ώστε να πάρουμε καλή ποιότητα εικόνας (file=>open, image=>adjust=> brightness/contrast).

Γ) Μετατρέπουμε την εικόνα σε κλίμακα του γκρι και στην συνέχεια την μετατρέπουμε σε 2 χρώματα μαύρο-άσπρο για να καταδειχτούν ο χαλκός μαζί με το μικροπορώδες του και το μακροπορώδες αντίστοιχα (process => make binary)

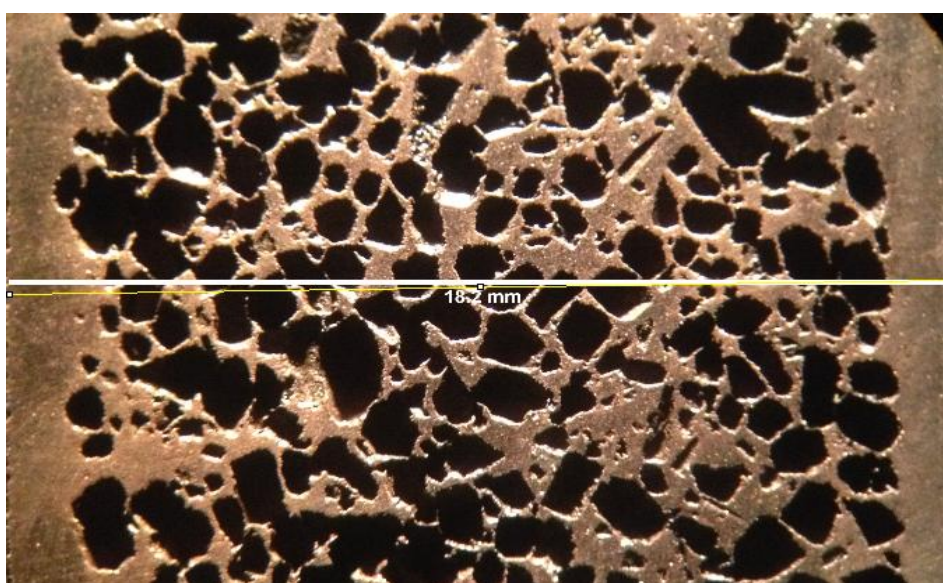
Δ) Έπειτα εισάγουμε πλέγμα στην τομή των δοκιμίων και βρίσκουμε το ποσοστό του μακροπορώδους που αποτυπώνεται στην εικόνα σε σχέση με την συνολικά επιλεγμένη επιφάνεια (Image=>type=>8bit, process=>make binary, analyze=>particle analysis)

Ε) Τέλος εισάγουμε τις διαστάσεις που μας ενδιαφέρουν ώστε να καταγράψουμε και να αναλύσουμε τα αποτελέσματα στο excel δημιουργώντας τα διαγράμματα που μας ενδιαφέρουν (analyze=>tools=>set scale)

Παρακάτω παραθέτουμε τις εικόνες της τομής των δοκιμίων άσπρης και καστανής ζάχαρης που έχουμε λάβει από το μικροσκόπιο, φωτογραφίζοντάς τα με κατάλληλο φωτισμό (σκοτεινή αίθουσα και μικρή γωνία λαμπτήρα για καλύτερη αποτύπωση των δοκιμίων). Στις φωτογραφίες έχουμε προσθέσει ένα χαρακτηριστικό μήκος, αυτό του ύψους της τομής των δοκιμίων, για να αποκτήσουμε εικόνα του μεγέθους και των υπολοίπων γεωμετρικών χαρακτηριστικών.



ΕΙΚΟΝΑ. Π-5-1: ΔΟΚΙΜΙΟ ΛΕΥΚΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ ΦΥΛΛΩΝ 2gr + 2gr



ΕΙΚΟΝΑ. Π-5-2: ΔΟΚΙΜΙΟ ΚΑΣΤΑΝΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ ΦΥΛΛΩΝ 2gr + 2 gr

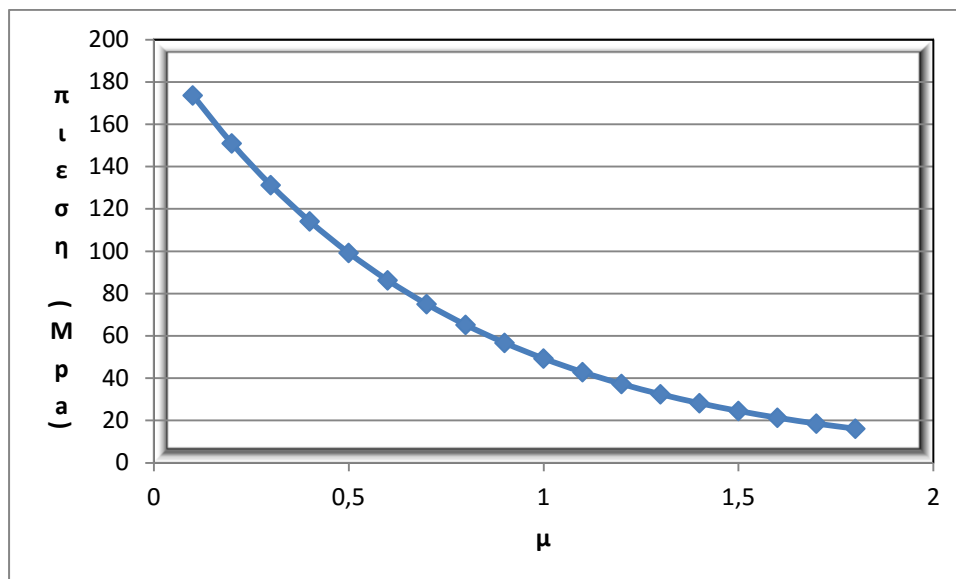
Εκτός από την πυκνότητα των δοκιμίων που είναι συνάρτηση της πίεσης μονοαξονικής συμπίεσης από την πρέσα, υπάρχει και εξάρτηση από το μήκος του δοκιμίου. Η τελική πίεση συμπίεσης δεν είναι ισοδιανεμημένη σε όλο το δοκίμιο άλλα έχει μια εξάρτηση από την απόστασή της από το κάτω μέρος του εμβόλου, σύμφωνα με το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 15 [50] , [51].

Για πίεση 199,645 Μρα, διάμετρο μήτρας 25 mm, η διανομή πίεσης για $\mu'=\mu$ θεωρώντας $k=1$ και $L=17,5$ mm, η διανομή της πίεσης συμπίεσης διαμορφώνεται ως :

$\sigma_a(\chi) = 199,645 * e^{-2*17,5*\frac{\mu}{12,5}}$, με μόνη παράμετρο προς προσδιορισμό τον συντελεστή μ που καθορίζει τις συνθήκες τριβής με τα πλευρικά τοιχώματα. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι τιμές πίεσης συμπίεσης για διάφορους συντελεστές τριβής και αμέσως μετά το αντίστοιχο διάγραμμα:

Συντελεστής τριβής μ	Πίεση σε απόσταση 17,5 mm από το έμβολο(Μρα)
0,1	173,56
0,2	150,89
0,3	131,18
0,4	114,04
0,5	99,14
0,6	86,19
0,7	74,93
0,8	65,14
0,9	56,63
1	49,23
1,1	42,8
1,2	37,21
1,3	32,35
1,4	28,12
1,5	24,45
1,6	21,25
1,7	18,48
1,8	16,06

Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο.5- 8: ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΙΜΩΝ ΠΙΕΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΚΟΝΕΩΝ ΣΕ ΑΠΟΣΤΑΣΗ 17,5 ΑΠΟ ΤΟ ΕΜΒΟΛΟ ΓΙΑ ΜΗΤΡΑ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ 25ΜΜ ΚΑΙ ΠΙΕΣΗ ΣΤΗΝ ΚΟΥΡΥΦΗ ΤΟΥ ΕΜΒΟΛΟΥ 199,65ΜΡΑ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ:Π.5-1 : ΠΙΕΣΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΣΕ ΑΠΟΣΤΑΣΗ 17,5 mm ΑΠΟ ΤΟ ΠΑΝΩ ΜΕΡΟΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (ΣΗΜΕΙΟ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕ ΤΟ ΕΜΒΟΛΟ)

Παρατηρούμε ότι για μηδενικό συντελεστή τριβής, η πίεση είναι ομοιόμορφη παντού 199,65 Μρα για 0,1 στο ανώτερο σημείο 199,65 Μρα και στο κατώτερο 173 Μρα, ενώ για $\mu=1,8$ στο κατώτερο σημείο της σκόνης είναι $\sigma(17,5\text{mm})= 16$ Μρα. Κατά συνέπεια για τον θεωρητικό υπολογισμό της πίεσης πρέπει να βρεθεί ο συντελεστής τριβής.

Παρατηρώντας τις σημαντικές διαφορές, συμπεραίνουμε ότι η συμπίεση αρά και η συνένωση θα εμφανίζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις κατά διάφορα ύψη του κάθε δοκιμίου.

Έτσι εξηγείται γιατί οι θραύσεις στο πρώτο μέρος των πειραμάτων εμφανίστηκαν στο πάνω μέρος του δοκιμίου, ενώ στον τελευταίο κύκλο πειραμάτων παρατηρήσαμε μια μικρή αποκόλληση υλικού στο κάτω μέρος του δοκιμίου καστανής ζάχαρης, η οποία εξηγείται από την μη ικανοποιητική συνένωση των κόνων εξαιτίας της χαμηλότερης πίεσης συμπίεσης σε εκείνο το επίπεδο..

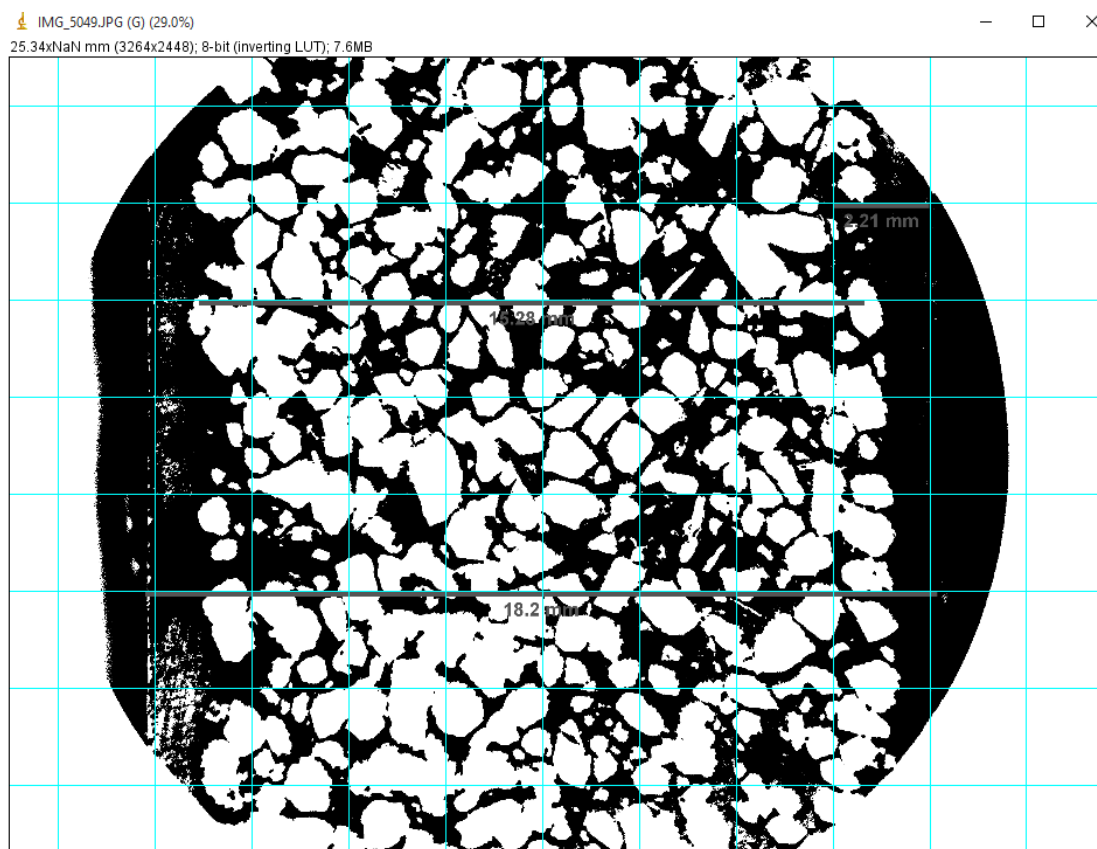


ΕΙΚΟΝΑ.Π.5-3: ΤΟΜΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΣΤΑΝΗΣ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) , ΑΣΠΡΗΣ (ΔΕΞΙΑ)

Στην καστανή ζάχαρη διακρίνουμε με το μάτι ότι υπάρχουν περιοχές, στις οποίες το πορώδες είναι μεγαλύτερο, κυρίως όσο η απόσταση από το πάνω μέρος, όπου οι κόνοι

εφάπτονται με το εμβολο προς το κάτω μέρος, όπου έρχονται σε επαφή με την μήτρα, μεγαλώνει.

Προκειμένου να εντοπίσουμε τι εξάρτηση υπάρχει στο μακροπορώδες από την διαφορά πίεσης συμπίεσης και γενικότερα για να εξετάσουμε την διαφορά μακροπορώδους και κατά συνέπεια την διαφορά πυκνότητας του αφρού σε διαφορετική απόσταση από το έμβολο, χωρίζουμε κάθε δοκίμιο σε ένα πλέγμα 6 καθέτων λωρίδων και 7 οριζοντίων, όπως φαίνεται στο σχήμα. Στη συνέχεια βρίσκουμε το ποσοστό της επιφάνειας μαύρο (image) διατηρώντας ίδια αντίθεση και φωτεινότητα σε κάθε τετράγωνο και σε κάθε ένα από τα δοκίμια.



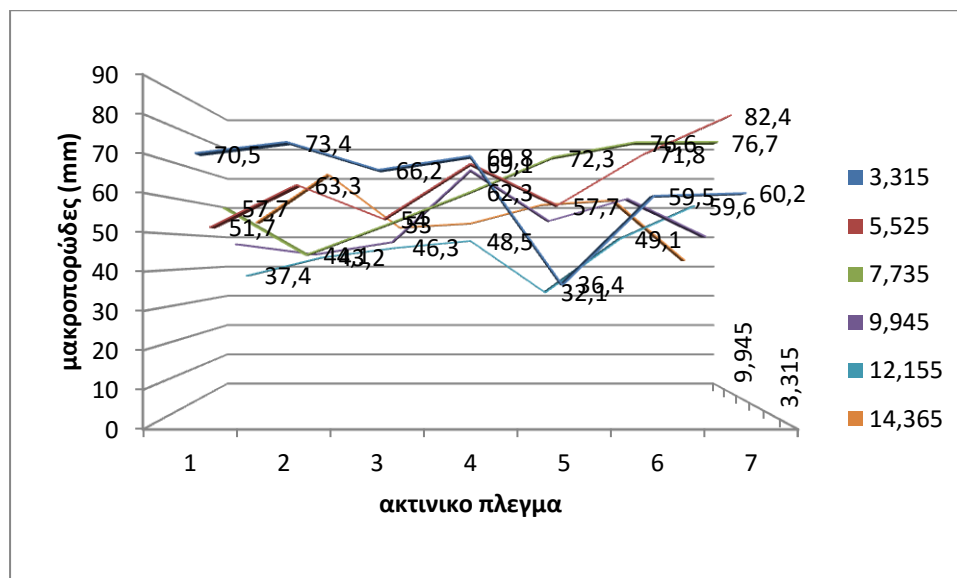
ΕΙΚΟΝΑ Π.5-4: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΝΝΑΒΟΥ ΣΤΗΝ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΜΑΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΟΥ ΚΑΤΑΛΑΜΒΑΝΕΙ Ο ΧΑΛΚΟΣ ΜΑΖΙ ΜΕ ΤΟ ΜΙΚΡΟΠΟΡΩΔΕΣ ΤΟΥ.

Στον παρακάτω πίνακα στον οποίο παραθέτουμε το μακροπορώδες, κάθε κουτί του αντιστοιχεί χωρικά στο αντίστοιχο τετράγωνο του πλέγματος της φωτογραφίας:

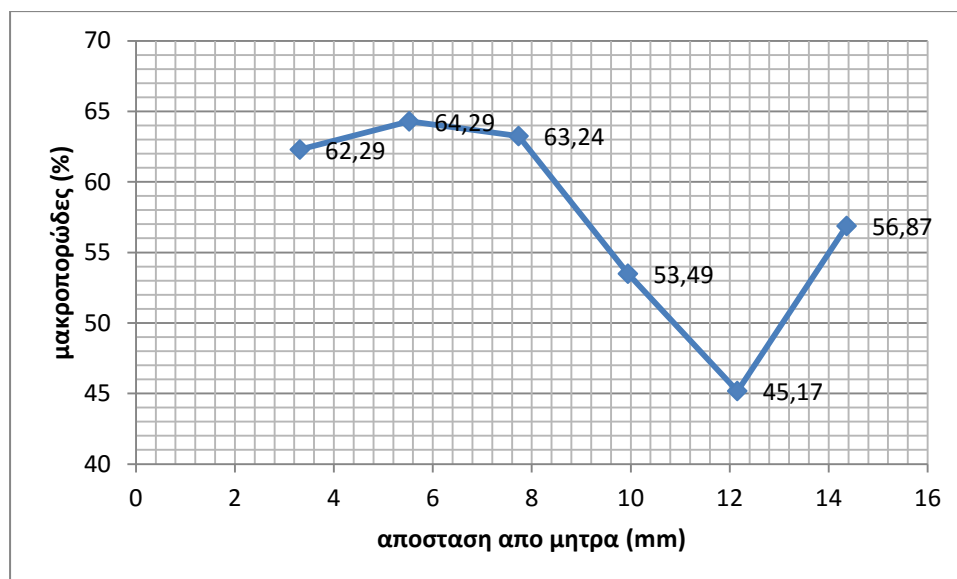
Εύρεση μακροπορώδους για δοκίμιο καστανής 2gr+2gr (%)							
	Λωρίδα 1	Λωρίδα 2	Λωρίδα 3	Λωρίδα 4	Λωρίδα 5	Λωρίδα 6	Μέση τιμή
Λωρίδα α1	70,5	51,7	57,7	47,3	37,4	54,7	53,2
Λωρίδα α2	73,4	63,3	44,1	44,2	43,2	70,8	56,5
Λωρίδα α3	66,2	54	53	48	46,3	53,1	53,4
Λωρίδα α4	69,8	69,1	62,3	69,8	48,5	54,5	62,3
Λωρίδα α5	36,4	57,7	72,3	54,4	32,1	60,7	52,2
Λωρίδα α6	59,5	71,8	76,6	61,1	49,1	62,2	63,3

Λωρίδα α7	60,2	82,4	76,7	49,6	59,6	42,1	61,7
Μεση τιμή	62,29	64,3	63,2	53,5	45,2	56,9	Σύνολο
Απόσταση	3,315	5,525	7,735	9,945	12,155	14,365	57,6

ΠΙΝΑΚΑΣ Π.5.10: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΑΚΡΟΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΣΤΑΝΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ ΚΑΤΑ ΤΕΤΡΑΓΩΝΑ ΚΑΙ ΛΩΡΙΔΕΣ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΠ5-2 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΟΡΟΔΟΥΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ IMAGEJ , ΟΙ ΓΡΑΜΜΕΣ ΔΕΙΧΝΟΥΝ ΛΩΡΙΔΕΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΓΡΑΦΟΜΕΝΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΒΑΣΗ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΣΤΑΝΗΣ ΣΕ ΜΙΑ ΔΙΑΝΟΜΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΜΕΤΡΟ



Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Π.5-3 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΟΡΟΔΟΥΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΥΨΟΣ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΜΕ ΑΡΧΗ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕ ΤΟ ΚΑΤΩ ΜΕΡΟΣ ΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

Το μήκος του τμήματος του αφρού που είναι παράλληλο και εγγύτερα στην επιφάνεια επαφής του εμβόλου και του αφρού είναι η δεξιά λωρίδα.

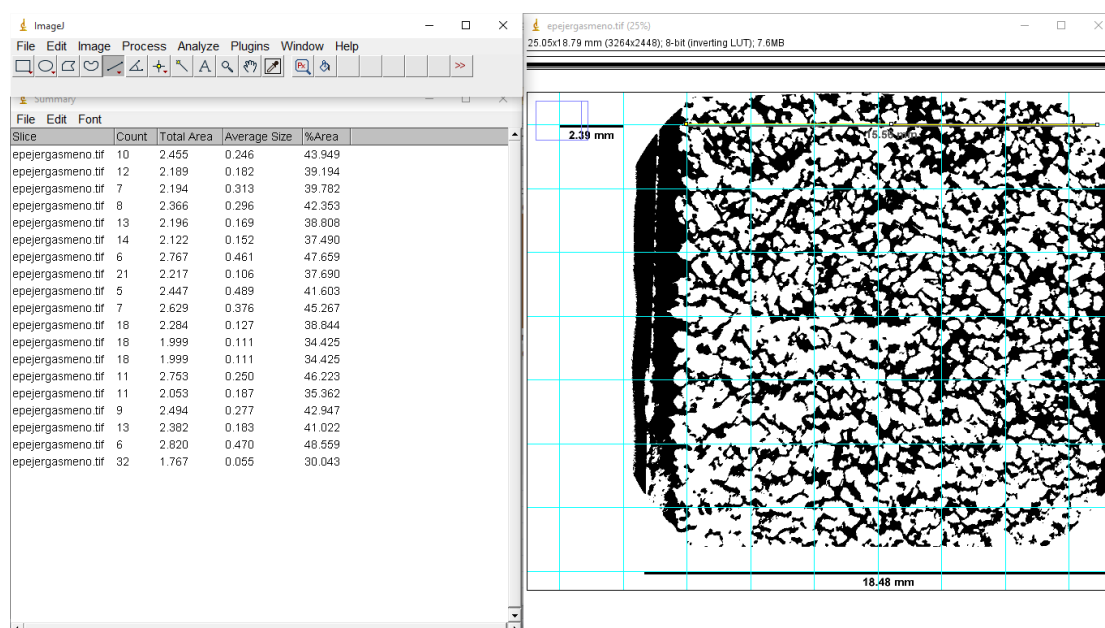
Όπως είναι γνωστό, η μεγαλύτερη πίεση συμπίεσης ασκείται στην δεξιά λωρίδα και βαίνει μειούμενη όσο προσεγγίζουμε την αριστερή .

Δεν πρέπει να επιχειρηθεί άμεση συσχέτιση του μακροπορώδους με την τάση συμπίεσης, καθώς συνυπάρχουν φαινόμενα , ανομοιομορφίας των κόνων κατά την διάρκεια της συμπίεσης κτλ.

Το δοκίμιο καστανής όπως βλέπουμε από το διάγραμμα εμφανίζει μεγαλύτερο πορώδες στην βάση του αυξανόμενο προς την περιοχή επαφής με το εμβολο της μητρας

Με επιφύλαξη την επίδραση της βαρύτητας και την μη καλή ομογενοποίηση, μπορεί να λεχθεί ότι το φαινόμενο της μείωσης της τάσης συμπίεσης, όσο πιο κοντά στην βάση της μήτρας πλησιάζουμε, τόσο μειώνεται

αι και η πυκνότητα του αφρού σε αυτή την περιοχή .

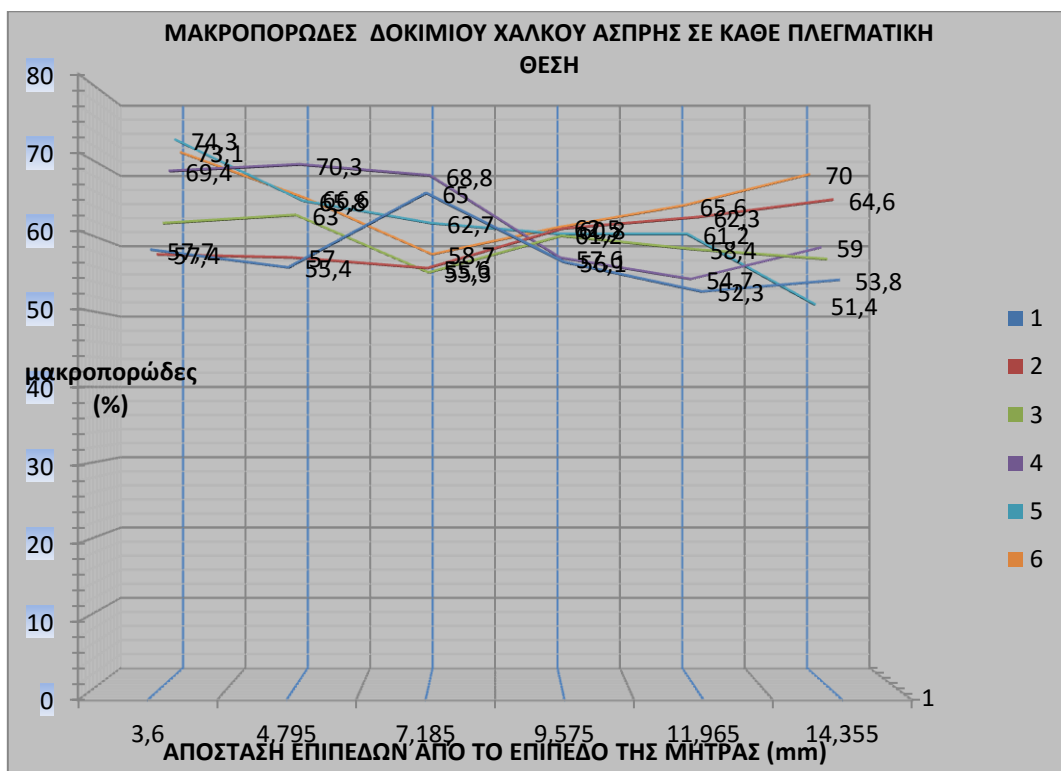


ΕΙΚΟΝΑ Π.5.5: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΝΑΒΟΥ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΑΣΠΡΗΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑ ΤΕΤΡΑΓΟΝΟ ΤΗΣ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΧΑΛΚΟΥ ΜΕ ΤΟ ΜΙΚΡΟΠΟΡΩΔΕΣ ΤΟΥ.

εύρεση μακροπορώδους δοκιμίου άσπρης κρυσταλλικής 2gr+2gr (%)							
λωρίδα κ 1	λωρίδα κ 2	λωρίδα κ 3	λωρίδα κ 4	λωρίδα κ 5	λωρίδα κ 6		σύνολο α
57,7	55,4	65	56,1	52,3	53,8	λωρίδα α1	57,3
57,4	57	55,6	60,8	62,3	64,6	λωρίδα α2	58,62
61,9	63	55,3	60,2	58,4	57,1	λωρίδα α3	59,76
69,4	70,3	68,8	57,6	54,7	59	λωρίδα α4	64,16
74,3	65,8	62,7	61,2	61,2	51,4	λωρίδα α5	65,04

73,1	66,6	58,7	62,5	65,6	70	λωρίδα α6	65,3
65,7	63,1	61,1	59,9	59,1	59,3	σύνολο	61,78
3,6	4,795	7,185	9,575	11,965	14,355	απόσταση	

ΠΙΝΑΚΑΣ.Π.5.11: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΑΚΡΟΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΑΣΠΡΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ ΚΑΤΑ ΤΕΤΡΑΓΩΝΑ ΚΑΝΑΒΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΛΩΡΙΔΕΣ

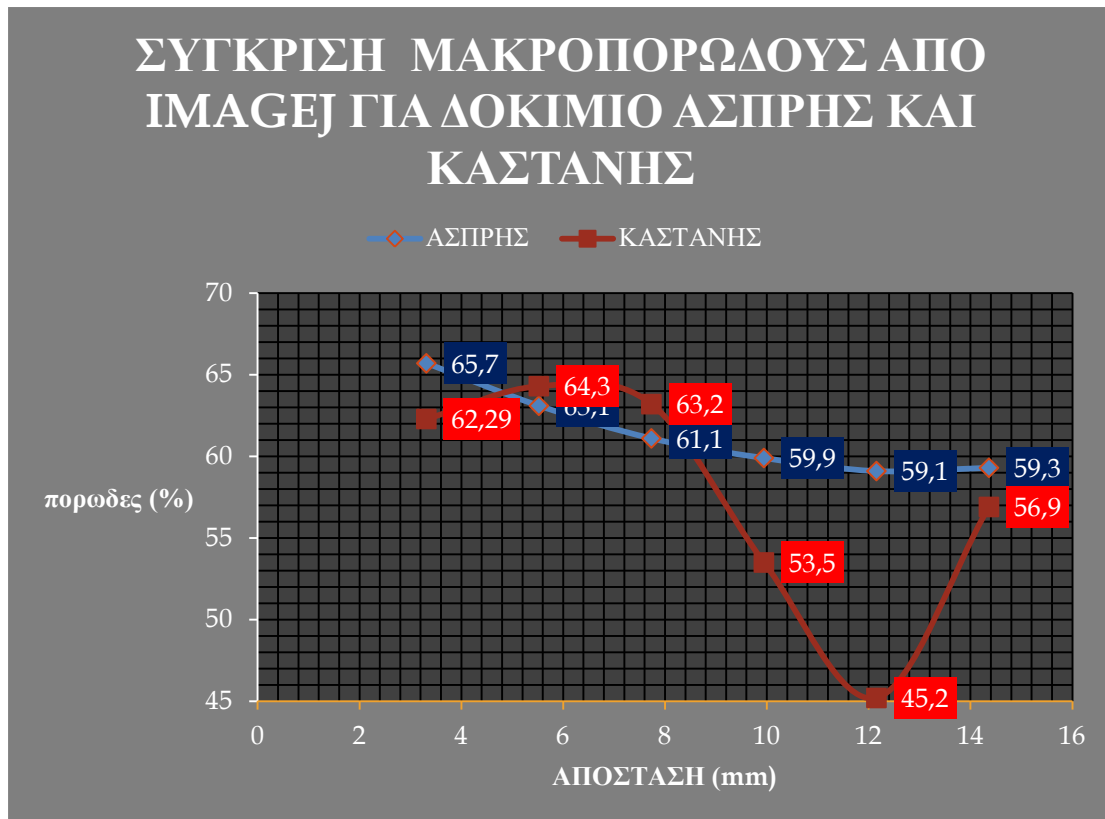


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Π.5-4: ΜΑΚΡΟΠΟΡΩΔΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΑΣΠΡΗΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑ ΥΨΟΣ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΙΚΑ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Π.5-5 : Η ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΜΑΚΡΟΠΟΡΩΔΟΥΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΒΑΣΗ ΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

Παρακάτω παραθέτουμε τα αποτελέσματα του μακροπορώδους από το imagej σε σύγκριση με τα υπολογισθέντα:



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Π.5-6 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΜΑΚΡΟΠΟΡΩΔΟΥΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΗΤΡΑ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΣΠΡΗΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΙ ΚΑΣΤΑΝΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ

Δοκίμιο	Μακροπορώδες (%) από imagej	Σχετική πυκνοτα αφρου από imagej	Μικροπορώδες από imagej	Μακροπορώδες (%) υπολογισθέν 1 ^ο δοκίμιο	Σχετική πυκνότητα υπολογισθείσα (%) 1 ^ο δοκίμιο
Καστανής ζάχαρης (2gr+2gr)	57,6	29,7	12,7	66,857	23,142
Λεύκης κρυσταλλικής ζάχαρης (2gr+2 gr)	61,8	26,7	11,55	66,809	23,175

ΠΙΝΑΚΑΣ.Π-5-11 ΜΑΚΡΟΠΟΡΩΔΕΣ ΑΠΟ ΤΟ IMAGE J ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΥΠΑΡΧΟΝΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Υπολογισμός από την γεωμετρία των δοκιμών άσπρης και καστανής ζάχαρης φύλλων 4gr + 4 gr.

ΠΙΝΑΚΑΣ Π.5.12	
δοκ. κ.ζ	δοκίμιο α.ζ
βάρους κ.ζ(gr)	βάρους α.ζ(gr)
14,012	13,808
ογκ. Κ.ζ(mm ³)	ογκ. α.ζ(mm ³)
6454	6371
πυκν. Κ.ζ ($\frac{gr}{cm^3}$)	πυκν. α.ζ ($\frac{gr}{cm^3}$)
2,17	2,16
σχετική πυκν. Κ.ζ (-)	σχετική πυκν α.ζ (-)
0,242	0,241

Διαμετρος δοκιμίου καστανης (mm)	Διαμετρος δοκιμίου ασπρης (mm)
24,79	24,72
24,87	24,72
24,,87	24,71
24,78	24,72
24,83	24,77
μέσες διαμ(mm)	
24,8	24,7

ύψος κ.ζ(mm)	ύψος α.ζ(mm)
13,33	13,34
13,39	13,61
13,13	13,34
13,09	13,12
13,34	13,13
13,47	13,11
13,52	13,23
13,56	13,46
13,14	13,05
μέσα ύψη κ.ζ , αζ (mm)	
13,33	13,27

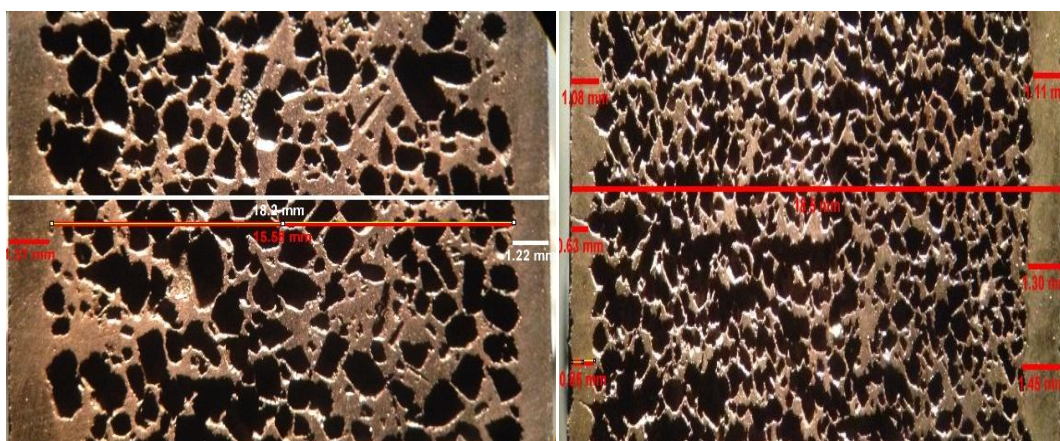
ΠΙΝΑΚΕΣ Π.5.12: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΣΤΑΝΗΣ ΚΑΙ ΑΣΠΡΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΔΕΥΤΕΡΟ ΖΕΥΓΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Τμήθηκαν τα φύλλα του χαλκού πάνω και κάτω και μετρήθηκαν οι διάμετροι και τα ύψη τόσο στα δοκίμια καστανής όσο και στο δοκίμιο άσπρης ζάχαρης σε διάφορα σημεία, όπως φαίνεται από τους παρακάτω πίνακες, και υπολογίστηκαν η μέση διάμετρος και το μέσο ύψος σε κάθε ένα δοκίμιο. Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο όγκος τους και τέλος η πυκνότητα, η σχετική πυκνότητα τους από το βάρος που έχει μετρηθεί ήδη. Από τις μετρήσεις των 2 δοκιμίων καστανής και των 2 δοκιμίων άσπρης, διαπιστώνουμε ότι οι αφροί έχουν σχετική πυκνότητα περίπου 23,1%-25,6% . Με το πρόγραμμα imagej υπολογίζεται, τοποθετώντας το πορώδες του χαλκού στο 30%, η σχετική πυκνότητα 26-29% για τα δοκίμια άσπρης και καστανής αντίστοιχα, ενώ αν ο υπολογισμός γίνει με βάση το ύψος του αφρώδους μέρους του δοκιμίου δεδομένης ποσότητας χαλκού που περιέχεται στο αρχικό μίγμα, τότε βρίσκουμε 25,5% και για τα δυο δοκίμια. Με μια απόκλιση 10% μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η σχετική πυκνότητα των δοκιμίων κινείται μεταξύ 23-26%.

Μένει να μελετηθεί πόση αποκλιση έχει το μικροπορώδες από αυτό που θεωρήθηκε (έτσι εξηγείται και η αποκλιση της πυκνότητας που βρέθηκε από τις μετρήσεις από το image j πέρα από τυχόν σφάλμα επεξεργασίας εικόνας).

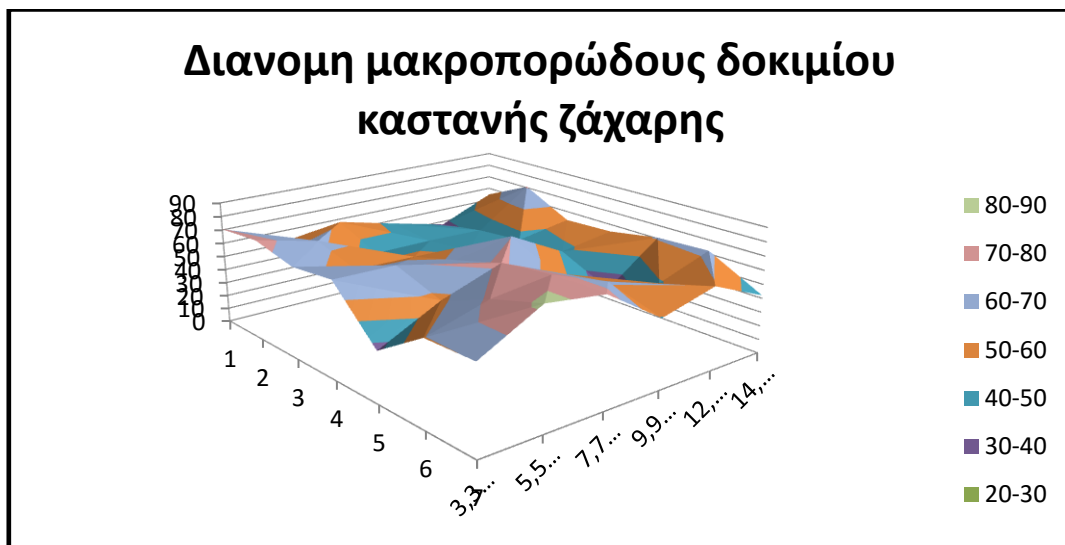
Για πορώδες 40% το πάχος του φύλλου άσπρης προσεγγίζεται καλύτερα από την θεωρητική επεξεργασία έχοντας καλλίτερα αποτελέσματα με την εικόνα που προκύπτει.

Τέλος από την γεωμετρία που προκύπτει από το imagej όπως δείχνει η παρακάτω εικόνα και σε συνδυασμό με το βάρος και την γεωμετρία που δίνεται από το δοκίμιο με τα κομμένα φύλλα προκύπτει ο κάτω πίνακας:



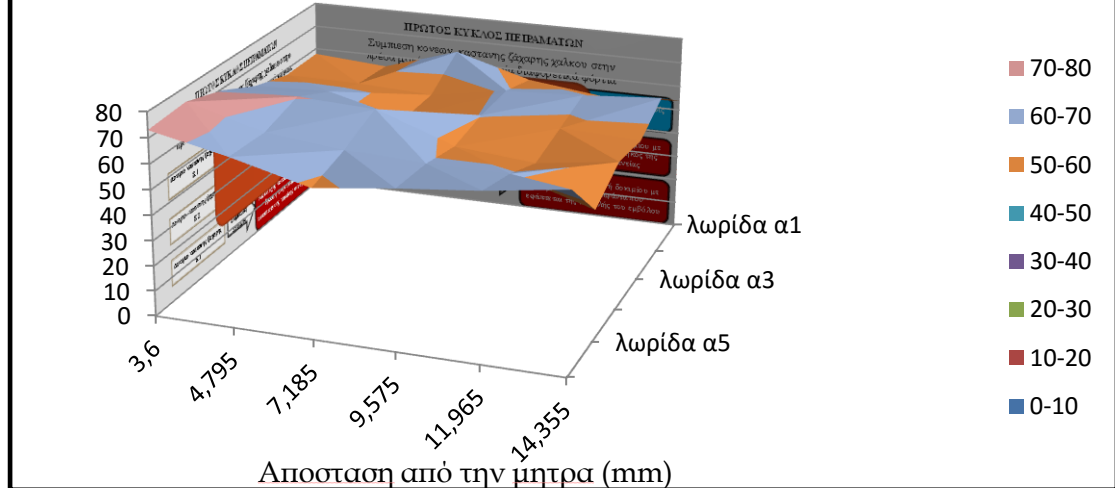
δοκίμιο	μακροπορώδες	μικροπορώδες	Σχετική πυκνότητα
άσπρης	62,2%	14,8%	23%
καστανής	62,3%	15%	22,7%

Η διανομή των πόρων βρέθηκε ότι ήταν σημαντικά πιο ομοιόμορφη στα δοκίμια άσπρης κρυσταλλικής σε σχέση με τα δοκίμια της καστανής. Παρατηρήθηκε μετατόπιση της ζάχαρης σε χαμηλότερο επίπεδο προς την βάση της μητρας. Ο μηχανισμός της μετατόπισης εντοπίζεται στις δυνάμεις που ασκούνται στην ζάχαρη οι οποίες σχετίζονται με το μέγεθος της και ωθούν τις μεγαλύτερες κόνεις ζάχαρης πιο έντονα σε χαμηλότερα επίπεδα του δοκιμίου.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Π.5-7: ΔΙΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΜΑΚΡΟΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΣΤΑΝΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΗΤΡΑ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΙΚΑ

ΔΙΑΝΟΜΗ ΜΑΚΡΟΠΟΡΩΔΟΥΣ ΚΑΤΑ ΥΨΟΣ ΚΑΙ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΚΑΘΕ ΥΨΟΣ ΑΣΠΡΗΣ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Π.5-8: ΔΙΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΜΑΚΡΟΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΣΤΑΝΗΣ ΖΑΧΑΡΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΗΤΡΑ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΙΚΑ

22. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετα από την πειραματική διαδικασία εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

Το συνδετικό μέσο αιθανόλη ενισχύει την αντοχή του συμπίεσματος, καθώς σε αυτά τα δοκίμια παρατηρήθηκε λιγότερη αποβολή υλικού, ενώ τα δοκίμια εμφάνισαν μια πιο ομοιογενή διανομή πόρων.

Ο αυξημένος χρόνος παραμονής των κόνων (10 λεπτά) υπο φορτίο μέσα στην πρέσα, οδηγεί σε ισχυρότερους μεταλλικούς δεσμούς και κατά συνέπεια σε ισχυρότερα συμπίεσματα με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.

Η προσθήκη μικρής ποσότητας χαλκού πάνω και κάτω από το μίγμα μέσα στην πρέσα και ο σχηματισμός φύλλων χαλκού (δομή σάντουιτς) οδήγησε σε πιο στιβαρά δοκίμια με εντυπωσιακά αποτελέσματα στην παρεμπόδιση αποβολής υλικού χαλκού κατά την διαδικασία της υδατοδιάλυσης, μεταφοράς, πυροσυσσωμάτωσης.

Η υδατοδιάλυση σε υψηλή θερμοκρασία είχε πολύ καλύτερα αποτελέσματα ως προς το υπόλειμμα άνθρακα λόγω ζάχαρης ενώ η καλλίτερη υδατοδιάλυση για τον ίδιο κατ' όγκο ζάχαρης παρατηρήθηκε στα δοκίμια άσπρης κρυσταλλικής ζάχαρης. Συμπεραίνεται ότι ο χρόνος υδατοδιάλυσης πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερος των 30 λεπτών σε θερμοκρασία 70 °C για να έχουμε αμελητέα υπολείμματα ζάχαρης (Τα υπολείμματα άνθρακα θα είναι σημαντικά στα δοκίμια καστανής γιατί υπάρχει σημαντικός εγκλωβισμένης ζάχαρης στα κλειστά κελιά).

Η διανομή πόρων και το μέγεθος πόρων στα δοκίμια άσπρης κρυσταλλικής ζάχαρης είναι πολύ πιο ομοιόμορφα σε σχέση με τα δοκίμια που περιείχαν καστανή. Μπορεί να εξαχθεί το ασφαλές συμπέρασμα ότι η άσπρη κρυσταλλική παράγει αφρούς ικανοποιητικής δομής πορώδους και διανομής μεγέθους.

Παρατηρήθηκε επίσης εξάρτηση ιδιαίτερα σημαντική στο πορώδες του δοκιμίου με την καστανή ζάχαρη από την μειούμενη ανάλογα με την απόσταση από το έμβολο πίεσης συμπίεσης της πρέσας λόγω ύπαρξης τριβής ενώ διαπιστώθηκε πολύ μικρότερη εξάρτηση στο δοκίμιο με την άσπρη κρυσταλλική.

Η βέλτιστη πίεση στην οποία παράχθηκαν αφροί χωρίς αστοχίες και για τις δυο περιπτώσεις διαπιστώθηκε ότι είναι τα 200 Μρα ενώ σε μεγαλύτερες πιέσεις είχαμε οριζόντια θραύση και ανάπτυξη ρωγμών για κάποια από τα δοκίμια άσπρης η κρυσταλλικής η και για τα δυο όπως αναφέρθηκαν στο πρώτο κύκλο πειραμάτων. Το ύψος που γίνεται η θραύση σχετίζεται με την διανομή πίεσης ενώ ο μηχανισμός της θραύσης εντοπίζεται στις έντονες εφελκυστηκές τάσεις που αναπτύσσει η ζάχαρη στο υλικό του χαλκού σε συνδυασμό με την τριβή στα τοιχώματα του δοκιμίου. Διαπιστώθηκε ότι η καλλίτερη λίπανση, ο χρόνος παραμονής υπο φορτίο είναι παράγοντες που ενισχύουν τις μηχανικές ιδιότητες του αφρού μη επιτρέποντας την θραύση του από τις εφελκυστηκές δυνάμεις που ασκούνται λογο ελαστικής παραμόρφωσης της ζάχαρης. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι ο εξολκέας απαιτείται να είναι σκληρός και απαραμόρφωτος για τα φορτία που μας ενδιαφέρουν, καθώς παρατηρήθηκε ότι πολυμερής εξολκέας συστελλόταν και επαναφερόταν διαδοχικά εξασκώντας επαναλαμβανόμενα κρουστικά φορτία στο παραγόμενο δοκίμιο οδηγώντας το σε θραύση.

Δεν παρατηρήθηκε αρνητική επίδραση του λιπαντικού στην ποιότητα του χαλκού.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός που παρατηρήθηκε κατά την πυροσυσσωμάτωση, η ύπαρξη δηλαδή μιας μικρής συρρίκνωσης του δοκιμίου που μας οδηγεί στο

συμπέρασμα ότι το πορώδες μειώνεται λίγο κατά την πυροσυσσωμάτωση, κατά το ίδιο περίπου ποσοστό στα δοκίμια καστανής και άσπρης ζάχαρης.

Παρατηρήθηκε κατά την συμπίεση στο διάγραμμα τάσης-συμπίεσης μια απότομη πτώση της πίεσης συμπίεσης.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι διαπιστώθηκε στην πράξη η ύπαρξη μεγάλου ποσοστού διασυνδεδεμένων ανοικτών πόρων, καθώς η παροχή πεπιεσμένου αέρα σε εμποτισμένο με νερό δοκίμιο άσπρης και καστανής ζάχαρης, οδήγησε σε εμφάνιση φυσαλίδων σε όλη την πλευρική επιφάνεια των δοκιμίων.

Κατά την λίπανση και την εξαγωγή των συμπιεσμένων δοκιμίων παρατηρήθηκε ότι ο χαλκός είχε εμποτιστεί με το λιπαντικό σε ένα πάχος εισχώρησης 2-3 mm.

Ο εμποτισμός πορώδους χαλκού με λιπαντικό έχει τεράστια εφαρμογή στα εξαρτήματα εδράνων ολίσθησης (ρουλεμάν), όπως επίσης και σε εξαρτήματα που συνδέονται με κινούμενα μέρη μηχανών, με στόχο την αυτολίπανση των εμπλεκόμενων εξαρτημάτων. Η παραπάνω μέθοδος έχει σαν συνέπεια την αύξηση του χρόνου ζωής των εδράνων, την παραλαβή μεγαλύτερων φορτίων, την αύξηση του γινομένου ταχύτητας – πίεσης, την αυξημένη παραλαβή δυναμικών και στατικών φορτίων.

23. ΠΕΔΙΑ ΠΡΟΣ ΕΡΕΥΝΑ

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η βιβλιογραφική μελέτη και η εμπειρία από την πειραματική διαδικασία καθιστά αναγκαία την καταγραφή κάποιων προτάσεων που θα μπορούσαν να αποτελέσουν έναυσμα για περαιτέρω μελέτη και έρευνα πεδίων που αφορούν σε μεθόδους παραγωγής, παραμέτρους που επιδρούν στην παράγωγη μεταλλικών αφρών επιθυμητών ιδιοτήτων, με στόχο να αναπτυχθεί, να εξελιχθεί η γνώση σχετικά με την παραγωγή καινοτόμων προϊόντων υψηλής ποιότητας αξιοποιήσιμων στην επιστήμη, την παραγωγική διαδικασία, την καθημερινότητα όντας ταυτόχρονα οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμη.

Α. Έρευνα για την επίδραση του συνδετικού μέσου στην μηχανική αντοχή του συμπιεσμένου δοκιμίου με την μέθοδο του αποπλενομένου πληρωτικού μέσου, χρησιμοποιώντας διαφορετικά συνδετικά μέσα με διαφορετικά ποσοστά κατ' όγκο επί των κόνεων και για κάθε επιλεγμένο μέσο .

Β. Έρευνα για την περιοχή πιθανότερης ανάπτυξης ρωγμών, αστοχιών σε συμπιεσμένες κόνεις για διάφορα φορτία συμπίεσης, έπειτα επανεξέταση των αστοχιών και των ρωγμών μετά την απόπλυση και τέλος μετά την διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης.

Γ. Αναλυτικός προσδιορισμός της εξάρτησης ομοιομορφίας των πόρων από την ποσότητα ανάδευσης (ταχύτητα ανάδευσης επί τον χρόνο αυτής), η οποία θα εξετάζεται για κάθε μέθοδο ανάδευσης κόνεων με στόχο την παράγωγη μεγάλης ομοιομορφίας αφρών με την τεχνική της κονιομεταλλουργίας.

Δ. Αναλυτικότερη μελέτη της επίδρασης της τριβής και του συντελεστή τριβής στην διανομή του πορώδους των μεταλλικών αφρών, με την μέθοδο της κονιομεταλλουργίας κατά την διάρκεια της μονοαξονικής συμπίεσης. Οι παράμετροι που είναι κεφαλαιώδους σημασίας είναι το είδος του λιπαντικού , για κάθε λιπαντικό ή τάση συμπίεσης, για κάθε λιπαντικό και κάθε τάση συμπίεσης ταχύτητα της συμπίεσης.

Ε. Έρευνα κατάλληλων αποπλενομένων μέσων για την αποτελεσματική παραγωγή αφρών ανοικτών κελιών με την μέθοδο του πληρωτικού απομακρυνόμενου μέσου (η απομάκρυνση μπορεί να γίνει είτε με απόπλυση είτε με αποσύνθεση) με παραμέτρους το βαθμό διαπερατότητας από ρευστά (αέρια ή υγρά), την αντοχή τους , την παραλαβή θερμικών φορτίων.

Ζ. παραμετρικός προσδιορισμός ποσοστιαίας απομάκρυνσης αποπλενομένου μέσου με μεταβλητές την αναλογία του αποπλενομένου μέσου και τον χρόνο απομάκρυνσης, με στόχο να καθοριστούν για διάφορα αποπλενώμενα ή αποσυντιθέμενα μέσα, οι χρόνοι επιτυχούς εξάλειψης και να επιλεγθούν τα καταλληλότερα σε συνδυασμό με την ποιότητα πορώδους και την κατανομή μεγέθους πόρων .

Η. Προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των μεταλλικών αφρών παραγμένων από κόνεις με παραμέτρους το πορώδες τους, το αποπλενόμενο μεσο, την θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης, την πίεση συμπίεσης κόνεων, τον χρόνο παραμονής μέσα την πρέσα των συμπιεσμένων δοκιμίων υπο σταθερό φορτίο , υπό σταθερή συμπίεση και σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα μοντέλα ASHBY-GIBSON ή και άλλα

Θ. Μελέτη μέσω εμποτισμού των παραγμένων αφρών και κατάλληλη παραγωγή τέτοιων, για την καλύτερη λίπανση κινούμενων μεταλλικών μερών με παραμέτρους την ταχύτητα, το φορτίο, την ανάπτυξη θερμικών φορτίων. .

Ι. Ανάπτυξη πειραματικής διαδικασίας πυροσυσσωμάτωσης με στόχο την εύρεση της μεταβολής του πορώδους αφρών παραγμένων με την ίδια μέθοδο σε διαφορετικές θερμοκρασίες πυροσυσσωμάτωσης. Επίσης καταγραφή για κάθε διακριτή θερμοκρασία της μεταβολής του πορώδους για μεταλλικούς αφρούς διαφορετικού πορώδους.

Κ. Σημαντικό είναι επίσης να ερευνηθεί η διανομή της σκληρότητας που έχουν οι δοκίδες του μεταλλικού αφρού καθ' όλο το πλάτος τους με σημαντικά σημεία τη διαφορά σκληρότητας εκεί που τελειώνει το υλικό και αρχίζει ο πόρος, καθώς και στο μέσο του υλικού της δοκίδας (το σημείο που βρίσκεται μεταξύ δύο διαδοχικών πόρων). Αυτό μπορεί να εξηγήσει μια αυξημένη πυκνότητα στα όρια με το σκληρό αποπλενόμενο μέσο σε σχέση με αυτή στα κεντρικά σημεία του υλικού, λόγω αυξημένων θλιπτικών τάσεων.

Λ. Στην απαγωγή θερμότητας σημαντική είναι η επιφάνεια της ψύξης του εναλλάκτη κατά συνέπεια διαφόρων πορώδων αφροί ανοικτών κελιών από μητρικά μεταλλικά υλικά μπορούν να μελετηθούν για να διαπιστωθεί η ικανότητα τους να απάγουν θερμότητα με παράμετρο την ταχύτητα ροής (πεδίο εφαρμογής προθερμαντήρες Ιυνο με εναλλάκτη από αφρό χαλκού πλήρους ανοικτών κελιών). Παράμετροι που μπορούν να εισαχθούν είναι πίεση συμπίεσης καθώς και ο βαθμός πυροσυσσωμάτωσης.

Μ. Να ερευνηθεί για διάφορα δοκίμια αφρών η ενεργεία θραύσης τους , το διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης σε μονοαξονική και ισοστατική συμπίεση με εξαγωγή της τάσης plateau , της απορρόφησης ενέργειας , της ενέργειας θραύσης των σε κάθε περίπτωση. Οι δόκιμες μπορούν να γίνουν με παραμέτρους :

- Την μέθοδο παραγωγής με ίδιο πορώδες
- Διαφορετικά πορώδη με την ίδια μεθοδο παραγωγης
- Διαφορετικες πιέσεις συμπίεσης κόνεων
- Χρόνος παραμονής στην πρέσα υπο φορτίο
- Ποσοτητα λιπαντικού

Ν. Πειραματική διαδικασία για ικανότητα φιλτραρίσματος στερεών αιωρούμενων σωματιδίων σε αφρους ανοικτων κελιων διαφορων διαμετρών ανοικτών κελιών.

Ξ. Εξέταση φθοράς άξονα η πλακάς κατά την επαφή με λιπασμένο αφρό με παραμέτρους την σχετική ταχύτητα τους , το φορτίο επαφής των , το είδος του λιπαντικού , τον λόγο ταχύτητας φορτιού.

Ο) Μελετη με παράμετρο της τάσης συμπίεσης στην δομή και στην τοπολογία του μεταλλικού αφρού (μεγεθος πόρων, μικροπορώδες μακροπορώδες, σχετική πυκνότητα)

Π) Μελέτη με παράμετρο στον χρόνο συμπίεσης υπο σταθερό φορτιο στις διαστάσεις των δοκιμίων με αποπλενόμενο μεσο και μελέτη της δομής τους (σχετική πυκνότητα, μεγεθος πόρων , διανομή μικροπορώδους , μακροπορώδους.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Michael Ashby, Antony Evans, Norman A. Fleck, Lorna J. Gibson, John W. Hutchinson and Haydn N.G. Wadley, 2000, *metal foams- a design guide*, 1st Edition, BUTTERWORTH-HEINEMANN, USA
- [2] Lorna J. Gibson and Michael F. Ashby, 1988, *CELLULAR SOLIDS Structure and Properties*, second edition, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, UK
- [3] Yoshihiko Hangai , Takao Utsunomiya and Makoto Hasegawa,2009, 'Effect of tool rotating rate on foaming properties of porous aluminium fabricated by using friction stir processing', *Journal of Materials Processing Technology*
- [4] M. Shiomi , S. Imagama , K. Osakada and R. Matsumoto,19 June 2019, 'Fabrication of Aluminium foams from Powder by hot extrusion and foaming', , *Journal of Materials Processing Technology* ,vol. 210 ,p. 1203-1208
- [5] M. Strano , R. Pourhassan and V. Mussi , April 2013 , ' The effect of cold rolling on the foaming efficiency of aluminium precursors' , *Journal of Manufacturing Processes* , vol. 15 , p. 227-235
- [6] A. GöKce, F.Findik, October 2008, 'Mechanical and physical properties of sintered aluminum powder', *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 30
- [7] G.B. Shaffer, 2004,'Powder Processed Aluminium Alloys', MATERIALS FORUM, vol. 28
- [8] *Sintered Aluminum Powder (SAP), 2014*, <http://archive.is/eqLRs>
- [9] Ji Haibin, YAO Guangchun, LUO Hongjie, ZU Guodin and LIU Letian, 2010, 'compressive and energy absorption properties of closed-cell magnesium foams', *Rare Materials*, p. 417-420
- [10] Wikipedia the free encyclopedia, Magnesium, www.wikipedia.com
- [11]T.R. Neu, M. Mukherjee, F. Garcia-Moreno and J. Banhart, 2011, 'Magnesium and Magnesium Alloy Foams', 7th International conference on porous metals and metallic foams
- [12]Nikhil Gupta , Dung D. Luong and Kyu cho,24 July 2012 , ' Magnesium Matrix Composite Foams –Density ,Mechanical Properties and Applications' , *Metals* 2012, p. 238-252
- [13]HUGO RICARDO ZSCHOMLER SANDIM , BRUNO VIEIRA MORANTE AND PAULO ATSUSHI SUZUKI, July/Sept. 2005 , 'Kinetics of thermal decomposition of titanium hydride powder using in situ high-temperature X-ray diffraction (HTXRD)',*Materials Research* , vol. 8 , http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392005000300012&script=sci_arttext
- [14] S. SZYNISZEWSKI , BW SCHAFFER , JF HAJJAR , SR ARWADE , BH SMITH, 2011 ,'METAL FOAMS COMPUTATIONAL MONTELING OF STRUCTURAL APPLICATIONS', <http://www.steelfoam.org/stefan-emi-2011.pdf>
- [15] MASSIMILIANO BARLETTA, STEFANO GUARINO and ROBERTO MONTANARI, VINCENZO TAGLIAFERRI, 16 July 2007 ,'Metal foams for structural

applications: design and manufacturing', International Journal of Computer Intergrated Manufacturing , vol. 20 , issue 5 , p. 497-504

[16] JOHN BANHART, 'Manufacturing Routes for Metallic Foams', 20 July 2015, <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0012/Banhart-0012.html>

[17] FUSHENG HAN, GARY SELFFERT, YUYUAN ZHAO AND BARRY GIBBS, 15 January 2003, 'Acoustic absorption behaviour of an open-celled aluminium foam', JOURNAL OF PHYSICS'

[18] 'Ιδιότητες του καθαρού αλουμινίου και των κραμάτων του', ETEM ,25 July 2015 , <http://www.atem-oe.gr/alouminio-plirofories/idiotites-alouminiu/idiotites-katharou-alouminiu-kramaton.html>

[19] International Magnesium Association, 25 July 2015
<http://www.intlmag.org/magnesiumbasics>

[20] Elicia Maine and Michael F. ASHBY, April 2000, 'COST ESTIMATION AND THE VIABILITY OF METAL FOAMS', Advanced Engineering Materials

[21] Γ.ΠΕΧΛΙΒΑΝΟΓΛΟΥ , 'ΑΦΡΩΔΗ ΜΕΤΑΛΛΑ –ΝΕΑ ΑΦΡΩΔΗ ΥΛΙΚΑ', ΑΝΤΙΓΡΑΦΟ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗΣ ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΥ R&D TEAM,

[22] ΓΚΡΕΚΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ , ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ : 'ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΙΚΩΝ ΠΟΡΩΔΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΑΦΡΟΠΟΙΗΣΗΣ', ΑΠΘ, 2013

[23] ΣΤΕΡΓΙΟΥΔΗ ΦΑΝΗ , ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ : 'ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΡΩΔΩΝ ΥΛΙΚΩΝ , ΑΠΘ', 2011

[24] ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ , ΑΡΘΡΟ : 'ΜΕΤΑΛΙΚΟΙ ΑΦΡΟΙ' , , 5 Αυγούστου 2015

[25] ΣΩΤΗΡΗΣ Κ. ΚΑΡΒΟΥΝΗΣ , Δεκέμβριος 2000, *Υποδείγματα μελετών , Μελέτες περιπτώσεων , προβλήματα και ασκήσεις για : ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ* , ΕΚΔΟΣΕΙΣ : ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ , Ελλάδα

[26] Β.Ν. ΣΑΡΣΕΝΤΗ , 1993 , *ΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΧΗΡΗΜΑΤΙΚΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ , ΔΙΟΙΚΗΤΙΚΗ ΛΟΓΙΣΤΙΚΗ*, ΕΚΔΟΣΕΙΣ : ΣΤΑΜΟΥΛΗ , Ελλάδα

[27] PAUL G. KEAT and PHILIP K. Y. YOUNG , 2009, *MANAGERIAL ECONOMICS, ECONOMICS TOOLS FOR TODAY'S DECISION MAKERS SIXTH EDITION*, Sixth edition PEARSON INTERNATIONAL EDITION

[28] Trefor Jones, July 2004, 'BUSINESS ECONOMICS AND MANAGERIAL DECISION MAKING', e-book, UK

[29] William F. Samuelson and Stephen G. Marks, February 2014, *MANAGERIAL ECONOMICS, TEXT BOOK*, 7th Edition

[30] Σαρρής Κωνσταντίνος , Διπλωματική εργασία : *Υπολογιστική διερεύνηση πεδίου ροής και θερμοκρασιακού πεδίου σε μεταλλικούς αφρούς*, Διπλωματική εργασία , Α.Π.Θ , 2013

[31] Σωτήρης Κ. Καρβούνης, 2006 , *Μεθοδολογία, Τεχνικές και Θεωρία για οικονομοτεχνικές Μελέτες*, Εκδοσεις : ΑΘ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ

[32] Y.Y.Zhao , T. Fung , L. P. Zhang , F. L. Zhang , 2005 , 'LOST CARBONATE SINTERING PROCESS FOR MANUFACTURING METAL FOAMS' , Scripta MATERIALIA, vol.4 , p.295-298

[33] Medhat Awad El-Hadek and Saleh Kaytbay, March 2008, 'Mechanical and physical characterization of copper foam', International Journal of Mechanics and Materials in Design, issue 1, vol 6, p 63-69

[34] I.P. Zhang and Y.Y. Zhao, 2008, 'Fabrication of high melting –point porous metals by lost carbonate sintering process via decomposition route', *Journal of Engineering of Manufacture*, vol.222, p. 267-271

[35] Amir Masoud Parvanian and Maroud Panjepour ,2013 , 'Development of open-pore Copper Foams to Use as Bipolar Plates in polymer Electrolyte Membrane fuel Cell Stacks' ,*Iranica Journal of Energy & Environment* ,Issue 2 , vol.5 ,p.99-103

[36] Nikita Khlystov, Daniel Izard, Keisuke Matsushita, Jennie Zheng, 25 September 2015, 'UNIAXIAL TENSION AND COMPRESSION TESTING OF MATERIALS', vol.19

[37] Ν. Ανδριανόπουλος , Ε. Κυριαζή και Κ. Λιακόπουλος,1991 , *Πειραματική αντοχή υλικών , Συμμεών , ΑΘΗΝΑ*

[38] VONFU ZHU, KOUJI MIMURA, JAE WON LIM , MINORU ISSITIKI AND QING JIANG, April 2006 , 'BRIEF REVIEW OF OXIDATION KINETICS OF COPPER AT 350°C TO 1059°C' ,*Metallurgical and Materials Transactions* ,vol.37 , p 1231-1237

[39] ΕΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΣΤΑΘΕΡΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ, 10 Σεπτέμβρη 2015,

[40] J. Jkubowitz, G. Adamek, M. Dewidar, 2 April 2013, 'Titanium foam made with saccharose as space holder', *J Porous Mater*, vol. 5, p. 1137-1141

[41] N. Michailidis, F. Stergioudi, 2010, 'Establishment of process parameters for producing Al-foam by dissolution and powder sintering method', *Materials and Design*, vol.5, p. 1559-1564

[42] Y.Y ZHAO and D. X. Sun, 2000, 'A NOVEL SINTERING – DISSOLUTION PROCESS FOR MANUFACTURING Al FOAMS', *Scripta MATERIALIA*, vol. 6, p. 105-110

[43] N. Michailidis, F. Stergioudi and A. Tsouknidas, 'DEFORMATION and ENERGY ABSORPTION PROPERTIES OF POWDER- METALLURGY PRODUCED Al FOAMS', *Materials Science and Engineering A*, vol. 6, p. 7222-7227

[44] Seksak Asavavisithchai and Ekasit Nisaratanaporn ,2010 , 'Fabrication of Open –Cell Silver Foams Using Disaccharide as Space Holders' , *Journal science*, vol. 9 , p. 222-230

[45] C.C. Yang, H.Nakae, 2000, 'Foaming characteristics control during production of aluminum alloy', *FOAM, JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS*, vol.3, p.188-191

[46] WIKIPEDIA the free Encyclopedia, *Oilite*, 25/10/2015, <https://en.wikipedia.org/wiki/Oilite>

[47] National Bronze MFG, Oil Impregnated Bushings, 25/10/2015, <http://www.nationalbronze.com/oil-impregnated-bearings.php>

[48] National Bronze MFG, P/M Process, 25/10/2015, <http://www.nationalbronze.com/pmprocess.php>

[49] Oilite, 25/10/2015, <http://www.webcitation.org/5m6Ehu7uf>

[50] COMPACTING METAL POWDERS, 25/10/2015, <http://riad.pk.edu.pl/~mnykiel/iim/KTM/MP/DOWNLOAD/pdf/CHAPT04.PDF>

[51] TALAT Lecture 1401, Aluminium Powder metallurgy, vol. 2

[52] ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΧΑΛΚΟΥ, 25/10/2015, <http://medicorehellas.gr/idiotites-toy-halkoy>

[53] powder metallurgy, 25/10/2015,
http://www.slideshare.net/shankaragiri/powder-metallurgy?next_slideshow=1

[54] **Powder Metallurgy-Module III**, 25/10/215,
http://www.slideshare.net/rejeeshcraendran/module-iii-32259859?next_slideshow=3

[55] powder metallurgy process, 25/10/2015,
<http://www.slideshare.net/iAMrownaroo/powder-metallurgy-process>

[56] powder metallurgy technologie , 25/10/2015,
http://www.slideshare.net/FitriHandayani3/powder-metallurgy-technologie?next_slideshow=5

[57] K.I. Ramos and D.F Bahr, "**Mechanical behavior assessment of sucrose using nanoindentation**", 2007 , vol.22 , pp. 2037-2045